

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
- سطيف | جامعة فرحات عباس - سطيف
UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF 1- SETIF

THESE

Présentée à la

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT D'ÉLECTROTECHNIQUE

Pour l'Obtention du Diplôme de

Doctorat en Sciences

Option : Automatique

Par

Hichem AZLI

Thème

**Contribution A L'intégration Des Algorithmes D'ordonnement
Dans Les Systèmes De Production ; Application Aux Systèmes De
Production D'Energie Electrique**

Soutenue le :/..../.... devant la commission d'examen composée de

Pr. RAHMANI Lazhar	Université Ferhat Abbas, Sétif-1	Président
Pr. MOSTEFAI Mohammed	Université Ferhat Abbas, Sétif-1	Directeur de Thèse
Pr.RADJELAI Hammoud	Université Ferhat Abbas, Sétif-1	Examineur
Pr.BOUDJERDA Nasreddine	Univ. M S.B.Y. Jijel	Examineur
Pr.MESSALTI Sabir	Univ. M. B. M'sila	Examineur
M.KESSAL Abdelhalim	Univ. B. I. BBA	Examineur

Avant-propos

Le présent travail dans cette thèse a été réalisé au laboratoire d'automatique et informatique industrielle de l'université Ferhat Abbas -Setif1

*Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à Monsieur **Mohammed MOSTEFAI** professeur au département d'Electrotechnique à l'université Ferhat Abbas -Setif1 pour sa disponibilité, ses conseils et suggestions, et ses directives tout au long de ce travail, ainsi que pour ses qualités humaines.*

Je tiens à exprimer encore mes sincères remerciements à :

*Monsieur **Lazhar RAHMANI**, professeur au département d'Electrotechnique à l'université Ferhat Abbas -Setif1, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury.*

*Monsieur **Hammoud RADJEL**, Professeur au département d'Electrotechnique à l'université Ferhat Abbas -Setif1, pour avoir accepté de consacrer du temps à mon travail et pour avoir participé à mon jury.*

*Monsieur **Nasreddine BOUDJERDA**, Professeur au département D'Electrotechnique à l'université de Jijel, pour avoir accepté de juger ce travail en qualité d'examineur.*

*Monsieur **Sabir MESSALTI**, Professeur au département d'Electrotechnique à l'université de M'sila, pour avoir accepté de juger ce travail en qualité d'examineur.*

*Monsieur **Abdelhalim KESSAL**, Maître de conférence au département d'Electrotechnique à l'université de Bordj Bou Arreridj pour avoir accepté de juger ce travail en qualité d'examineur.*

Sommaire

Introduction Générale	1	
CHAPITRE I : Evaluation de l'Energie renouvelable en Algérie		
1	Introduction	5
2	Bilan Energétique Mondial	5
2.1	Les Utilisations de l'Energie Primaire	5
2.2	La Production d'Electricité	5
2.2.1	Le Secteur Résidentiel et Tertiaire	7
2.2.2	L'Industrie	7
2.2.3	Le Transport	7
2.2.4	Une Concurrence Inter Energétique	8
3	Energie et Environnement	8
3.1	Développement des énergies renouvelables dans le monde	8
3.1.1	L'énergie hydraulique	10
3.1.2	L'énergie de la biomasse	10
3.1.3	L'énergie de la géothermie	10
3.1.4	L'énergie solaire	11
3.1.5	L'énergie éolienne	11
3.2	Environnement et Coût des Energies Renouvelables	12
3.2.1	Coûts d'Investissement et d'Exploitation	12
3.2.2	Impact sur l'Environnement	13
4	Programme Algérien des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique	13
4.1	L'efficacité énergétique	14
4.1.1	Réduction de la consommation	15
4.1.2	Amélioration de l'efficacité énergétique	16
4.2	Développement des énergies renouvelables	19
4.2.1	Potentiel des énergies renouvelables en Algérie	20
4.2.2	Réalisations et mises en œuvre	23
5	Conclusion	27

CHAPITRE II : Présentation des systèmes Energétiques multi-sources

1	Introduction	29
2	Définition et mission des systèmes énergétiques multi-sources	30
3	Etat de l'art des systèmes énergétiques multi-sources	31
4	Principaux composants des SMS	34
4.1	Énergie solaire photovoltaïque	35
4.1.1	Les technologies des cellules photovoltaïques	37
4.1.2	Fonctionnement d'une installation photovoltaïque	40
4.1.3	Les points forts du système photovoltaïque	41
4.1.4	Les points faibles du système photovoltaïque	41
4.1.5	Modèle du générateur photovoltaïque	42
4.2	Énergie éolienne	43
4.2.1	Fonctionnement d'une éolienne	44
4.2.2	Principaux composants d'une éolienne	46
4.2.3	La puissance des éoliennes	49
4.2.4	Systèmes éoliens raccordés au réseau	50
4.2.5	Modèle de l'éolienne	51
4.3	Systèmes de stockage	52
4.3.1	Modèle du banc de stockage (banc de batteries)	52
4.3.2	Modèle énergétique du banc de batteries, établissement de son état de charge	53
4.4	Générateur diesel	54
4.4.1	Moteur diesel et régulateur de vitesse	55
4.4.2	Modèle simplifié de la machine synchrone	57
4.5	Convertisseurs	58
4.6	Charge	59
5	Conclusion	59

CHAPITRE III : Outils de dimensionnement des SMS Energétiques- Etat de l'art

1	Introduction	61
2	Méthodes et outils de dimensionnement des systèmes multi-sources énergétiques	61

2.1	Méthodes conventionnelles	61
2.2	Outils de dimensionnement	64
2.2.1	HOMER	65
2.2.2	HYBRID2	66
2.2.3	RETScreen	67
2.2.4	iHOGA	69
2.2.5	INSEL	70
2.2.6	TRNSYS	70
2.2.7	iGRHYSO	71
2.2.8	HYBRIDS	72
2.2.9	RAPSIM	72
2.2.10	SOMES	72
2.2.11	SOLSTOR	73
2.2.12	HySim	73
2.2.13	HybSim	73
2.2.14	IPSYS	74
2.2.15	HySis	74
2.2.16	Dymola/Modelica	74
2.2.17	ARES	75
2.2.18	SOLSIM	75
2.2.19	Hybrid Designer	76
2.3	Etude comparative entre les outils des simulation présentés	76
3	Conclusion	78

CHAPITRE VI : Optimisation de la gestion des SMS Energétiques

1	Introduction	80
2	Optimisation de la gestion des SMS énergétiques	80
2.1	Formulation du problème d'optimisation	81
2.2	Description de la procédure d'optimisation	81
3	Choix de la méthode d'optimisation	82
3.1	Classification des méthodes d'optimisation	83

3.1.1	Méthodes déterministes	83
3.1.2	Méthodes stochastiques	86
3.2	Evaluation des méthodes et critères de choix (Cas d'une optimisation mono-objectif)	88
3.2.1	La fiabilité ou convergence globale	88
3.2.2	Vitesse de convergence locale	88
3.2.3	La précision	89
3.2.4	La mise en œuvre	89
4	Algorithme du point intérieur	91
4.1	Définition	91
4.2	Principe de la méthode	91
5	Conclusion	93

CHAPITRE V : Eude de cas ; Gestion Optimale d'un site isolé existant

1	Introduction	95
2	Description du système	95
2.1	Configuration du SMS	95
2.2	Profil de demande d'énergie	98
3	Modèle mathématique	98
3.1	Modèles PV et éoliens	98
3.2	Modèle générateur diesel	99
3.3	Modèle de batterie	99
3.3.1	État de charge	99
3.3.2	État de décharge	100
4	Formulation de la fonction objectif	100
4.1	Fonction objectif	100
4.2	Contraintes	100
5	Méthodologie	101
6	Résultats de discussion	101
6.1	Simulation de la gestion de dispatch d'énergie	102
6.1.1	Gestion Classique (principe de priorité)	102
6.1.2	Gestion Optimale	103

6.2	Evolution de l'environnement du SMS	105
6.2.1	Eolienne hors service	107
6.2.2	Générateur diesel hors service	106
6.2.3	Evolution du nombre de ménages	108
6.3	Discussion Générale	109
7	Conclusion	110
	Conclusion générale	112

Liste des Acronymes et Nomenclatures

A_{pv} [**m2**] : Surface du champ solaire

A_{wt} [**m2**] : Surface balayée par le rotor de la turbine de rayon

C_{Bat} : Capacité du banc de batteries

C_p : Le coefficient de puissance de la turbine éolienne (sa valeur maximale proche de 0.6)

C_{Wind} : coût de l'Energie produite par l'éolienne.

C_{PV} : coût de l'Energie produite par le panneau photovoltaïque.

$C_{Bat-dis}$: coût de l'Energie produite par la décharge de batterie

$C_{Bat-char}$: coût de charge de la batterie.

DOD : Profondeur de décharge (Depth Of Discharge).

E_{Ex} : Energie excédentaire

E_{Und} : Energie non délivrée

GD: Générateur Diesel

$Ir_{,pv}$ [**W/m2**]: L'irradiation instantanée ou horaire sur le panneau solaire

Ir [**whm2**] : Irradiation solaire

LPSP : Paramètre de satisfaction (Loss Power Supply Probability).

NBat : Le nombre total de batteries

NBats : Le nombre de batteries connectées en série

NBatp : Nombre de batteries connectées en parallèle

SOC : L'état de charge de la batterie (State Of Charge).

SOC_{min} : Seuil minimum du banc de batteries

SOC_{dmin} [%] : Seuil du démarrage du générateur diesel

SOC_{dmax} [%] : Seuil d'arrêt du générateur diesel

SMS : Systèmes Multi-Sources.

T_{NOCT} : La température nominale de fonctionnement de la cellule (Nominal Operating Cell Température).

T_a [°C]: La température ambiante

T_r [°C]: La température de référence qui vaut la valeur 25°C

T °C : Température absolue

$T_{c,NOCT}$: Température de cellule sous des conditions de fonctionnement à température nominale (Nominal Operation Cell Temperature).

Δt : Le pas de simulation.

ΔT : Variations de température liées aux pertes thermiques internes PT .

Q : quantité de charge délivrée ou fournie pendant un temps t .

$P_{Bat-Char}(t)$: puissance de charge de la batterie

P_{Wind} : Puissance instantanée de l'éolienne.

P_{PV} : Puissance instantanée photovoltaïque

P_{Diesel} : Puissance instantanée du groupe Diesel.

P_{Load} : Puissance demandée charge rurale.

V_{Bus} : Tension de bus DC.

VRLAB1: Batterie à plaques plates type GEL VRLA SOLAR.

VRLAB2: Batterie à plaques plates type GEL VRLA SOLAR Block.

VRLAB3: Batterie à plaques tubulaires type GEL VRLA A600 SOLAR.

σ : taux horaire d'autodécharge0

η_{inv} : rendement de l'onduleur

η_{Bat} : efficacité de charge de la batterie

η_G : Le rendement global entre la puissance électrique utile de la génératrice et la puissance potentielle présente dans le vent pour l'éolienne donnée.

ρ [kg/m^3] : La densité volumique de l'air.

Liste des Figures

Figure I.1	Les différents secteurs de consommation d'énergie dans le monde à l'heure actuelle	6
Figure I.2	Structure de la production d'électricité mondiale en 2012	9
Figure I.3	Production d'électricité à partir de sources renouvelables en 2012	9
Figure I.4	Ensoleillement annuel en Algérie	21
Figure I.5	Carte annuelle des vents en Algérie.	23
Figure I.6.	Exemple de spécifications techniques : Fourniture et pose de kits solaires pour foyers ruraux et sites isolé	28
Figure II.1	Production d'électricité dans un site isolé	30
Figure II.2	Architecture des SMS	32
Figure II.3	Coupe transversale d'une cellule PV typique	37
Figure II.4	Photos de cellules monocristalline et multi-cristalline	38
Figure II.5	Deux exemples de modules utilisant le SiA (Silicium amorphe)	39
Figure II.6	Cellule photovoltaïque organique	40
Figure II.7	Fonctionnement d'une installation photovoltaïque raccordée au réseau	41
Figure II.8	Schéma du fonctionnement d'une éolienne	44
Figure II.9	Eoliennes à axe vertical	46
Figure II.10	Eoliennes à axe horizontal	46
Figure II.11	Principaux composants d'une éolienne	48

Figure II.12	Evolution de la puissance des éoliennes avec la surface balayée	49
Figure II.13	Production de l'électricité à l'échelle individuelle	50
Figure II.14	Fonctionnement d'une centrale éolienne	51
Figure II.15	Configuration du générateur diesel	55
Figure II.16	Bloc-diagramme d'un moteur diesel simplifié et du régulateur de vitesse	56
Figure II.17	Modèle équivalent d'un enroulement	57
Figure III.1	Schéma représentatif de HOMER	66
Figure III.2	Schéma représentatif de HYBRID2	67
Figure III.3	Schéma représentatif de RETScreen	68
Figure III.4	Schéma représentatif de iHOGA	69
Figure III.5	Schéma représentatif de TRNSYS	71
Figure V.1	Le système CDER micro hybride renouvelable	96
Figure V.2	Vent horaire et potentiel PV du site	97
Figure V.3	Profil de la demande en énergie d'un ménage rural	98
Figure V.4	Dispatch d'énergie lors d'une gestion classique	103
Figure V.5	Gestion optimale dans des conditions normales	104
Figure V.6	Fonction de coût du générateur diesel	104

Figure V.7	Gestion optimale lorsque l'éolienne est en panne	105
Figure V.8	Gestion optimale lorsque le groupe électrogène diesel est en panne	106
Figure V.9	Gestion optimale lorsque le groupe électrogène diesel est en panne (service minimum)	107
Figure V.10	Gestion optimale de 14 ménages dans des conditions normales	108

Liste des Tableaux

Tableau I.1	Programme national de développement des énergies renouvelables 2015-2030	20
Tableau I.2	Potentiel solaire en Algérie par région	22
Tableau I.3	Evolution de la production d'électricité de source renouvelable et conventionnelle «1980-2018 »	25
Tableau I.4	Réalisation et mise ne service de centrales renouvelables	26
Tableau II.1	Classification des SMS par gamme de puissance	33
Tableau II.2	Classification des systèmes éolien-diesel basée sur le taux de pénétration de l'énergie éolienne	34
Tableau III.1	Principaux points forts de divers outils logiciels pour systèmes hybrides	76
Tableau III.2	Capacités d'analyse des outils de simulation des système hybride	77
Tableau III.3	Analyse comparative de outils accessibles gratuitement	78
Tableau VI.1	Tableau comparatif des méthodes d'optimisation non linéaire sous contraintes	88
Tableau V.1	Paramètres du générateur diesel	102

Introduction générale :

Contexte :

Selon les statistiques de l'Agence internationale de l'énergie, plus des trois quarts de l'énergie mondiale consommée en 2010 était d'origine fossile. Cependant, ces sources de l'énergie - gaz, pétrole, charbon - condamnées à se tarir au cours des prochaines décennies, sont avérées aujourd'hui comme étant la cause principale de la pollution de l'air, et de l'augmentation de l'effet de serre provoquant le réchauffement climatique.

Face à la demande mondiale croissante, l'agence préconise le développement de plus en plus de sources d'énergie de nature propre.

Dans le domaine de la production de l'énergie électrique, les réseaux électriques ne suffisent pas pour fournir de l'électricité à l'ensemble de la population mondiale, notamment les régions désertiques, montagneuses ou situés sur des îles, faute de solutions techniques ou de viabilité économique.

Les sources d'énergies renouvelables se prêtent particulièrement bien à la production d'électricité dite en site isolé, ou en micro-réseau.

Cependant, le caractère aléatoire représente le principal inconvénient dans ces ressources. Pour cela, elles sont souvent associées à d'autres sources d'énergie pour constituer des systèmes d'énergies hybrides ou système multi-sources (SMS), afin de regrouper les avantages de ces ressources dans le but de satisfaire les exigences de la charge, tout en minimisant leurs inconvénients.

Problématique

Les systèmes de production hybrides jouent un rôle de plus en plus important dans la production d'énergie électrique

Plusieurs configurations de systèmes Electrique hybrides sont décrites dans la littérature. On peut citer ici quelques combinaisons actuelles ; Par exemple, Kumar et Palwalia ont présenté en Inde un examen technique de la production hybride d'éoliennes photovoltaïque / éolienne [1]. Ruther et al. ont discuté le potentiel des systèmes PV / diesel en Amazonie brésilienne [2].

Kaabeche et al. ont mis en place le dimensionnement optimal d'un système PV / éolienne / batterie en Algérie [3]. Ali a réalisé une analyse techno-économique d'une centrale photovoltaïque / éolienne / pile à combustible / batterie située dans un camp de safari dans le désert aux Émirats arabes unis [4]. Siddique et al. a proposé une intégration optimale de l'énergie photovoltaïque / éolienne avec une centrale diesel existante dans le réseau public [5]. Tabatabaei et al. a présenté une synthèse des technologies de carburants de substitution [6].

Autant que les auteurs le sachent, la plupart des travaux de recherche traitent la question de dimensionnement des centrales SMS sur des horizons de plusieurs années [7]. Les résultats obtenus sont certainement essentiels pour minimiser les coûts énergétiques. Néanmoins, ceux-ci ne peuvent rester optimaux tout au long du cycle de vie du SMS énergétique.

Cela est dû à l'évolution inévitable du nombre de consommateurs raccordés à la centrale hybride (généralement en augmentation), à l'évolution des profils de consommation et à la possible dégradation d'une partie de la centrale.

La question principale que l'on doit se poser est : Comment gérer l'énergie produite par ces différentes ressources d'une manière optimale ?

Objectif

Dans ce travail, nous nous intéressons à l'élaboration d'une stratégie de planification des différentes sources d'énergie de la centrale SMS, qui permettra de minimiser le coût énergétique générée, tout en assurant une qualité de service optimale, et ce, en tenant compte de l'évolution de l'environnement dans lequel la centrale SMS opère ; En d'autres termes, mettre en œuvre un mode opératoire qui va accompagner le système multi-source et optimiser son fonctionnement tout au long du cycle de vie de l'installation, de manière à :

- Assurer, malgré les fortes variations de l'énergie produite ; le besoin de la charge en énergie électrique dans les régions isolées (continuité de service).
- Réduire l'utilisation des éléments de stockage au minimum ;
- Réduire la consommation de carburant.
- Prolonger la durée de vie du SMS énergétique.

L'approche qui sera développée devra non seulement optimiser le fonctionnement de l'installation en assurant une efficacité énergétique durant tout le cycle de vie de l'installation,

mais apporter également une contribution en tant qu'outil d'aide à la décision pour le dimensionnement ou le redimensionnement d'un système SMS.

Organisation du mémoire :

Cette problématique sera traitée dans ce mémoire à travers cinq chapitres organisés comme suit :

Dans le chapitre 1, nous étalons une évaluation de l'Energie renouvelable dans le monde et en algerie, ensuite, nous discutons le programme algérien des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique.

Le chapitre 2 est consacré à des généralités et un état de l'art sur les systèmes d'énergie hybride autonome : nous donnons d'abord une étude descriptive des sources d'énergie renouvelables, ensuite, nous présentons les définitions, les avantages et les différentes architectures des systèmes électriques multi-sources autonomes.

Le troisième chapitre sera dédié aux outils de modélisation et simulation des SMS, un état de l'art sur les différents logiciels de simulation commercialisés sera présenté.

Au cours du quatrième chapitre, nous allons exposer notre approche d'optimisation de la politique de distribution de puissance émanant de multiples sources d'Energie, l'algorithme du point intérieur qui a été retenu pour résoudre la problématique su-mentionnée sera présenté.

Dans le dernier chapitre, nous donnerons une description de la méthodologie de résolution proposée mise en œuvre sur un site existant, plusieurs scenarios seront développés, nous présenterons les résultats de simulation, quelques conclusions et perspectives pour des recherches futures.

CHAPITRE I :
**Evaluation de l'Energie renouvelable
en Algérie.**

C'est donc une source d'énergie quasi-continue, car elle est interrompue uniquement par des opérations de maintenance sur la centrale géothermique ou le réseau de distribution de l'énergie.

3.1.4. L'énergie solaire

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (kWc/m²) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année [15].

L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés :

- **L'énergie solaire thermique** : qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.
- **L'énergie solaire photovoltaïque** : qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon.
- **L'énergie solaire passive** : est une autre forme d'utilisation de l'énergie solaire qui consiste à utiliser directement la lumière pour le chauffage.

3.1.5. L'énergie éolienne

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers. Dans l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an [16]. Selon le Global Wind Energy Council (GWEC), le parc éolien pourrait atteindre une puissance installée de 230 GW en 2020 [9], soit plus de 5 fois la puissance installée en 2005 qui était de 40 GW. Le principal inconvénient de cette source d'énergie est l'indisponibilité et l'imprévisibilité du vent.

CHAPITRE II :
**Etat de l'art des systèmes d'énergies
renouvelables**

1. Introduction :

La production d'électricité à partir des systèmes multi-sources vise à concevoir des systèmes de production d'énergie performants, économes et peu polluants. Ils font désormais partie intégrante des chaînes de production décentralisée et participent au développement du marché de l'énergie renouvelable.

Dans les systèmes multi-sources nous obtenons une baisse de prix pour couvrir au moins l'investissement fait pour les générateurs d'énergies renouvelables et les autres composantes auxiliaires de ces systèmes.

Les modules photovoltaïques, les éoliennes et les générateurs diesels sont souvent utilisés dans ces systèmes. Ceux-ci peuvent aussi inclure d'autres sources d'énergie comme l'énergie hydraulique, géothermique ou l'énergie contenue dans l'hydrogène (pile à combustible).

Les systèmes rencontrés dans la littérature sont largement instrumentés, avec des capteurs qui permettent d'obtenir les conditions météo :

- Vitesse du vent.
- Direction du vent.
- Ensoleillement dans le plan horizontal.
- Températures ambiantes.
- Températures des modules.

Et des capteurs qui nous permettent de mesurer les courants, tensions et puissances de :

- Chaîne de production éolienne.
- Chaîne de production photovoltaïque.
- Batterie.
- Bus continu.
- Réseau.
- Charges.

D'ici 20-30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Naturellement décentralisées, il est intéressant d'exploiter des systèmes multi-sources sur le lieu de consommation, en produisant directement soit la chaleur, soit l'électricité à courant alternatif ou à courant continu ou les deux à la fois selon les besoins.

La production d'électricité décentralisée par des systèmes multi-sources offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement.

Cependant le caractère aléatoire de ces sources nous impose d'établir des règles de dimensionnement et d'utilisation de ces systèmes pour les exploiter au mieux, donc un système multi-source autorise une production décentralisée adaptée à la fois aux ressources et aux besoins locaux et offre une importante indépendance énergétique [30].

2. Définition et mission des SMS :

Les systèmes d'énergie multi sources (SMS) associent au moins deux technologies complémentaires, une ou plusieurs sources d'énergie classiques, généralement des générateurs diesels, et au moins une source d'énergie renouvelable [18][31][32][33].

Les sources d'énergie renouvelable, comme l'éolienne et le photovoltaïque, ne délivrent pas une puissance constante.

Leur association avec des sources classiques permet d'obtenir une production électrique continue. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées [Figure II.1].

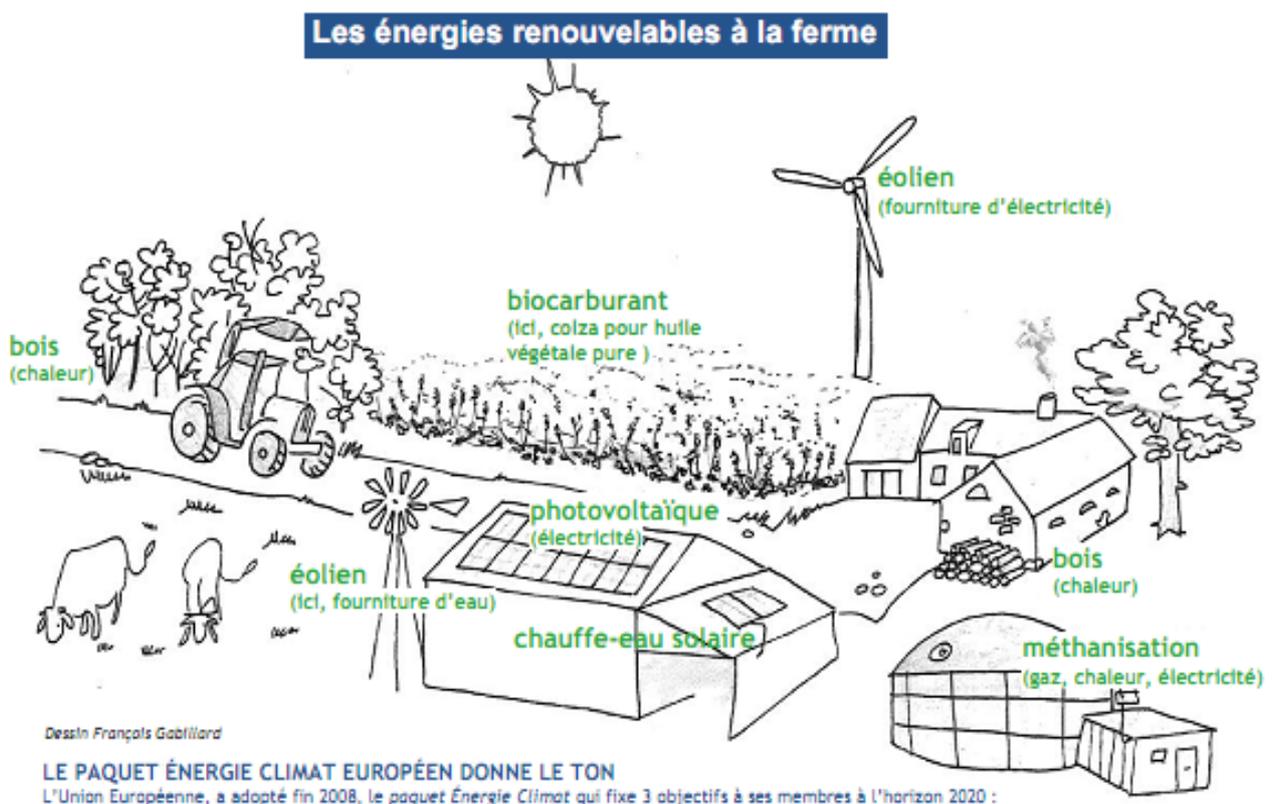


Figure II.1 : Production d'électricité dans un site isolé [34].

Le but d'un SMS est d'assurer l'énergie demandée par la charge et, si possible, de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie renouvelable, tout en maintenant la qualité de l'énergie fournie [31].

De plus, l'économie de carburant et la baisse de prix obtenues par la génération hybride doivent au moins couvrir l'investissement fait pour les générateurs d'énergie renouvelable et les autres composants auxiliaires du système. Du point de vue technologique, la fiabilité n'est pas seulement une question de respect des normes pour l'alimentation en électricité, mais aussi de maintenance, compte tenu des conditions particulières des régions isolées. Les systèmes isolés sont souvent caractérisés par une infrastructure (communication, services, etc.) pauvre, un accès difficile et un manque de personnel qualifié.

Les performances d'un SMS, le rendement et la durée de vie, sont influencées en partie par sa conception, c'est-à-dire le dimensionnement des composants, le type de composants, l'architecture etc, et d'autre part, par le choix de la stratégie de fonctionnement. Quelques paramètres permettant d'évaluer ses performances sont : l'économie de carburant, le coût du kW, le nombre et la durée des pannes, le nombre d'arrêts pour l'entretien etc. La durée de vie des composants d'un SMS peut être beaucoup plus courte que la durée de vie normale des composants individuels (fonctionnement en connexion aux réseaux interconnectés) [31].

Les points les plus critiques sont en général la dégradation des batteries, l'endommagement des démarreurs diesel et du système mécanique de freinage des éoliennes et la carbonisation excessive des cylindres du moteur diesel.

3. Etat de l'art

En plus d'un ou plusieurs générateurs diesels (GD) et d'au moins une source d'énergie renouvelable, un SMS peut aussi incorporer un système de distribution à courant alternatif (CA), un système de distribution à courant continu (CC), un système de stockage, des convertisseurs, des charges, des charges de délestage et une option de gestion des charges ou un system de supervision. Toutes ces composantes peuvent être connectées en différentes architectures. Celles-ci sont résumées dans la **Figure II.2**.

Dans la plupart des cas, les systèmes hybrides classiques contiennent deux bus [32] : un bus à CC pour les sources, les charges à CC et les batteries et un bus à CA pour les générateurs à CA et le système de distribution.

Les sources d'énergie renouvelable peuvent être connectées au bus à CA ou à CC en fonction de la dimension et la configuration du système.

L'interconnexion entre les deux bus peut être réalisée par l'intermédiaire de l'électronique de puissance : onduleurs/redresseurs ou convertisseurs bidirectionnels. A part la charge principale, un système hybride peut contenir aussi des charges auxiliaires (charge différée, charge optionnelle, charge de délestage) pour réaliser l'équilibre énergétique.

Si la charge principale est alimentée sans interruption, les charges auxiliaires sont alimentées en énergie par ordre de priorité, seulement quand il existe un surplus d'énergie. Ainsi, dans un SMS avec des batteries de stockage et charges auxiliaires, s'il existe un excès d'énergie (venant des sources d'énergie renouvelable et des diesels), celui-ci passera d'abord dans les batteries et ensuite, il sera utilisé pour alimenter les autres charges auxiliaires en fonction de leur priorité. Dans un tel système, les batteries de stockage jouent un double rôle : charge et source.

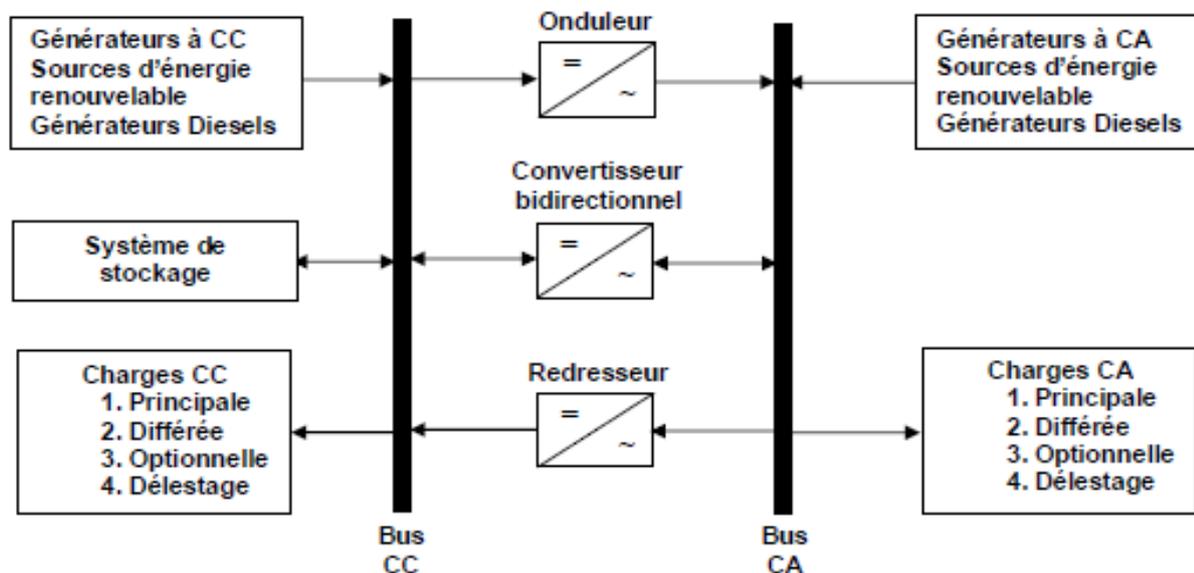


Figure II.2 : Architecture des SMS

La puissance délivrée par les SMS peut varier de quelques watts pour des applications domestiques jusqu'à quelques mégawatts pour les systèmes utilisés dans l'électrification de petites îles [33].

Ainsi, pour les systèmes hybrides ayant une puissance en-dessous de 100 kW, la connexion mixte, bus à CA et bus à CC, avec des batteries de stockage, est très répandue [18] [35].

Le système de stockage utilise un nombre élevé de batteries pour être capable de couvrir la charge moyenne pendant plusieurs jours. Ce type de SMS utilise des petites sources d'énergie renouvelable connectées au bus à CC. Quand il existe une production en CA, elle vient, en principe, des générateurs diesels. Une autre possibilité est de convertir la puissance continue en puissance alternative à l'aide des onduleurs. Les systèmes hybrides utilisés pour des applications de très faible puissance (en-dessous de 5 kW) alimentent généralement des charges à CC [36].

Les systèmes plus grands, ayant une puissance supérieure à 100 kW, sont centrés sur le bus à CA, avec des sources d'énergie renouvelable conçues pour être connectées aux grands réseaux interconnectés [37].

Si ces systèmes contiennent des sous-systèmes de stockage, ce qui est rare, c'est pour lisser les variations de l'énergie de nature renouvelable. Le champ d'application des SMS est très large et par conséquent, il est difficile de classer ces systèmes. On peut néanmoins essayer de réaliser un classement par gamme de puissance (**Tableau I.1**). Les seuils de puissance donnés ne sont que des ordres de grandeurs.

Tableau II.1 : Classification des SMS par gamme de puissance

PUISSANCE DU SMS [KW]	APPLICATION
Faible : < 5	Systèmes autonomes : stations de télécommunications, de pompage de l'eau, autres applications isolées
Moyenne : 10 - 250	Micro réseaux isolés : alimentation d'un village isolé, d'un hameau, des zones rurales...
Grande : > 500	Grands réseaux isolés (ex : réseaux insulaires)

Les grands SMS en sites isolés peuvent être classifiés en fonction du degré de pénétration de l'énergie renouvelable [18].

Les expressions qui permettent de calculer l'indice de pénétration sont :

$$I_{ins} = \frac{P_{rw}[KW]}{P_{ch}[KW]} \quad (II-1)$$

Et

$$I_{moy} = \frac{W_{rw}[KWh]}{W_{ch}[KWh]} \quad (II-2)$$

I_{ins} est la pénétration instantanée. Elle représente la proportion de la puissance produite par les sources d'énergie renouvelable en instantané. P_{rw} représente la puissance renouvelable et P_{ch} , la puissance électrique de la charge (la charge principale, s'il y a plusieurs types de charges). I_{moy} est la pénétration moyenne (mesurée pendant des jours, des mois ou même des années).

W_{rw} représente l'énergie renouvelable et W_{ch} représente l'énergie consommée par la charge principale. Une classification des grands systèmes éolien-diesel sur trois niveaux a été proposée en [18]. Cette classification sépare les systèmes en fonction du taux de pénétration de l'énergie éolienne et donne leurs caractéristiques de fonctionnement (**Tableau II.2**).

Tableau II.2 : Classification des systèmes éolien-diesel basée sur le taux de pénétration de l'énergie éolienne

NIVEAU DE PENETRATION	CARACTERISTIQUES DE FONCTIONNEMENT	PENETRATION	
		PIC INSTANTANE	MOYENNE ANNUELLE
FAIBLE	<ul style="list-style-type: none"> GD fonctionne sans arrêt La production renouvelable réduit la charge du diesel Toute l'énergie renouvelable alimente la charge principale Il n'y a pas de système de supervision	< 50 %	< 20 %
MOYEN	<ul style="list-style-type: none"> GD fonctionne sans arrêt Commande relativement simple Pour des niveaux élevés d'énergie renouvelable, des charges secondaires sont réparties pour assurer une charge suffisante pour le diesel ou la production renouvelable est réduite	50 %- 100 %	20 % - 50 %
ELEVE	<ul style="list-style-type: none"> GD peut être arrêté en fonction de la production d'énergie renouvelable Systèmes auxiliaires pour contrôler la tension et la fréquence Commande complexe.	100 % - 400 %	50 % - 150 %

4. Principaux composants des SMS

Les éoliennes, les panneaux photovoltaïques (PV) et les générateurs diesels sont souvent utilisés dans les SMS. Ceux-ci peuvent aussi inclure d'autres sources d'énergie comme l'énergie hydraulique, marémotrice, géothermique ou l'énergie contenue dans l'hydrogène (piles à

combustible). Les convertisseurs, les charges, les charges de délestage et une forme de gestion de l'énergie peuvent également faire partie d'un SMS. Les batteries sont habituellement utilisées pour le stockage d'énergie, mais il existe d'autres options telles que le stockage inertiel (volant d'inertie) et le stockage d'hydrogène. Une description des composants habituels des SMS est donnée ci-après.

4.1.Énergie solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire est disponible partout sur Terre. Notre planète reçoit 15 000 fois l'énergie que l'humanité consomme. Le rayonnement solaire représente une ressource renouvelable d'énergie énorme, de loin la plus importante. L'énergie reçue à la surface de la terre varie, par m², de 1100 kWh/an à 2300 kWh/an. La ressource est abondante (5% des déserts suffiraient pour alimenter la planète), mais la source (le Soleil) n'est pas toujours disponible (nuit, nuages), ce qui implique un stockage, maillon faible du système.

L'effet photovoltaïque a été découvert par Antoine BECQUEREL en 1839, 57 ans avant que son petit-fils Henri ne découvre la radioactivité, il est obtenu par absorption des photons dans un matériau possédant au moins une transition possible entre deux niveaux d'énergie (semi-conducteur).

Il permet de transformer directement la lumière solaire en énergie électrique. Au zénith, le soleil délivre environ 1kW/m² de rayonnement sur un capteur placé perpendiculairement à ses rayons au niveau de la mer.

Cette transformation du rayonnement solaire en électricité par le processus photovoltaïque est un des moyens d'exploitation du gisement solaire, elle est réalisée par des cellules photovoltaïques. Il est à noter qu'en dépit de cette terminologie, aucune énergie n'est stockée dans la cellule, ni sous forme chimique ni sous aucune autre forme.

Ce n'est pas une pile, mais un convertisseur instantané, qui ne pourra fournir une énergie sous forme électrique que s'il reçoit une énergie sous forme de rayonnement. Une cellule photovoltaïque est basée sur ce phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule.

La **Figure II.3** illustre une cellule photovoltaïque typique où sa constitution est détaillée. Une cellule photovoltaïque est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur

énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches.

Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. A travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs.

La tension maximale de la cellule s'obtient pour un courant nul, cette tension est nommée tension de circuit ouvert (VOC). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit (ICC) et dépend fortement du niveau d'éclairement. Le module photovoltaïque qui un ensemble de cellules photovoltaïques, quant à lui, convertit sur place et très simplement entre 3 % et 30 % de cette énergie en courant électrique continu. La production d'électricité par un générateur photovoltaïque est liée à l'intensité, à la durée de l'ensoleillement et à l'orientation du panneau par rapport au soleil. [38, 39, 40].

Un système photovoltaïque est constitué des éléments suivants :

- Générateur PV.
- Régulateur.
- Convertisseur (onduleur).

On peut produire de l'électricité à partir d'une installation photovoltaïque qui convertit l'énergie solaire en électricité, via l'utilisation d'un matériau semi-conducteur, comme le silicium. Le courant électrique produit par les modules photovoltaïques est un courant continu et on peut le convertir en courant alternatif via un ou des onduleur(s) avant d'être consommée localement ou injecté sur le réseau.

Cette technologie peut être développée dans les exploitations agricoles pour couvrir tout ou une partie de sa consommation d'électricité. Cependant, son développement potentiel en agriculture ne présente pas de spécificité comparativement aux autres secteurs d'activité (habitat, industrie...). Le seul avantage de l'agriculture comparativement à l'habitat est de disposer de grandes surfaces de toitures.

La valorisation de l'énergie solaire pour produire de l'électricité peut être soit revendue sur le réseau, soit utilisée en site isolé non desservi. La revente d'électricité constitue alors un complément de revenu pour les agriculteurs. L'utilisation en site isolé permet par exemple de pomper l'eau pour l'irrigation et l'abreuvement des animaux en plein champ.

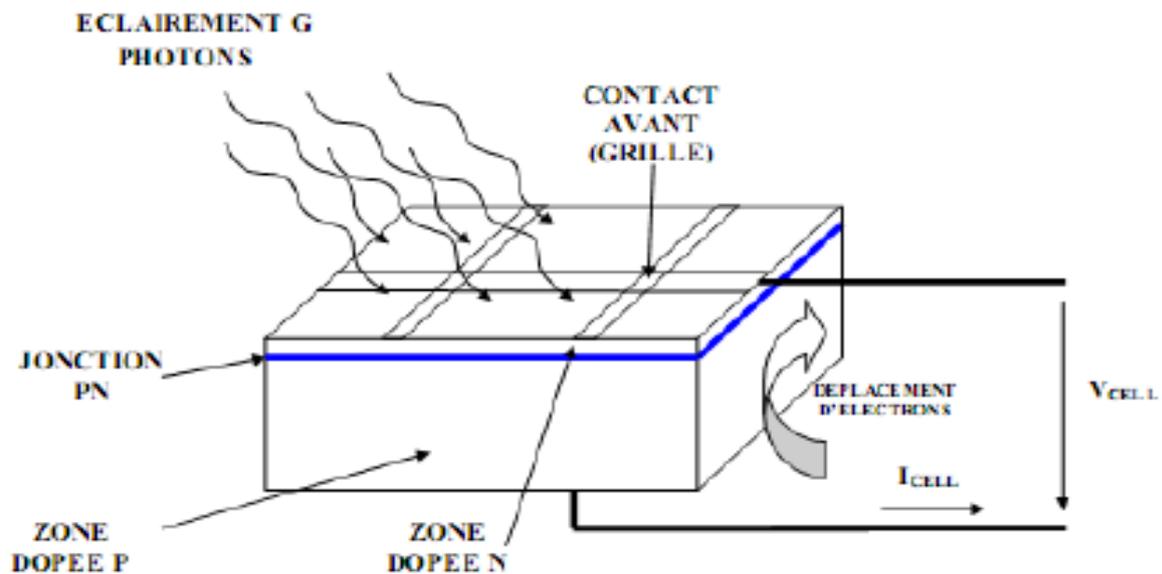


Figure II.3 : Coupe transversale d'une cellule PV typique [40].

4.1.1. Les technologies des cellules photovoltaïques :

Une cellule photovoltaïque peut être réalisée avec de nombreux semi-conducteurs. En réalité il existe aujourd'hui trois principales filières technologiques, le silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques. Ces technologies coexistent sur le marché dans des proportions équivalentes depuis de nombreuses années malgré des prix et des rendements très différents [41].

a- Le silicium cristallin :

Le silicium cristallin domine le marché à plus de 80 %. La fin de cette technologie gourmande en matière première est annoncée depuis de nombreuses années mais les progrès technologiques réalisés par cette filière aux cours des 10 dernières années lui ont permis de garder sa place prédominante sur le marché. Cette filière, de part de son très fort développement actuel, semble partie pour garder cette place encore quelques années.

Cette filière comporte deux technologies, le silicium monocristallin et le silicium multicristallin.

Le silicium monocristallin (**Figure II.4**) est difficile à obtenir. En effet, il nécessite un taux de pureté très élevé et donc plusieurs étapes de purification. Ces étapes sont délicates et donc coûteuses. Le rendement du silicium monocristallin est le plus élevé, il est compris entre 12 et 20 % pour les cellules industrielles. Son coût élevé est aujourd'hui un handicap et le silicium monocristallin perd du terrain devant le silicium multi-cristallin.

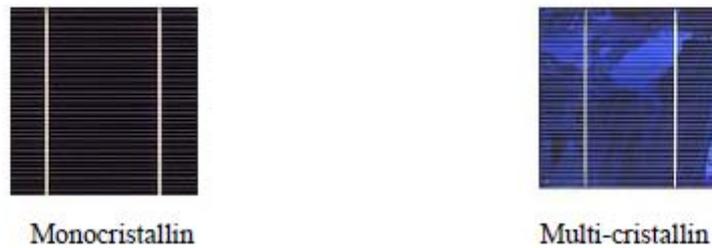


Figure II.4 : Photos de cellules monocristalline et multi-cristalline [41].

Le silicium multi-cristallin est devenu aujourd'hui la technologie la plus utilisée. A elle seule elle représente près de 50 % du marché. Ces cellules sont obtenues par coulage de cristaux de silicium, ce qui rend sa structure hétérogène (Figure II.4).

Son rendement est légèrement inférieur au silicium monocristallin, il est compris entre 10 et 14 % selon les fabricants. En revanche sa fabrication est beaucoup plus simple, les coûts de production sont donc plus faibles. L'un des points faibles de ces deux technologies est la quantité de matière utilisée, même si actuellement la taille des lingots et des cellules augmentent continuellement.

Les lingots de silicium, mono ou multi-cristallin, sont sciés en tranche de 150 à 300 microns, par des scies à fils.

Le diamètre du fil de découpe étant de 180 microns d'épaisseur, il entraîne une perte en matière première de près de 50 % [41].

b- Les couches minces :

Le principal frein au développement du photovoltaïque à très grande échelle reste encore aujourd'hui, malgré la baisse de ces dernières années, le prix trop élevé du kWc.

Le kilo watt crête (kWc) est l'unité qui définit la puissance d'un générateur photovoltaïque aux conditions de test standard (STC) (1000W.m⁻² et 25°C). La majorité du prix d'un générateur photovoltaïque provient du silicium et du procédé de purification.

Plusieurs types de cellules photovoltaïques visant à diminuer la quantité de matière nécessaire à leur fabrication sont aujourd'hui développés et commencent à être industrialisés. Ces technologies appelées couches minces font appel à des procédés de fabrication (dépôt sur ruban) visant la diminution de l'épaisseur des cellules.

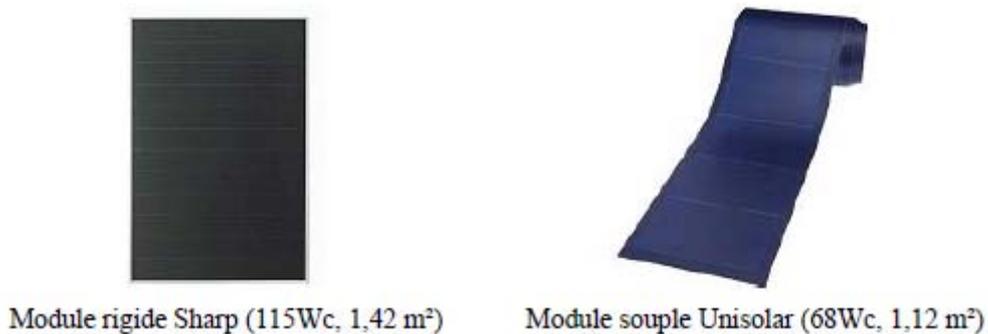


Figure II.5 : Deux exemples de modules utilisant le Sia (Silicium amorphe) [41].

La technologie à couche mince dont la plus mure est le silicium amorphe (Sia) représentait en 2008 plus de 7 % du marché mondial. L'avantage de cette technique est l'utilisation de Substrats à bas coût. Le silicium est déposé à basse température sur un substrat en verre.

De plus il est possible de déposer ces cellules sur des substrats souples (**Figure II.5**) et ainsi de fabriquer des cellules souples. Son prix est plus faible que les cellules cristallines, en revanche, le rendement d'une cellule en Sia est inférieur à celui des cellules cristallines, il est d'environ 7 %.

L'utilisation de ce type de cellules nécessite l'utilisation d'une isolation galvanique entre les modules et le réseau. Sans cette isolation galvanique les cellules amorphes se dégradent très rapidement. La raison physique de ce phénomène reste encore obscure. Les cellules amorphes captent très bien le rayonnement diffus et sont donc moins sensibles aux variations de rayonnement direct. Ces cellules sont donc une très bonne alternative aux cellules cristallines sur des sites soumis à des ombrages sévères.

D'autres matériaux sont également utilisés dans les filières à couches minces comme le Tellure de Cadmium (CdTe), le diséléniure de cuivre et d'indium (CIS) et de gallium (CIGS).

Ces technologies possèdent de bons rendements, pouvant aller jusqu'à 19 %. Malgré les potentialités de ces trois technologies, les problèmes de toxicité sur l'environnement et d'approvisionnement en matières premières qu'elles soulèvent les cloisonneront au laboratoire ou à des applications très spécifiques [41].

c- Cellules organiques et plastiques :

Les cellules organiques (**Figure II.6**) sont aujourd'hui un sujet d'étude très actif et restent actuellement un sujet de laboratoire. Ces cellules comprennent deux voies, la voie des cellules « humides » et la voie des cellules polymères organiques dites aussi cellules « plastiques ». Les progrès de ces technologies sont très rapides, des records de rendement sont très fréquemment

battus (actuellement près de 6 %). Le principal frein à ces technologies est actuellement la stabilité de leur performance ainsi que leur durée de vie (actuellement environ 1000 heures).

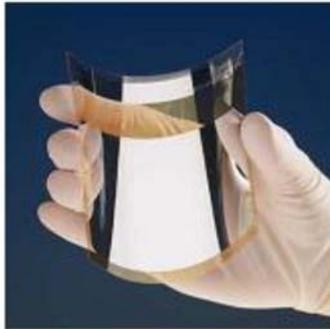


Figure II.6 : Cellule photovoltaïque organique [41].

Les nanosciences ouvrent cependant de nouvelles voies à leurs améliorations. Leur avenir industriel n'est pas encore établi mais ces technologies ouvriraient la voie à des modules à très bas coût, biodégradables et pouvant être intégrés à toutes formes de surface. Par exemple des encres photovoltaïques sont actuellement étudiées. Ces encres pourraient être intégrées à un très large éventail de matériaux [41].

4.1.2. Fonctionnement d'une installation photovoltaïque :

Pour produire de l'électricité à l'échelle individuelle (Figure II.7), les systèmes photovoltaïques utilisent l'énergie la mieux répartie dans le monde, la lumière du soleil.



Figure II.7 : Fonctionnement d'une installation photovoltaïque raccordée au réseau [42].

1/ Captage des rayons : Installés sur des toits ou sur le sol à proximité des habitations, les modules photovoltaïques captent la lumière du soleil.

2/ Production d'électricité : Sous l'effet de la lumière, le silicium, un matériau semiconducteur contenu dans chaque cellule, libère des électrons pour créer un courant électrique continu.

3/ Transformation du courant : Un onduleur transforme ce courant en courant alternatif.

4/ Utilisation de l'électricité : L'électricité est consommée par les appareils électriques.

Si l'installation n'est pas raccordée au réseau (site isolé), elle peut être stockée dans des batteries. Sinon, tout ou partie de la production peut être réinjectée dans le réseau. Lorsque la production photovoltaïque est insuffisante, le réseau fournit l'électricité nécessaire.

4.1.3. Les points forts du système photovoltaïque :

Les points forts du photovoltaïque sont [39]:

- De reposer sur des technologies microélectronique et couches minces, en conservant une bonne marge de progrès et d'innovations. Le photovoltaïque envahit progressivement certaines niches, en progressant en volume de plus de 30 % chaque année depuis 1999.
- De pouvoir s'intégrer un peu partout, pour fournir sur place de petites puissances (de 1 à 5000 W), domaines où aucune autre filière ne peut entrer en compétition avec le photovoltaïque.
- D'être un générateur simple et très fiable. Les modules sont garantis pendant 25 ans par la plupart des constructeurs. Ils ont une durée de vie bien supérieure, aucune pièce n'étant en mouvement. L'entretien concerne essentiellement la batterie. Ainsi la quasi-totalité des bouées et balises maritimes est passée au photovoltaïque. Contrairement à toutes les solutions utilisées auparavant (diesel, piles, éoliennes).
- De pouvoir s'intégrer facilement, sans gênes particulières (bruit, esthétique si certains progrès sont réalisés). Il se substitue notamment à des toits ou façades, comme élément de bâtiment en verre produisant de l'énergie.
- D'avoir un potentiel illimité. 5 % de la surface des déserts suffiraient pour alimenter la planète entière.
- Plus que le prix du kilowattheure, c'est le coût de la substitution à une autre solution qui est important. Le photovoltaïque se substitue à la création d'un réseau électrique et est moins cher en zone rurale que ce réseau. Il se substitue au toit classique, qui vient en diminution du coût.

4.1.4. Les points faibles du système photovoltaïque :

Le développement du photovoltaïque est rapide, mais représente encore peu de choses dans le bilan énergétique mondial. L'ensemble des modules existant produit autant d'énergie qu'une tranche nucléaire. Ce n'est notamment pas une solution significative pour répondre immédiatement aux enjeux nationaux actuels.

Le stockage est le maillon faible. La solution est d'allonger la durée de vie des batteries pour la rendre proche de celle des modules. Le temps de retour énergétique de la batterie est un autre point faible. Le module rembourse en 2 à 4 ans l'énergie dépensée pour sa fabrication, soit en 1/10 de la durée de vie. En revanche, le temps de retour des batteries est de 2 à 4 ans, soit équivalent sinon supérieur à la durée de vie de certaines batteries.

Le photovoltaïque est donc tributaire du développement d'équipements en courant continu à très faible consommation. Ce développement sera lent et est aujourd'hui à peine amorcé.

Les problèmes non techniques, l'adaptation aux usagers, les limites de fourniture d'énergie liées notamment à la météorologie, la modification des approches classiques bouleversent tellement les habitudes que seules des crises, pétrolières par exemple, accélèrent les adaptations nécessaires [39].

4.1.5. Modèle du générateur photovoltaïque :

Si A_{pv} exprimé en m^2 est la surface du module et I_r l'éclairement en W/m^2 , la puissance électrique générée par les panneaux photovoltaïques P_{pv} est donnée par [43]:

$$P_{pv} = \eta_r \times \eta_{pv} \times I_r \quad (II-3)$$

Avec :

η_{pv} : rendement global du module, il est donné par [44, 45] :

$$\eta_{pv} = \eta_r \times \eta_{pc} \times [1 - \beta_t(T_c - T_{NOCT})] \quad (II-4)$$

Cette formule considère les paramètres suivants :

η_r : rendement de référence du module photovoltaïque. Il est défini comme le rapport entre la puissance maximale produite et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur le module.

Il dépend de la technologie utilisée. Dans notre travail, nous avons choisi des modules polycristallins au silicium avec un rendement de l'ordre de 13%.

η_{pc} : facteur de dégradation.

Il tient compte du point de fonctionnement des modules qui est rarement optimal et qui peut être aggravé par la baisse des caractéristiques des modules ou de leur rendement dans le temps (vieillesse et dépôt de poussière).

Ici, η_{pc} sera égal à 0,9 .

β_t : coefficient de l'influence de la température des cellules photovoltaïques sur le rendement du générateur, allant de 0,004 à 0,006 par degré Celsius.

T_c : température des cellules (°C). Pour un module PV de cellules solaires en silicium polycristallin, il peut être estimé à partir de la température ambiante T_a [°C] et l'irradiation solaire I_r comme suit [45]:

$$T_c = 30 + 0,0175 \times (I_r - 300) + 1,14 \times (T_a - 25) \quad (\text{II-5})$$

TNOCT : température d'utilisation de la cellule (nominal operating Cell Temperature).

Elle est définie comme la température qu'atteint la cellule dans son module en circuit ouvert, sous un ensoleillement de 800W/m², avec une température ambiante de 25 degrés Celsius et un vent de 1m/s.

Les valeurs couramment rencontrées sont comprises entre 40 et 50 degrés Celsius.

Pour notre travail, après consultation des données techniques de différents panneaux en silicium polycristallin (tels que Astronergy CHSM 6610P-240 ou Trina Solar TSM-PA05), nous avons considéré une valeur typique de TNOCT égale à 45 degrés Celsius et une valeur typique de β_t de 0,0045 par degré Celsius.

A rappeler que l'irradiance I_r est considérée pour des panneaux fixes et avec une acquisition chaque 30 minute.

4.2.Énergie éolienne :

Le vent est expérimenté par l'homme depuis les temps anciens, bien avant que ce dernier n'ait vraiment compris sa source physique et ses lois fondamentales.

Les bateaux à voile, les cerfs-volants, les girouettes, les moulins à grains n'ont pas attendu les équations de Navier-Stokes ou les ordinateurs.

Il est donc une source d'énergie propre, renouvelable quasi instantanément, et quasi infini à l'échelle humaine et terrestre. Il doit ces caractéristiques à sa nature même, le vent naît de processus cycliques (rotation terrestre, convection chaud/froid, etc.) appliqués à l'atmosphère puis à l'air dans un contexte topographique défini. L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière. De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [46].

4.2.1. Fonctionnement d'une éolienne :

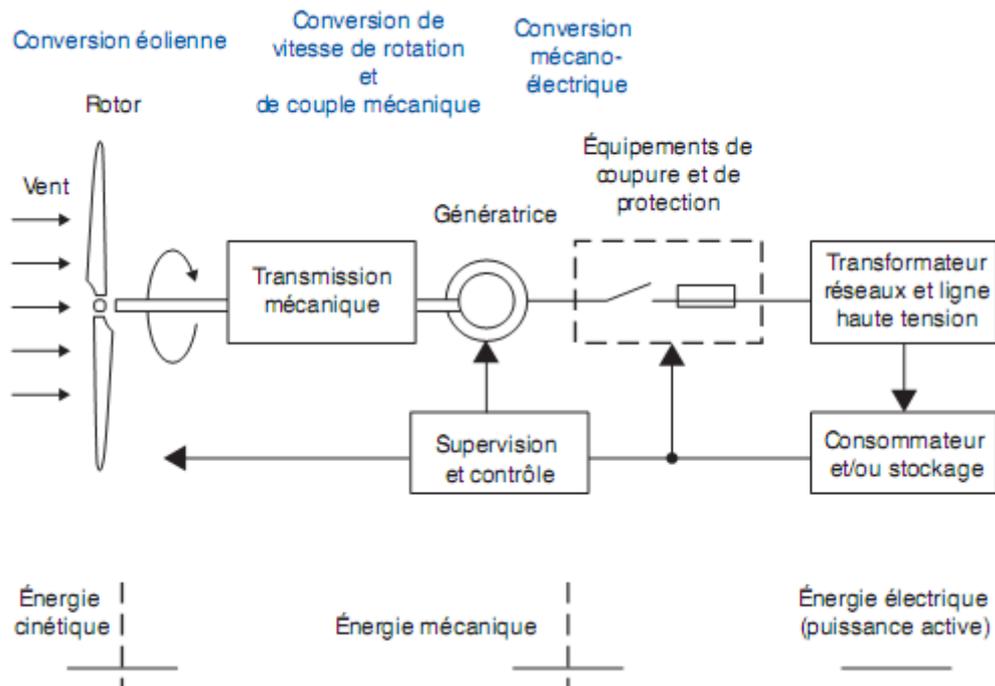


Figure II.8 : Schéma du fonctionnement d'une éolienne [46].

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Figure II.8).

Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments (nacelle, mât, pales et multiplicateur notamment) doivent être technologiquement avancés et sont par conséquent onéreux.

L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire ou fossile sans pour autant prétendre les remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores.

On distingue deux grands types d'éoliennes :

- **Les éoliennes à axe vertical** : Ce type d'éolienne (Figure II.9) a fait l'objet de nombreuses recherches. Il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance. En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être

entraînées au démarrage et le mat, souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal [46].



Type de Savonius



Type de Darrieus

Figure II.9 : Eoliennes à axe vertical [38].

- **Les éoliennes à axe horizontal** : Beaucoup plus largement employées (**Figure II-10**), même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales, elles présentent un rendement aérodynamique plus élevé, démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol.



Figure II.10 : Eoliennes à axe horizontal

Outre l'aspect visuel des éoliennes, leur impact sur l'environnement est réduit. Une éolienne ne couvre qu'un pourcentage très réduit de la surface totale du site sur laquelle elle est implantée, permettant alors à la plupart des sites de conserver leurs activités industrielles ou agricoles. Leurs nuisances sonores sont de plus relativement faibles. En effet, selon l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie de France), le niveau sonore d'une éolienne est de 50dB à 150 mètres et devient imperceptible au-delà de 400 mètres. Dans la plupart des cas, le bruit du vent est supérieur à celui engendré par l'éolienne. Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale [38]:

- Éoliennes de petite puissance : inférieure à 40 kW.
- Éoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW.
- Éoliennes de forte puissance : supérieure à 1 MW.

4.2.2. Principaux composants d'une éolienne :

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux :

- Le mât, généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en

œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur (exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW: diamètre de 90 m, mât de 80 m de hauteur).

- La nacelle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique, arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne.

- Le rotor, formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu, car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit. Les rotors à vitesse fixe sont souvent munis d'un système d'orientation de la pale permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Ce système allie ainsi simplicité et faible coût. Les rotors à vitesse variable sont souvent moins coûteux, car le dispositif d'orientation des pales est simplifié voire supprimé.

Toutefois, une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge est nécessaire. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites telle la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique) [41].

La **Figure II.10** montre les principaux composants d'une éolienne.



Figure II.11: Principaux composants d'une éolienne [47].

1/Tour : La tour a une fonction structurelle de soutien. Elle permet de placer l'ensemble de l'éolienne à la hauteur désirée et de supporter la masse du système.

2/Pales : Elles constituent ce que l'on appelle le rotor et se mettent en rotation sous l'effet du vent.

3/Arbre lent : Cette pièce fait le lien entre les pales (2) et la boîte d'engrenage (10). Il tourne à la même vitesse que les pales.

4/Arbre rapide : L'arbre rapide transmet la puissance de la boîte de vitesse (10) à l'alternateur (9).

Il tourne à la vitesse spécifique de l'alternateur (9) grâce à la modification obtenue par la boîte d'engrenage (10).

5/Nacelle : La nacelle est la boîte qui abrite l'ensemble des composantes en haut de la tour (1).

6/Anémomètre : Il mesure la vitesse du vent. Relié à un système de contrôle (10), il permet d'activer les mécanismes de freinage de l'éolienne afin de ralentir voire d'arrêter l'éolienne si les vents sont trop forts.

7/Girouette : Indique la direction du vent. L'information est transmise au système d'orientation (8) via un système de contrôle électronique (11).

8/Système d'orientation : Il permet d'orienter l'éolienne selon la direction du vent car il ne souffle pas toujours dans le même sens.

9/Alternateur : L'alternateur est composé de deux parties, un rotor et un stator. Le rotor (électroaimant mobile) est lié à l'arbre rapide et tourne à l'intérieur du stator (bobines de cuivre immobiles).

L'interaction magnétique entre le rotor et le stator de l'alternateur crée le courant électrique dans les bobines.

10/Boîte d'engrenage : La boîte d'engrenage ou boîte de vitesse est un système de transmission de puissance qui permet de réduire ou d'augmenter la vitesse de rotation d'un mécanisme. Dans le cas de la boîte de vitesse d'un aérogénérateur, on utilise généralement un système d'engrenages. Il s'agit de roues dentées de différents diamètres avec un nombre de dents différents.

4.2.3. La puissance des éoliennes :

Une éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor.

Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor, la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent.

La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site. La surface balayée par le rotor dépend directement de l'éolienne et de sa taille. Etant donné que la surface balayée par le rotor s'accroît avec le carré du diamètre du rotor, un doublement de celui-ci entraînera une récolte de $2^2 = 4$ quatre fois plus d'énergie.

La **Figure II.11** illustre l'évolution de la puissance unitaire des éoliennes en fonction du diamètre balayé (deux fois le rayon).

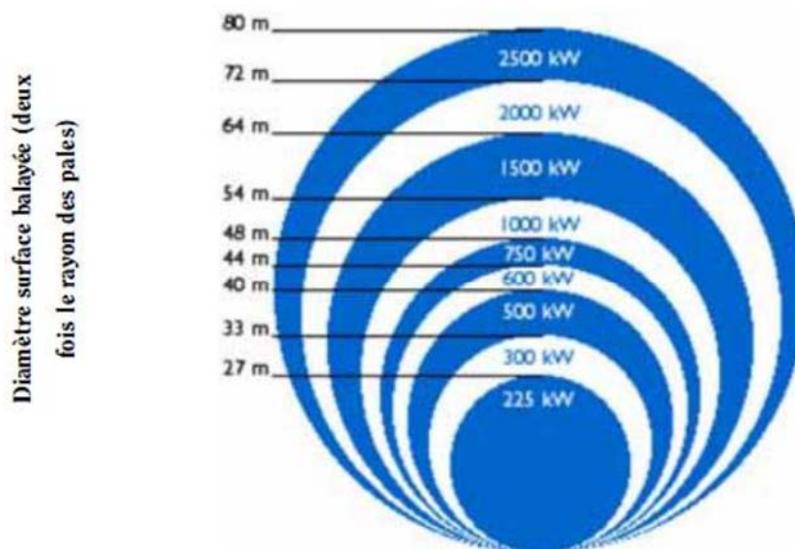


Figure II.12 : Evolution de la puissance des éoliennes avec la surface balayée [48].

Pour des éoliennes à axe horizontal, lorsque le diamètre de l'hélice varie de 1 à 66 m, la puissance varie de 300 W à 2,5 MW. Dans la plupart des cas, les pales sont fabriquées en matériaux composites (fibre de verre / résine polyester, fibre de carbone / résine époxy). La logique économique de l'éolien de grande puissance favorise le développement d'éoliennes de puissance unitaire de plus en plus importante. Au fur et à mesure de cette évolution, les constructeurs abandonnent la commercialisation des éoliennes de faible ou moyenne puissance. Pour les éoliennes à axe vertical commercialisées, la puissance varie de 60 W à 20 kW pour des dimensions maximales de l'ordre de 4,3 m de diamètre et 50 m de hauteur [48].

4.2.4. Systèmes éoliens raccordés au réseau :

La **Figure II.12** montre la production de l'électricité à l'échelle individuelle, en période de vent, l'éolienne charge la batterie et alimente la charge électrique via l'onduleur. Le surplus d'énergie électrique est injecté dans le réseau électrique via un compteur d'énergie. En période de faible vent, le réseau électrique prend le relais en fournissant l'énergie nécessaire à la charge électrique. En cas de panne du réseau, la batterie chargée sert d'alimentation de secours.



Figure II.13 : Production de l'électricité à l'échelle individuelle [49].

B. Éolienne **C.** Réseau électrique **m.** Moniteur de batterie **S.** Sectionneur **2.** Régulateur. **3.** Disjoncteur CC **4.** Batterie **5.** Onduleur **6.** Coffret de branchement **7.** Charge électrique. **8.** Compteur

La **Figure II.13** montre le fonctionnement d'une centrale éolienne.



Figure II.14 : Fonctionnement d'une centrale éolienne [50].

1/La rotation des pales : Sous l'effet du vent, l'hélice se met en marche.

2/La production de l'électricité : L'hélice entraîne un axe dans la nacelle relié à un alternateur. L'alternateur produit de l'électricité.

3/L'adaptation de la tension : Un transformateur situé à l'intérieur du mât élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur.

4.2.5. Modèle de l'éolienne :

Avec une approche globale, la puissance électrique générée par l'éolienne peut être formulée de façon proportionnelle par rapport à la surface balayée par son rotor (A_{wt}) comme suit [51]:

$$P_{wg} = C_p \times \eta_{gb} \times \eta_g \times \frac{1}{2} \times \rho \times A_{wt} \times V^3 = \eta_t \times \frac{1}{2} \times \rho \times A_{wt} \times V^3 \quad (\text{II-6})$$

ρ [Kg/m³] est la densité de l'air.

Les autres paramètres sont les suivants :

V [m/s]: vitesse du vent,

A_{wt} [m²] : surface balayée par le rotor de l'éolienne,

C_p : rendement de la turbine,

η_{gb} : rendement du variateur de vitesse,

η_g : rendement de la génératrice: Rendement global supposé égal à 30 % pour des éoliennes tri pales à axe horizontal [52].

Pour rendre l'équation (II.6) linéaire, ça suppose que le rendement des éoliennes soit semblable. Cette linéarisation est acceptable pour les petites éoliennes domestiques, avec des facteurs de puissance optimaux proches pour des surfaces balayées allant de 1 à 25 m².

La puissance nominale est supposée atteinte à la vitesse du vent 12 m/s et reste constante à partir de ce seuil. Cette considération ne fixe pas un type d'éoliennes et rend donc la méthode

d'optimisation proposée par la suite plus générale. Cependant, conscients des limites de cette supposition, ce sera la courbe réelle de puissance de l'éolienne qui sera utilisée pour toutes les phases d'évaluation.

4.3.Systèmes de stockage :

Le stockage d'énergie est souvent utilisé dans les petits systèmes hybrides afin de pouvoir alimenter la charge pour une durée relativement longue (des heures ou même des jours). Il est parfois aussi utilisé avec les SMS connectés à des grands réseaux de courant alternatif isolés. Dans ce cas, il est utilisé pour éliminer les fluctuations de puissance à court terme [53].

Le stockage d'énergie est généralement réalisé grâce aux batteries. Les batteries sont, d'habitude, du type plomb – acide. Les batteries nickel – cadmium sont rarement utilisées. Il y a d'autres formes de stockage, mais peu utilisées, comme le pompage de l'eau, les volants d'inertie et le stockage de l'hydrogène.

Dans le cas de stockage par pompage de l'eau, l'énergie produite sert à remplir un réservoir de stockage dont l'eau sera turbinée pour restituer l'énergie [53].

Le principe du volant d'inertie est simple. Il s'agit d'emmagasiner l'énergie en mettant en rotation une masse importante [54].

L'énergie cinétique obtenue peut être restituée à la demande sous forme d'énergie électrique, en utilisant une machine électrique en régime générateur. L'hydrogène alimente les piles à combustible.

Il possède un grand pouvoir énergétique gravimétrique (120 MJ/kg) en comparaison au pétrole (45 MJ/kg), au méthanol (20 MJ/kg) et au gaz naturel (50 MJ/kg). Cependant, il est aussi le gaz le plus léger. Ceci pose un véritable problème de stockage. La densité énergétique volumétrique de l'hydrogène n'est intéressante qu'à l'état liquide ou comprimé (700 bars).

Il existe de multiples modes de stockage de l'hydrogène : comprimé, liquéfié, hydrures métalliques, charbon actif, nanofibres et nanotubes en carbone etc. Si les deux premiers modes de stockage sont actuellement les plus utilisés, ils sont loin d'être satisfaisants.

4.3.1. Modèle du banc de stockage (banc de batteries) :

La modélisation de l'élément de stockage est importante dans la simulation des systèmes hybrides. D'une part, l'élaboration de son état de charge instantané (SOC : State Of Charge) permet l'optimisation de la gestion de l'énergie au sein du système.

D'autre part, l'évaluation de sa durée de vie facilite l'estimation du coût de ce dernier pendant la durée de vie du système.

Dans notre cas, l'accent est mis sur la technologie de stockage la plus répandue actuellement dans les applications stationnaires, c'est à dire la technologie électrochimique Plomb-Acide à plaques tubulaires et en particulier la technologie VRLA (Batterie à recombinaison de gaz).

Il existe dans la littérature trois principaux modèles de batteries [55].

Le premier, le modèle énergétique, le plus couramment utilisé, se concentre sur la modélisation de l'état de charge, qui est le paramètre le plus important dans le suivi des systèmes hybrides.

Le deuxième type est un modèle de tension qui estime la tension aux bornes de la batterie.

Il est utilisé dans la modélisation du système de gestion de la batterie et permet un calcul plus détaillé des pertes dans l'accumulateur.

Le troisième type de modèles est celui de vieillissement utilisé pour évaluer l'impact d'un régime d'exploitation particulier sur la durée de vie attendue de la batterie.

4.3.2. Modèle énergétique du banc de batteries, établissement de son état de charge :

La charge et la décharge de l'énergie stockée dans le banc de batteries dépendent de la différence entre la puissance produite par les sources renouvelables (P_{res}) et la charge consommée (P_{load}).

L'évolution de l'état de charge (SOC) de l'accumulateur à chaque instant t est déterminée par coulométrie.

Au cours de la charge, il est calculé comme suit :

$$SOC(t) = SOC(t - \Delta t) + (P_{pv}(t) \times \eta_{dc} + P_{wg}(t) \times \eta_{ac} - \frac{P_{load}(t)}{\eta_{wr} \times \eta_{inv}} \times \frac{\eta_{cha}}{U_{bus}}) \times \Delta t \quad (II-7)$$

Dans la phase de décharge, le SOC est donné par :

$$SOC(t) = SOC(t - \Delta t) + (P_{pv}(t) \times \eta_{dc} + P_{wg}(t) \times \eta_{ac} - \frac{P_{load}}{\eta_{wr} \times \eta_{inv}} \times \frac{1}{\eta_{dis} \times U_{bus}}) \times \Delta t \quad (II-8)$$

$P_{load}(t)$ est la puissance consommée par l'habitat résidentiel à l'instant t.

Δt est le pas de simulation, il est d'une demi-heure.

η_{dc} , η_{ac} et η_{inv} sont les rendements respectifs des convertisseurs DC/DC, AC/DC et DC/AC, ils sont tous égaux à 0,95[56].

η_{cha} et η_{dis} sont les rendements de la charge et de la décharge des batteries. Bien qu'elles soient critiquables, nous retenons les valeurs de la littérature [57][58] ($\eta_{cha} = 0,85$, $\eta_{dis} = 1$).

η_{wr} est introduit pour tenir compte des pertes dans les câbles et les connexions ($\eta_{wr} = 0,98$ [57]).

U_{bus} est la tension nominale du bus continu. Elle est choisie à 48V. C'est une valeur standard respectant les conditions de sécurité.

Afin de maîtriser la durée de vie des batteries, leur état de charge (SOC) est soumis aux contraintes suivantes :

$$C_n = \left(\frac{N_{bat}}{N_{bats}} \right) \times C_{bat} = N_{batp} \times C_{bat} \quad (II-9)$$

Où : C_{bat} : capacité d'une batterie élémentaire.

N_{bat} = nombre total de batteries.

N_{bats} = nombre total de batteries connectées en série dans chaque branche.

L'équation (II.10) présente comment calculer ce nombre à partir de la tension du bus continu.

U_{bus} et la tension nominale de chaque batterie V_{bat} (dans notre cas 12V) :

$$N_{bats} = \frac{U_{bus}}{V_{bat}} = \frac{48}{12} = 4 \quad (II-10)$$

SOC_{min} correspond à la limite inférieure que le banc de stockage ne doit pas dépasser lors de la décharge. Elle est déterminée de la manière suivante :

$$SOC_{min} = (1 - DOD_{max}) \times SOC_{max} \quad (II-11)$$

DOD_{max} étant la profondeur de décharge maximale admissible par les batteries. Elle dépend du type de batteries et de l'application.

Dans le cas des systèmes d'énergie autonomes en site isolé, la plupart des batteries utilisées sont de type Plomb-acide à cyclage profond (l'utilisation de la technologie VRLA s'est aujourd'hui généralisée et bien répandue) [59].

Une profondeur de décharge de 70% est tolérée [60].

4.4. Générateur diesel :

Dans le cas d'un système d'énergie renouvelable, la production d'énergie électrique est réalisée en fonction des ressources (vent, soleil...) et non de la demande. Dans le cas des installations autonomes, il est donc nécessaire de recourir au stockage ou d'ajouter un ou plusieurs groupes électrogènes diesels.

Dans un SMS, le générateur classique est généralement le moteur diesel directement couplé au générateur synchrone (**Figure II.14**).

La fréquence du courant alternatif à la sortie est maintenue par un gouverneur de vitesse sur le moteur diesel [61].

Le gouverneur fonctionne en ajustant le flux de carburant au diesel, pour garder la vitesse du moteur et la vitesse du générateur constantes. La fréquence du réseau est directement liée à la vitesse de rotation du générateur et elle est donc maintenue au niveau désiré.

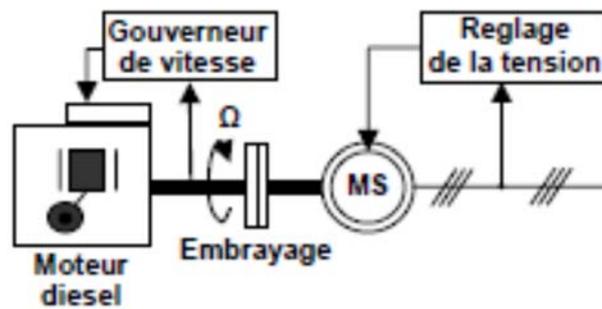


Figure II.15 : Configuration du générateur diesel

4.4.1. Moteur diesel et régulateur de vitesse :

Le générateur diesel est en général constitué d'un moteur diesel et d'un générateur synchrone. Le modèle dynamique complet du groupe électrogène diesel suppose la modélisation du moteur diesel avec la boucle de réglage de la vitesse et du générateur synchrone avec le système de réglage de la tension.

Les moteurs diesels sont les moteurs à combustion interne les plus efficaces [62].

La vitesse de rotation d'un tel moteur dépend de la quantité de carburant injecté et de la charge appliquée au vilebrequin du moteur. Le moteur diesel est un système non linéaire. Il présente des temps morts et des retards, ce qui rend difficile son contrôle. Les moteurs diesels sont munis d'un régulateur de vitesse : mécanique, électromécanique ou électronique. Celui-ci réalise le contrôle automatique de la vitesse du moteur diesel, en réglant l'injection de carburant en fonction de la charge. Il agit sur le mécanisme d'accélération, en fournissant le carburant sans variations abruptes et répond en finesse aux variations de charge.

De nombreux ouvrages proposent des modèles plus ou moins complexes du moteur diesel, en fonction de la disponibilité des données constructeurs [61][62].

Cependant, l'expérience et les mesures en exploitation ont montré que pour étudier la réponse du système face aux perturbations rapides de vitesse, il peut suffire d'utiliser un modèle simple [62].

Le diagramme bloc d'un moteur diesel simplifié et celui du régulateur de vitesse respectivement sont illustrés dans la **Figure II.15**.

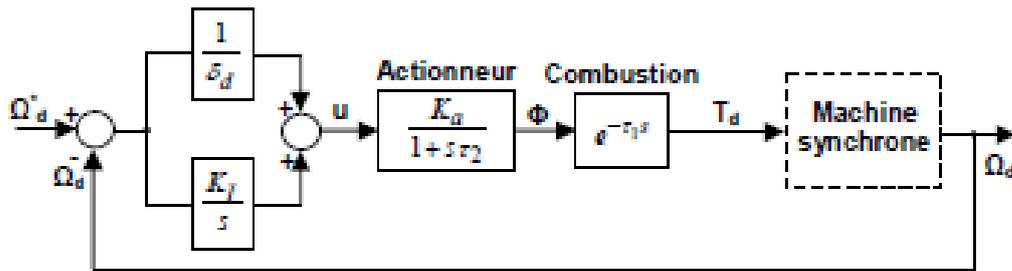


Figure II.16 : Bloc-diagramme d'un moteur diesel simplifié et du régulateur de vitesse

L'entrée du régulateur de vitesse est l'erreur de vitesse de rotation et la sortie est le signal de commande de l'actionneur. Les paramètres du régulateur de vitesse sont le statisme δ_d et le facteur intégrateur KI . L'objectif de l'intégrateur est d'éliminer l'erreur statique de la vitesse. La dynamique de fonctionnement de l'actionneur est approchée par un modèle du premier ordre avec le gain K_a , qui adapte la relation entre le couple et la consommation de carburant et une constante de temps τ_2 . Cette constante de temps dépend de la température du carburant. Les deux paramètres, K_a et τ_2 , sont variables, mais leur variation est négligeable pour des intervalles de temps courts [62][63].

Le bloc combustion inclut un retard qui représente le temps nécessaire pour que le moteur diesel réponde à une demande de modification du taux d'injection de carburant.

Ce temps mort τ_1 est le résultat de plusieurs cylindres qui ne sont pas tous dans la position permettant d'accepter plus de carburant à un instant donné. Le délai peut être exprimé comme étant le temps réel entre les arrivées consécutives des pistons au point d'injection plus approximativement un quart de tour du vilebrequin. Ainsi, le délai peut être approché par :

$$\tau_1 = \frac{60h}{2n_c\Omega_d} + \frac{60}{4\Omega_d} \quad (\text{II-12})$$

où $h=2$ ou 4 pour des moteurs à deux ou quatre-temps ; n_c est le nombre de cylindres et Ω_d est la vitesse de rotation en tours par minute.

Le couple produit par le moteur diesel, T_d , est une fonction du débit de carburant Φ . Dans le cas d'un réseau isolé ayant comme source principale le générateur diesel, celui-ci est chargé de fixer la fréquence du réseau et de garder l'amplitude de la tension constante. Pour le SMS étudié dans cette thèse, la fréquence et l'amplitude de la tension sont fixées par l'onduleur, ce qui permet au GD de fonctionner à puissance constante et d'être arrêté si nécessaire. Par conséquent, le modèle du moteur diesel se réduit à une constante qui fixe la puissance de la machine synchrone.

4.4.2. Modèle simplifié de la machine synchrone :

La puissance mécanique fournie en sortie du bloc « moteur diesel » est convertie en puissance électrique par un modèle simplifié de la machine synchrone (Voir modèle Matlab&Simulink). Les parties mécanique et électrique de la machine sont modélisées dans le même bloc.

Le rotor de la machine synchrone est constitué d'un enroulement parcouru par un courant d'excitation I_e continu créant un champ magnétique $2p$ polaire.

Il possède donc p paires de pôles.

Le même nombre de pôles se retrouve dans le stator. Ses enroulements sont le siège de courants alternatifs triphasés.

La liaison entre la pulsation ω_g du champ magnétique tournant et la vitesse de rotation est :

$$\Omega_s = \frac{\omega_g}{p} \quad (\text{II-13})$$

avec $\omega_g = 2\pi f$, où f est la fréquence des courants alternatifs en Hz.

Un enroulement de l'induit (stator) soumis au champ magnétique tournant de l'entrefer est le siège d'une force électromotrice $e(t)$ de valeur efficace E :

$$E = KN\Phi f = KN\Phi p n_s = K'\Phi n_s \quad (\text{II-14})$$

où : K : coefficient de Kapp (caractéristique de la machine)

N : nombre de conducteurs d'une phase de la machine (1 spire = 2 conducteurs)

Φ : flux maximum à travers un enroulement [Wb]

n_s : vitesse de rotation [rpm]

$K' = KNp$: constante globale (caractéristique de la machine)

Le modèle équivalent d'un enroulement du générateur synchrone est montré dans la **Figure II.16** :

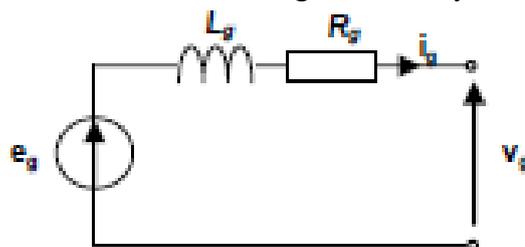


Figure II.17 : Modèle équivalent d'un enroulement

e_g : f.é.m. à vide [V]

V : tension aux bornes d'un enroulement de la machine [V]

R_g : résistance de l'enroulement [Ω]

L_g : inductance synchrone [H]

La loi des mailles pour le schéma présenté dans la **Figure II.16** avec les grandeurs instantanées est :

$$e_g = V_g + L_s \frac{di_s}{dt} + R_g i_g \quad (\text{II-15})$$

En triphasé, le stator comporte trois enroulements et donc trois forces électromotrices $e_{g1}(t)$, $e_{g2}(t)$ et $e_{g3}(t)$ de même valeur efficace E et déphasées de $2\pi/3$.

Dans le modèle simplifié de la machine synchrone, la partie mécanique sans frottement est décrite par l'équation :

$$J_{ds} \frac{d\Omega_s}{dt} = T_d - T_{em_g} \quad (\text{II-16})$$

où : J_{ds} est l'inertie totale de l'ensemble moteur diesel générateur synchrone ;

Ω_s est la vitesse de rotation ; T_d est le couple mécanique sur l'arbre ; T_{em_g} est le couple électromagnétique.

4.5. Convertisseurs :

Dans un SMS, des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le CC en CA et vice-versa. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les SMS : les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs. Les redresseurs réalisent la conversion CA/CC.

Dans le SMS, ils sont souvent utilisés pour charger des batteries à partir d'une source à CA.

Ce sont des appareils relativement simples, pas chers et à bon rendement. Les onduleurs convertissent le CC en CA.

Ils peuvent fonctionner en autonome pour alimenter des charges à CA ou en parallèle avec des sources à CA (voir sous-chapitre 3).

Les onduleurs sont autonomes lorsqu' ils imposent leur propre fréquence à la charge. L'onduleur non autonome exige la présence d'une source à CA pour fonctionner.

Il y a aussi des onduleurs qui peuvent assurer les deux régimes de fonctionnement : autonome ou en parallèle avec un autre générateur. Ceux-ci sont les plus flexibles, mais sont aussi les plus chers. Parfois, les fonctions de redresseur et d'onduleur sont réalisées par un seul appareil.

Les hacheurs, le troisième type de convertisseurs, permettent de réaliser la conversion CC/CC, par exemple, pour adapter la tension entre deux sources.

4.6.Charges

Les charges sont constituées par les éléments de consommation de chaque ménage (lampes, charge de batteries, ordinateurs, télévision et autres) et de ceux qui sont mises en commun (exemple l'éclairage public, la production d'eau et autres). Ces données sont envoyées vers le système de gestion et de pilotage [38].

Les charges électriques rendent utile la puissance électrique. Il existe des charges à caractère résistif et inductif. Les charges résistives incluent les ampoules à incandescence, les chauffe-eaux etc. Les appareils utilisant des machines électriques sont des charges résistives et inductives. Elles sont les principaux consommateurs de puissance réactive. Les charges à CC peuvent avoir aussi des composants inductifs, mais les seuls effets introduits par ceux-ci sont les variations transitoires de tension et courant pendant les changements dans le fonctionnement du système.

5. Conclusion :

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art sur les systèmes d'Energie renouvelable multi sources utilisés dans les sites isolés pour des besoins d'électrification. Ainsi, dans un premier temps, différentes configurations des SMS ont été illustrées : des configurations d'électrification autonomes purement renouvelables et des configurations renouvelables avec des sources conventionnelles ou fossiles. Les points faibles et les points forts de ces différentes configurations ont été clarifiés. Les sources renouvelables citées dans cet état de l'art sont des sources solaires et des sources éoliennes. La source fossile utilisée avec les sources renouvelables est un générateur diesel. L'hybridation entre les sources d'énergie permet d'exploiter la totalité des sources naturelles non polluantes d'une part, et d'améliorer les performances des systèmes d'électrification d'autre part.

CHAPITRE III :
Outils de dimensionnement des SMS
Energétiques- Etat de l'art

1. Introduction :

Au cours du chapitre précédent, nous avons pu donner une analyse sur les différentes composantes des SMS, nous avons ensuite établi les modèles de chaque composante.

Nous allons à priori passer à la phase d'optimisation du dimensionnement des systèmes énergétiques multi source, tout en tenant compte de la satisfaction des besoins en électricité, du coût de l'énergie pendant le cycle de vie du système, et du coût économique de l'ensemble du système.

Dans un premier temps, les méthodes de dimensionnement existantes vont être présentés ; Plusieurs approches seront passées en revue, allant d'une optimisation évaluant le coût économique à une évaluation économique et écologique multicritères, ensuite, un état de l'art sur les outils commerciaux de simulation disponibles sur le marché.

2. Méthodes et outils de dimensionnement des SMS énergétiques :

Etant donné le caractère intermittent et limité des sources renouvelables ainsi que la variation significative de la consommation électrique d'un habitat en fonction du moment de la journée et de la saison, la problématique du dimensionnement des systèmes hybrides éolien-photovoltaïques autonomes avec batteries est cruciale.

Depuis les années 90, plusieurs travaux [64], [65] se sont intéressés à cette problématique.

Les premières méthodes proposées (méthodes conventionnelles [66], [67]) tiennent leur justification de l'expérience et de la pratique. Elles se basent sur l'étude statistique des données de gisement de production (vitesse du vent, ensoleillement et température ambiante) et de profil de consommation.

Les nouvelles méthodes [68] sont plutôt basées sur des simulations dynamiques et ont abouti à la réalisation de différents outils logiciels de dimensionnement.

Dans ce qui suit, nous présentons les principales méthodes ainsi que les outils de dimensionnement rencontrés dans la littérature.

2.1. Les méthodes conventionnelles

Ces méthodes sont connues sous le nom de méthode « Ampère-heure » [69], elles consistent à déterminer le nombre de panneaux photovoltaïques nécessaire pour satisfaire la demande, puis peu à peu à réduire ce nombre, tout en calculant le pourcentage des besoins énergétiques annuels fournis par le générateur PV et ainsi à compléter le reste par l'énergie fournie par un générateur complémentaire.

En règle générale, ce dernier est un générateur diesel, cependant, on peut adapter la méthode pour une génératrice éolienne qui présente un impact écologique réduit.

La démarche proposée est la suivante :

1) Evaluation de la puissance à produire E_p pour satisfaire la demande :

On calcule l'énergie quotidienne nécessaire à produire en moyenne (E_p) afin de déduire les besoins pour chaque mois.

Cette énergie peut être exprimée en Wh ou en « Ah sous 48 V ». Elle est égale à l'énergie consommée par la charge (E_c) corrigée par un coefficient k pour bien assurer les besoins de l'habitat.

$$E_p = E_c / K \quad (\text{III-1})$$

Le coefficient k tient compte des facteurs suivants :

- Le rendement du convertisseur DC-AC (95%),
- Le rendement des cycles de charge et de décharge de la batterie (85%),
- Les pertes dans les câbles et connexions (2%).

2) Détermination de la capacité de stockage des batteries en cas d'insuffisance des sources renouvelables :

La capacité des batteries est donnée par la formule suivante [64]:

$$C_n = (E_p \times N) / (DOD \times f_t) \quad (\text{III-2})$$

avec :

C_n : Capacité nominale de la batterie en Ampère-heure (Ah),

E_p : Energie à produire par jour (Ah/J),

N : nombre de jours d'autonomie. Il est de 7 jours en moyenne en France dans le cas d'un système photovoltaïque seul, pour pallier les jours mal ou non ensoleillés. Cependant, dans le cas d'une installation hybride, 3 jours de stockage sont suffisants en cas d'absence de vent et/ou de soleil. De plus, cette période est suffisante en cas de maintenance sur les composants du système hybride PV-éolien.

DOD : Profondeur de décharge maximale admissible par les batteries (70% pour les batteries au plomb).

f_t : Facteur de réduction de température :

$$f_t = \frac{c}{c_\alpha} = 0,01035 \times T_\alpha + 0,0724 \quad (\text{III-3})$$

Où C est la capacité de la batterie à la température T_a (en °C) et C_a est la capacité de la batterie évaluée à 27°C [68].

La capacité à retenir correspond à la capacité nominale disponible sur le marché et qui respecte les résultats de calcul de la plupart des mois.

3) Calcul de la puissance crête nécessaire P_c du générateur photovoltaïque pour chaque mois (avec la moyenne des données quotidiennes sur un mois) :

Il se fait de la manière suivante :

$$P_c = \frac{E_p}{\eta_{pc} \times T_{sun}} \quad (\text{III-4})$$

avec :

E_p : énergie produite par jour (Wh/J),

T_{sun} : Temps équivalent avec pleine irradiation (heure par jour),

η_{pc} : facteur de dégradation (en général égal à 0,9).

3) Détermination du nombre de panneaux photovoltaïques nécessaire chaque mois.

Ce nombre se calcule de la manière suivante :

$$N = \frac{P_c}{\text{Puissance crête unitaire panneau}} \quad (\text{III-5})$$

4) Déduction du nombre de panneaux photovoltaïques pour couvrir les besoins énergétiques annuels :

Il faut calculer l'énergie annuelle produite pour chaque nombre de panneaux en fonction du calcul mensuel puis choisir le nombre à installer en tenant compte des critères suivants :

- Minimiser le coût économique sur cycle de vie,
- Assurer le pourcentage de production photovoltaïque souhaité en évitant un excès de production d'énergie trop important.
- Tenir compte de l'encombrement. Ainsi, il est préférable d'opter pour un nombre de panneaux dont la surface ne dépasse pas 10-15m² pour qu'ils s'intègrent à la toiture d'une majorité d'habitats résidentiels et que l'on puisse bénéficier des tarifs de rachat de l'électricité avec une puissance installée inférieure à 3 KW.

5) Calcul de la contribution en énergie de la part de la source complémentaire (éolienne) :

Ce stade, il faut s'assurer de la continuité de fourniture de l'énergie pour toutes les saisons et tous les jours.

μ_c est un critère important dans tout le processus de conception du système hybride.

L'énergie restant à couvrir par l'éolienne est évaluée selon la formule suivante :

$$KWh_{WT} = KWh_{Bat} \times \frac{1,2}{0,96} \quad (III-6)$$

Où

KWh_{wt} : est la production annuelle de l'éolienne en kWh/an,

KWh_{bat} - est la réserve en énergie des batteries en kWh en tenant compte de la contribution des panneaux photovoltaïques KWh_{pv} :

$$KWh_{Bat} = KWh_{total_demande} - KWh_{PV} \quad (III-7)$$

KWh total-demande étant les besoins énergétiques total de l'habitat sur un an.

- Les coefficients 1,2 et 0,95 correspondent respectivement au ratio de la tension de charge par rapport à la tension nominale de la batterie (en considérant un rendement de charge de la batterie de 0,85 et un rendement du chargeur de 0,95) et au rendement du convertisseur AC-DC mis entre la génératrice de l'éolienne et les batteries.

6) Dimensionnement de l'éolienne : Le dimensionnement de l'éolienne revient à chercher la surface A_{wt} balayée par le rotor qui assure le besoin énergétique pour soutenir la production photovoltaïque :

$$A_{wt} = \frac{KWh_{WT}}{0,3 \times P_{wind}} \quad (III-8)$$

0,3 étant le rendement global de la chaîne de conversion éolienne ($N_t=0,3$) et P_{wind} la densité d'énergie annuelle du vent exprimée en kWh/m²/an.

- Les étapes 5, 6 et 7 peuvent être répétées avec différents nombres de panneaux jusqu'à ce que l'on aboutisse au dimensionnement adéquat qui réponde à la plupart des critères exigés par le concepteur et décrits dans la procédure de l'étape 5.

2.2. Outils de dimensionnement [71]

La plupart des outils de dimensionnement utilisés sont développés sous forme d'interface graphique avec des champs pour introduire les données et les paramètres de fonctionnement, des champs pour tracer les courbes des grandeurs d'entrées et de sorties qui permettent de mesurer leurs évolutions. L'objectif de l'interface graphique est de simplifier la manipulation de l'outil de dimensionnement et de comprendre l'évolution des signaux nécessaires pour le dimensionnement.

Une compréhension approfondie de ses outils est essentielle, notamment, leurs caractéristiques, leurs avantages, leurs limites, les besoins des utilisateurs et leur choix pour les études de recherche.

Dans cette section, nous allons passer en revue les principales caractéristiques de 19 logiciels développés pour la conception de systèmes hybrides ; une analyse comparative sera discutée.

2.2.1. HOMER :

HOMER est de loin le logiciel le plus utilisé dans le domaine de la simulation et du dimensionnement de systèmes énergétiques multi sources, car convivial, disponible gratuitement et adapté pour effectuer une analyse de pré faisabilité, d'optimisation et de sensibilité rapide dans plusieurs configurations de SMS.

Le National Renewable Energy Laboratory (NREL) USA a développé HOMER pour les systèmes en réseau et hors réseau en 1993 ; Et depuis, HOMER a été téléchargé par plus de 80 000 personnes dans 193 pays [71].

HOMER utilise Windows comme plate-forme informatique avec Visual C++ comme langage de programmation. Le modèle anisotrope HDKR (Hay, Davies, Klucher et Reindl) pour système solaire photovoltaïque est utilisé par ce logiciel.

HOMER utilise des entrées telles que les diverses options technologiques, les coûts des composants, la disponibilité des ressources, les données du fabricant, etc. pour simuler différentes configurations de système et génère des résultats sous la forme d'une liste de configurations réalisables triées par coût actuel net. Ce logiciel peut simuler un système pendant 8760 h en un an.

HOMER affiche également les résultats de la simulation dans une grande variété de tableaux et de graphiques qui permettent de comparer les configurations et de les évaluer sur leurs optimalité économiques et techniques. Il permet également de déterminer la politique de dispatch des sources d'énergie la plus optimale permettant de satisfaire la demande de charge à moindre coût.

HOMER permet la conception de divers systèmes basés sur des paramètres économiques. Les résultats de simulation sous HOMER peuvent être exportés.

HOMER a été largement utilisé dans la littérature pour l'optimisation des systèmes d'énergie renouvelable hybride et diverses études de cas.

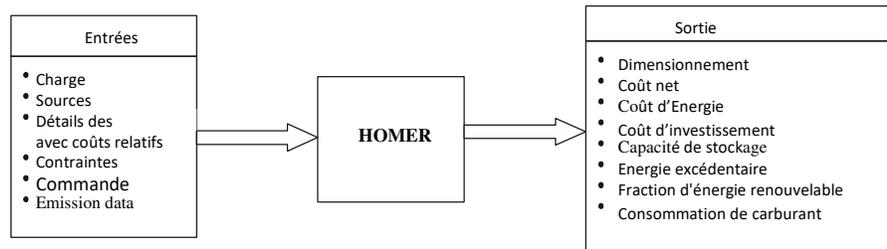


Figure.III.1. Schéma représentatif de HOMER

La **Figure III.1** donne une représentation schématique de HOMER. La dernière version mise à jour de HOMER est la 2.81. Les principales limites de HOMER sont les suivantes :

- HOMER n'autorise qu'une seule fonction d'objectif pour minimiser le coût actuel net (NPC) ; Les problèmes multi-objectifs ne peuvent pas être formulés. Après optimisation, HOMER génère un graphique des configurations de système optimisées basées sur NPC et ne classe pas les systèmes hybrides selon le coût de l'énergie pondéré.
- HOMER ne prend pas en compte la profondeur de décharge (DOD) du banc de batteries, qui joue un rôle important dans l'optimisation du système hybride, car la durée de vie et la taille du banc de batteries diminuent avec l'augmentation du DOD. Par conséquent, le DOD doit être optimisé ou être inclus dans les entrées de sensibilité du HOMER.
- HOMER ne tient pas compte de la variabilité intra-horaire.
- HOMER ne tient pas compte des variations de tension des bus.

L'intégration de la flexibilité dans la sélection de techniques d'optimisation pertinentes pour une étude particulière dans HOMER améliorera sa robustesse et facilitera l'étude comparative des résultats en utilisant différentes techniques [72].

2.2.2. HYBRID 2

HYBRID 2 est développé par le Renewable Energy Research Laboratory (RERL) de l'Université du Massachusetts, USA avec la collaboration du National Renewable Energy Laboratory [73], la version la plus récente étant la 1.3b, qui est téléchargeable et installable la version Windows XP.

Certaines modifications ont été apportées à la dernière version de HYBRID 2 et des problèmes tels que la fonction d'ajustement de courbe sur le graphique de données d'ensoleillement, l'erreur de débordement avec une simulation de faible charge, etc. ont été corrigés.

Ce logiciel est programmé sous Microsoft Visual BASIC et utilise une base de données Microsoft Access.

HYBRID 2 est un modèle informatique probabiliste / chronologique qui utilise des méthodes statistiques pour tenir compte des variations inter étapes, et peut fournir des performances détaillées à long terme, ainsi qu'une analyse économique et prédire les performances de divers systèmes hybrides.

HYBRID 2 propose des simulations de séries chronologiques pour des pas de temps généralement compris entre 10 min et 1 h.

HYBRID 2 prend en charge les systèmes basés sur trois bus contenant des éoliennes, un générateur photovoltaïque, du diesel, un stockage sur batterie, des convertisseurs de puissance et une charge de décharge. HYBRID 2 comprend principalement quatre parties, à savoir l'interface utilisateur graphique (GUI), le module de simulation, le module économique et l'interface de résultats graphiques (GRI). En utilisant l'interface graphique, on peut construire des projets facilement et maintenir une structure organisée. Les modules de simulation et d'économie permettent à l'utilisateur d'exécuter des simulations et de vérifier les erreurs d'entrée. Les utilisateurs peuvent afficher les détails des données de sortie graphique via GRI.

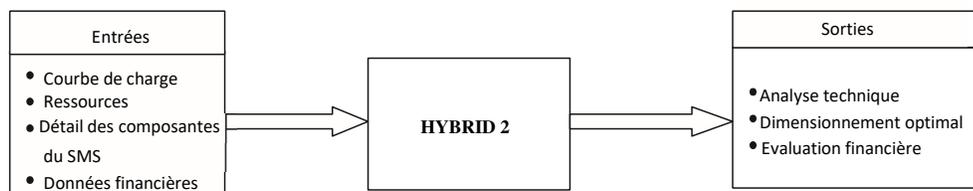


Figure.III.2. Schéma représentatif de HYBRID 2

La figure III.2 donne un diagramme schématique de HYBRID2. L'outil permet un accès limité aux paramètres, et un manque de flexibilité, cependant, il possède une bibliothèque avec divers fichiers de données et de ressources. Un mot de passe est nécessaire pour installer la version de démonstration de HYBRID 2 [74].

2.2.3. RETScreen

RETScreen est un logiciel téléchargeable gratuitement, développé par le ministère des Richesses naturelles du Canada [75], et qui permet d'évaluer les coûts et les avantages

financiers et environnementaux de différentes technologies d'énergie renouvelable pour n'importe quel endroit dans le monde.

Ce logiciel utilise le langage Visual Basic et C comme plate-forme de travail. La **Figure III.3** donne une représentation schématique du logiciel RETScreen.

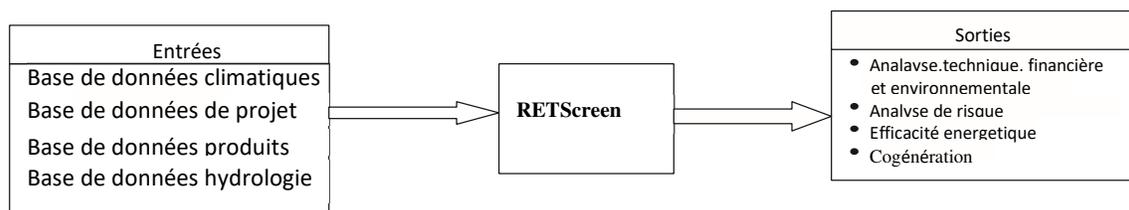


Figure.III.3. Schéma représentatif de RETScreen

RETScreen a été lancé en 1998 pour les applications en réseau. Le modèle PV RETScreen couvre également les applications photovoltaïques hors réseau et comprend également des systèmes autonomes, hybrides et de pompage d'eau.

Il possède une base de données mondiale sur les données climatiques de plus de 6 000 stations au sol (données d'irradiation solaire et de température mensuelles pour l'année), des cartes de ressources énergétiques (vents), des données hydrologiques, des données de produits comme les détails des panneaux solaires photovoltaïques et les courbes de puissance des éoliennes. Il fournit également un lien vers la base de données climatiques de la NASA.

Le programme est accessible dans plus de 30 langues et a deux versions distinctes, RETScreen 4 et RETScreen Plus.

RETScreen 4, est un outil d'analyse de projets énergétiques basé sur Microsoft Excel qui peut déterminer la viabilité technique et financière des projets d'énergie renouvelable, d'efficacité énergétique et de cogénération.

Il existe un certain nombre de feuilles de calcul pour effectuer une analyse détaillée du projet, y compris des feuilles de modélisation énergétique, d'analyse des coûts, d'analyse des émissions, d'analyse financière et de sensibilité et d'analyse des risques.

RETScreen est utilisé pour l'analyse de différents types de technologies écoénergétiques et renouvelables couvrant principalement la production d'énergie, les coûts du cycle de vie et la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

RETScreen Plus est un outil logiciel de gestion de l'énergie basé sur Windows pour étudier la performance énergétique. Ce programme nécessite Microsoft Excel 2000, Microsoft Windows 2000 et Microsoft.NET Framework 2.0 ou versions supérieures et il est également possible de travailler sur des ordinateurs Apple Macintosh à l'aide de Virtual Box pour Mac. Les principales limitations de RETScreen sont :

- Ne tient pas en compte des effets de la température pour l'analyse des performances des PV.
- Aucune option pour l'importation de fichiers de données chronologiques.
- Options limitées pour les fonctions de recherche, de récupération et de visualisation.
- Problème de partage de données.
- Ne prend pas en charge les calculs avancés.

2.2.4. iHOGA

iHOGA anciennement connue sous le nom de HOGA (Hybrid Optimization by Genetic Algorithm) est un outil d'optimisation des systèmes hybrides développé sous C++ par l'Université de Saragosse, Espagne [76].

iHOGA est utilisé pour le dimensionnement optimal d'un système d'énergie hybride qui peut inclure un système photovoltaïque, des éoliennes, des turbines hydroélectriques, des piles à combustible, des réservoirs H₂ et des électrolyseurs, des systèmes de stockage, ainsi que de systèmes de génération à base de combustibles fossiles, etc.

L'outil permet une optimisation multi ou mono-objectif à l'aide d'un algorithme génétique et d'analyse de sensibilité avec un temps de calcul faible.

iHOGA permet l'optimisation de la pente des panneaux photovoltaïques, le calcul des émissions du cycle de vie, l'analyse des probabilités, et intègre aussi l'option d'achat et de vente d'énergie au réseau électrique avec un système de mesure propre.

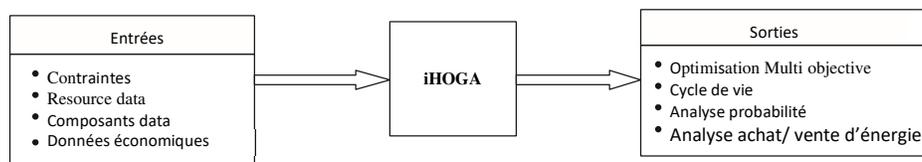


Figure.III.4 Schéma représentatif de iHOGA

La **Figure III.4** donne une représentation schématique générale de l'iHOGA. La nouvelle version iHOGA est mise à niveau et comprend les effets de dégradation, l'analyse de sensibilité, de nouvelles contraintes, la base de données de divers composants, la facilité de modification, etc. On distingue la disponibilité de deux versions, à savoir PRO+ et EDU.

PRO+ est une version payante qui peut être utilisée sans aucune limitation avec toutes les fonctionnalités et un support technique complet, tandis que la version EDU gratuite peut être utilisée à des fins de formation ou d'enseignement uniquement et n'est pas autorisée dans les projets, les travaux d'ingénierie, les travaux d'installation et pour tout travail impliquant des transactions économiques.

Les limitations de la version EDU sont :

- Il ne peut simuler que dans une charge quotidienne moyenne totale de 10 kWh.
- L'analyse de sensibilité n'est pas incluse.
- L'analyse de probabilité n'est pas incluse.
- L'option achat/vente d'Energie n'est pas incluse.

La dernière version d'iHOGA est 2.2 (novembre 2013) et ne peut fonctionner que sous Windows XP, Vista, 7 ou 8. Toutes les versions d'iHOGA nécessitent une connexion Internet pour obtenir la validité de la licence, sinon elle ne fonctionnera pas.

2.2.5. INSEL

INSEL (Integrated Simulation Environment Language) est un langage de modélisation graphique à usage général développé par l'Université d'Oldenburg, en Allemagne.

Ce logiciel de simulation a la flexibilité de créer des modèles de système et des configurations pour la planification et la surveillance des systèmes d'énergie électrique et thermique. Ce logiciel possède sa propre base de données de paramètres météorologiques de près de 2000 sites dans le monde, des systèmes photovoltaïques, des systèmes thermiques et d'autres appareils.

Les systèmes solaires thermiques peuvent également être simulé en utilisant INSEL. Le logiciel est en constante amélioration au cours des 2 dernières décennies.

2.2.6. TRNSYS

En 1975, l'Université du Wisconsin et l'Université du Colorado (États-Unis) ont développé conjointement un logiciel de simulation des systèmes énergétiques nommé Transient Energy

System Simulation Program (TRNSYS) [77]. TRNSYS a été initialement développé pour la simulation de systèmes thermiques, cependant, au cours des dernières années, ce logiciel a connu des améliorations et modifications dans ses fonctionnalités. Il prend en charge désormais la simulation des systèmes photovoltaïques, solaires thermiques et autres et est devenu un simulateur hybride.

Ce programme de simulation est développé pour la modélisation des flux d'énergie thermique à partir du code FORTRAN. Il s'agit d'un logiciel graphique extrêmement flexible utilisé pour simuler le comportement d'un système transitoire avec deux parties, ! l'une est le noyau et l'autre est la bibliothèque.

Le noyau traite le fichier d'entrée et résout le système avec diverses techniques, alors que la bibliothèque comprend divers modèles qui peuvent également être modifiés par l'utilisateur. TRNSYS ne fournit pas d'installations d'optimisation mais il effectue une simulation avec une grande précision avec des graphiques et d'autres détails.

TRNSYS est utilisé dans les systèmes solaires (systèmes solaires thermiques et photovoltaïques), les bâtiments basse consommation et les systèmes HVAC, les systèmes d'énergie renouvelable, la cogénération, les piles à combustible, etc.

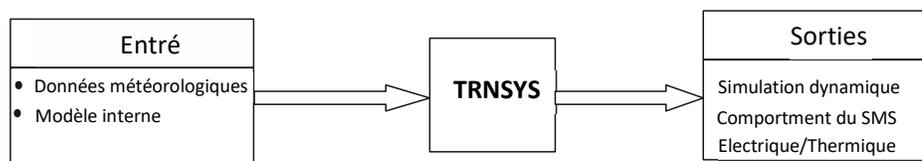


Figure.III.5. Schéma représentatif de TRNSYS

La **Figure III.5** montre une représentation schématique générale de l'architecture TRNSYS. La dernière version de TRNSYS est la 17.1 publiée en juin 2012, celle-ci étant disponible et payante.

2.2.7. iGRHYSO

iGRHYSO (Optimisation des systèmes hybrides renouvelables connectés au réseau) [78] est la version améliorée du GRHYSO, qui est développée en C++ pour l'optimisation des systèmes d'énergie renouvelable hybride connectés au réseau. Ce logiciel est disponible uniquement en espagnol.

iGRHYSO simule et optimise divers systèmes d'énergie renouvelable comme le photovoltaïque, l'éolien, les petites centrales hydroélectriques, etc. avec des batteries de stockage utilisant différentes technologies ou l'hydrogène. Le site Web de la NASA est connecté à ce logiciel qui est utile pour importer des données d'irradiation, de vent et de température.

Les effets de la température sur la génération et la production photovoltaïques par les éoliennes peuvent également être étudiés à l'aide de ce logiciel. Cet outil prend également en charge la simulation de vente / achat d'électricité à partir du réseau. Le TRI (taux de rendement interne) peut être calculé. Ce logiciel peut exporter des données de simulation au format tableur Excel.

2.2.8. HYBRIDS

HYBRIDS est une application de conception et d'évaluation des systèmes d'énergie renouvelable développée par Solaris Homes, et basée sur un tableur Microsoft Excel, l'outil est disponible dans le commerce.

HYBRIDS nécessite comme intrants la charge journalière moyenne et les données environnementales estimées pour chaque mois de l'année. Il ne peut simuler qu'une seule configuration à la fois et n'est pas conçu pour fournir une configuration optimisée.

L'utilisateur peut utiliser HYBRIDES afin d'améliorer ses compétences en conception de systèmes d'énergie renouvelable.

2.2.9. RAPSIM

En 1996, l'Institut de recherche énergétique de l'Université (MUERI), en Australie, a développé Remote Area Power SIMulator ou RAPSIM, un logiciel sur Windows pour la modélisation des systèmes hybrides. Le logiciel peut simuler les performances d'une gamme de systèmes énergétiques hybrides comprenant des panneaux photovoltaïques, des éoliennes et des générateurs diesel avec stockage de batterie.

Le rayonnement solaire, la vitesse du vent, la température ambiante, la charge du système, etc. sont les principaux intrants requis par RAPSIM. En 1997, la version 2 de ce logiciel était disponible, mais il n'est pas clair si des mises à jour après 1997 ont été apportées au logiciel [79].

2.2.10. SOMES

Modèle de simulation et d'optimisation pour les systèmes d'énergie renouvelable (SOMES) développé en 1987 à l'Université d'Utrecht, au Pays-Bas. Ce modèle peut simuler une base horaire avec une production moyenne d'électricité à partir des générateurs d'énergie renouvelable. Le modèle peut effectuer une tâche d'optimisation pour rechercher les coûts d'électricité les plus bas dans les limites des contraintes définies.

Ce modèle utilise des entrées comme les données météorologiques, la demande de charge, etc. pour obtenir les performances techniques et économiques d'une configuration de système particulière [80].

2.2.11. SOLSTOR

Le Sandia National Laboratory (SNL) a développé l'outil SOLSTOR -à la fin des années 1970 et au début des années 1980- pour l'optimisation et l'analyses économiques de divers systèmes hybrides [81].

Ce modèle comprend des composants d'énergie renouvelable tels que des panneaux photovoltaïques, des éoliennes, etc., des batteries de stockage et d'autres options de stockage d'énergie et un réseau électrique public ou un générateur à combustible peuvent également être utilisés comme fournisseur d'électricité de secours. Ce logiciel peut minimiser le coût du cycle de vie de l'énergie en choisissant la taille optimale des composants du système solaire ou éolien. SOLSTOR peut également définir les tarifs de l'électricité achetée sur le réseau, les frais énergétiques à l'heure et les changements de demande de pointe à l'heure et revendre au réseau l'excédent d'énergie collectée. Le modèle peut être exécuté avec des conditions sur réseau et hors réseau. Mais maintenant, ce modèle n'est plus utilisé et mis à jour.

2.2.12. HySim

HySim est un outil de simulation d'énergie hybride développé par le Sandia National Laboratory [71] en 1987 pour analyser un système hybride rural hors réseau avec PV, générateurs diesel et combinaison de stockage de batterie avec une bonne fiabilité du système. HySim effectue une analyse financière, y compris le cycle de vie, le carburant, le coût de l'énergie pondérée et les coûts d'exploitation et de maintenance, ainsi que des comparaisons de coûts entre différentes configurations.

HySim n'a pas été utilisé après 1996.

2.2.13. HybSim

HybSim développé par le laboratoire Sandia National, est un logiciel de simulation et d'analyse du coût d'installation d'un système hybride isolé comprenant une source de génération électrique à combustible fossile avec une source renouvelable [82].

Cet outil nécessite un profil de charge détaillé, les caractéristiques de la batterie, les détails économiques de l'ensemble du système et les caractéristiques météorologiques. HybSim peut utiliser des données mesurées sur des intervalles de 15 minutes.

La comparaison des coûts et la comparaison des performances de diverses combinaisons de composants du système peuvent être évaluées grâce à ce logiciel. HybSim version 1 (2005) est disponible et est en cours de développement.

2.2.14. IPSYS

Le Integrated Power System connu sous le nom d'IPSYS est un outil de modélisation et de simulation hybride pour les systèmes isolés, doté d'une bibliothèque de composants et capable de faire la simulation de la production d'électricité via des panneaux photovoltaïques, des éoliennes, des générateurs diesel, des batteries de stockage d'énergie, des réservoirs hydrauliques, des piles à combustible ainsi que de générateur à gaz naturel.

Le langage C++ est utilisé pour le développement de cet outil, cependant, aucune option d'interface graphique n'est disponible, mais certains scripts peuvent être utilisés pour analyser des résultats graphiques [83].

2.2.15. HySys

L'Hybrid Power System Balance Analyzer, également connu sous le nom de HySys est un outil de simulation hybride développé par le groupe de technologie éolienne, Centro de Investigaciones Energeticas, Medioambientalesy Technologicas (CIEMAT) Institute en Espagne.

Cet outil permet le dimensionnement et l'analyse à long terme des systèmes hybrides hors réseau comprenant principalement des panneaux photovoltaïques, des éoliennes et des générateurs diesel. En 2003, la version 1.0 de ce logiciel a été développée, mais elle n'est actuellement utilisée en interne du CIEMAT [84].

2.2.16. Dymola/Modelica

Dymola / Modelica est utilisé par l'Institut Fraunhofer pour l'énergie solaire (ISE) en Allemagne pour modéliser des systèmes hybrides composés de panneaux photovoltaïques, éoliennes, générateurs, piles à combustible et batteries de stockage.

Toutefois il est nécessaire de fournir les données météorologiques et d'insolation. Il peut évaluer les coûts du cycle de vie et calculer le coût pondéré d'énergie ; A priori, l'état de mise à jour de ce logiciel est inconnu [81].

2.2.17. ARES

Autonomous Renewable Energy Systems (ARES) est un programme développé à l'école d'ingénieurs de Cardiff, Université du Pays de Galles, Royaume-Uni pour la simulation de systèmes PV – éolien – batterie.

Ce logiciel est capable de calculer la probabilité de perte de charge et l'autonomie du système, et ce, grâce à la prédiction de la tension de la batterie de stockage sous réserve de fournir la charge d'entrée et le profil météorologique. Le logiciel existe en deux versions : ARES-I et une version modifiée appelée ARES-II [85].

ARES-I, est composé de sous-programme dans l'ordre suivant :

(1) statistiques météorologiques, (2) production photovoltaïque, (3) production éolienne, (4) calcul de la charge, (5) source et courant de charge combinés, (6) sous-programme tension de batterie, (7) action du contrôleur, et (8) présentation des résultats.

ARES-II requière comme entrées la charge et de profil météorologique de base, calcule la probabilité de perte de charge et l'autonomie du système à l'aide de la prévision de la tension de la batterie de stockage. Ce logiciel n'est pas disponible actuellement.

2.2.18. SOLSIM

L'université de sciences appliquées Fachhochschule Konstanz (Allemagne) a développé un outil techniquement sophistiqué et flexible nommé SOLSIM [71].

Cet outil permet la simulation des systèmes renouvelables hybrides composés de panneaux photovoltaïques, éoliennes, générateurs diesel, des batteries et des systèmes de bioénergie pour la production d'électricité et de chaleur, et peut effectuer une analyse économique avec des

options de contrôle très limitées (par exemple les angles d'inclinaison des panneaux photovoltaïques).

SOLSIM permet la saisie d'une grande quantité de données très spécifiques pour l'ajustement de la simulation. La grande quantité de données créées à partir de chaque simulation peut être affichée à des intervalles horaires, quotidiens, hebdomadaires ou mensuels ; l'outil dispose d'une interface utilisateur graphique qui rend le programme facile à apprendre et à utiliser [71]. Ce logiciel n'est pas disponible.

2.2.19. Hybrid Designer

Hybrid Designer [86] a été développé par le Centre de recherche sur l'énergie et le développement (EDRC) de l'Université du Cap en Afrique du Sud, et a été financé par le Département sud-africain des minéraux et de l'énergie.

Cet outil est principalement utilisé pour les applications hors réseau dans les conditions météorologiques de l'Afrique. Il s'agit d'un logiciel convivial basé sur un algorithme génétique qui peut évaluer différentes configurations avec un coût de cycle de vie minimal. Hybrid Designer peut simuler différentes sources telles que le photovoltaïque, l'éolienne, la batterie et un générateur Diesel ; Cet outil génère une solution complète avec des aspects techniques et des coûts de cycle de vie.

2.3. Etude comparative entre les outils des simulation présentés :

Les points les plus pertinents, y compris la dernière version disponible, la plate-forme de travail et le type d'analyse des 19 logiciels de simulation hybride sont présentés dans le tableau III.1.

Tableau.III.1. Principaux points forts de divers outils logiciels pour systèmes hybrides

Softwares	Développé par	Dernière version	Plateforme	Type d'analyse	Disponibilité
HOMER	NREL,USA (1993)	HOMER 2 Version 2.81 (Nov, 2010)	Windows, Visual C++	Analyse technique Analyse économique Analyse des émissions.	Gratuit www.homerenergy.com
HYBRID2	University of Massachusetts, USA and NREL (Hybrid1 in 1994, Hybrid 2 in 1996)	Version 1.3	Windows XP, Visual BASIC	Analyse technique Analyse économique	Gratuit http://www.ceere.org/rerl/rerl_hybridpower.html
RETScreen	Developed by Ministry of Natural Resources, Canada in 1998	RETScreen, RETScreen plus	Windows 2000, XP, Vista Excel, Visual Basic, C	Analyse financière, environnementale	Gratuit http://www.retscreen.net/
iHOGA	University of Zaragoza, Spain	Version 2.2 (Nov, 2013)	Windows XP, Vista,7 or 8, C++	Multi or mono objective optimization using genetic algorithm	version PRO payante, http://www.unizar.es/rdufo/i_hoga-eng.htm

INSEL	German University of Oldenburg (1986-1991)	-	Windows Fortran and C/C++	Planification, control des systèmes d'énergie électrique et thermique	Payant www.insel.eu
TRNSYS	University of Wisconsin and University of Colorado (1975)	Version 17.1	Windows Fortran code	Simuler le comportement transitoire d'un système	Payant http://www.trnsys.com/
iGRHYSO	University of Zaragoza, Spain	-	Windows C++	Analyse technique Analyse économique	Payant http://www.unizar.es/rdufo/grhyso.htm
HYBRIDS	Solaris Homes	-	Windows, logiciel basé sur une feuille de calcul	Analyse technique	Inconnu
RAPSIM	University Energy Research Institute Australia(1996)	Version 2 (1997)	Windows	Simule les performances d'une gamme de systèmes hybrides	Inconnu
SOMES	Utrecht University, Netherlands (1987)	-	Windows Turbo pascal	Analyse technique Analyse économique	http://www.uu.nl/EN/Pages/default.aspx
SOLSTOR	SNL (late 1970s and early 1980s)	-	Windows Fortran	Analyse technique	http://www.sandia.gov/
HySim	SNL (late 1980s)	-	-	Analyse financière	Inconnu
HybSim	SNL	-	-	Analyse cout de production	Inconnu
IPSYS	-	-	Windows, Linux	Modélisation ; simulation avec stratégies de gestion	Inconnu www.risoe.dtu.dk
HYSYS	Wind technology group(CIEMAT), Spain	Version 1.0 (2003)	-	Dimensionnement ; analyse à long terme des systèmes hybrides hors réseau	Inconnu
Dymola/modelica	Fraunhofer Institute for solar energy, Germany	-	Windows C++	Modélisation de systèmes hybrides ; évaluation financière	Inconnu
ARES	Cardiff school of engineering, University of Wales, UK	-	Windows	Analyse technique Analyse économique	Pas disponible
SOLSIM	Fachhochschule Konstanz (Germany)	-	Windows	Analyse technique Analyse économique	Pas disponible
Hybrid Designer	Energy and Development Research Centre (EDRC), University of Cape town SA	-	Windows	Analyse technique Analyse économique	Inconnu

Le tableau III.2 présente les caractéristiques principales de chaque outil, à savoir sa capacité d'analyse technique, économique ou financière, ainsi que le type de source d'Energie pris en charge.

Table.III.2 Capacités d'analyse des outils de simulation des systèmes hybrides

Outil	Analyse Economique	Analyse Technique	PV System	Wind System	Generator set	Stockage	Bio-energy	Hydro energy	Thermal System
HOMER	X	X	X	X	X	X	X	X	-
HYBRID2	-	X	X	X	X	X	-	-	X
iHOGA	X	X	X	X	X	X	-	X	-
RETScreen	X	X	X	X	-	X	-	-	-
HYBRIDS	-	X	X	-	-	X	-	-	-
SOMES	X	X	X	X	-	X	-	-	-
RAPSIM	-	X	X	X	X	X	-	-	-
SOLSIM	X	X	X	X	X	X	X	-	-
ARES-I &II	-	X	X	X	X	X	-	-	-
HYSYS	-	X	X	X	X	X	-	-	-
INSEL	-	X	X	X	X	X	-	-	X
SOLSIM	X	X	X	X	X	X	X	-	-
HybSim	X	X	X	-	X	X	-	-	-

Dymola/Modelica	X	–	X	X		X			
SOLSTOR	X	X	X	X	X	–	–	–	–
HySim	X	X	X	–	X	X	–	–	–
IPSYS	–	X	X	X	X	X	–	X	–
Hybrid Designer	X	–	X	X	X	X	–	–	–
TRNSYS	X	X	X	X	X	X	–	–	X
iGRHYSO	X	X	X	X	–	X	–	X	–

En dernier lieu, une analyse comparative des logiciels les plus utilisés pour la recherche sur les systèmes hybrides, accessible librement (gratuitement) est donnée dans le Tableau III.3.

Tableau III.3. Analyse comparative de outils accessibles gratuitement [71]

Outils	Avantages	Limites
HOMER	<ul style="list-style-type: none"> • Convivial • Facile à comprendre • Fournit des résultats sous forme de représentation graphique efficace • Capacité de traitement des données horaire 	<ul style="list-style-type: none"> • Code utilisé : boîte noire “Black Box” • Modèles basés sur des équations linéaires du premier degré • Les données de séries chronologiques sous forme de moyenne quotidienne ne peuvent être importées
RETScreen	<ul style="list-style-type: none"> • Base de données météorologique solide émanant de la NASA • L'analyse financier étant le principal point fort. • Facile à utiliser car il s'agit d'un logiciel basé sur EXCEL. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aucune option d'importation de données de série chronologique • Moins d'options de saisie de données • Options limitées pour les fonctions de recherche, de récupération et de visualisation.
HYBRID 2	<ul style="list-style-type: none"> • Convivial • Pris en charge de différents types de charge électrique • Gestion du dispatch 	<ul style="list-style-type: none"> • Ne fonctionne pas sur les plateformes Windows postérieures à Windows XP • A déjà fait l'objet de quelques erreurs de simulation.
HOGA	<ul style="list-style-type: none"> • Optimisation multi ou mono objectifs à l'aide des l'algorithme génétique et de l'analyse de sensibilité. • Temps de calcul faible. • Permet d'acheter et vendre de l'énergie au réseau électrique avec un système de mesure net disponible. 	<ul style="list-style-type: none"> • La version gratuite d'EDU présente certaines limites • Une connexion Internet est requise pour activer la licence

3. Conclusion :

En somme, les logiciels que nous venons de présenter permettent d'optimiser la conception de systèmes multi-sources et en particulier les systèmes hybrides éolien-photovoltaïque avec batteries.

Les optimisations sont faites par la variation de la combinaison des composants. En fait, la plupart de ces outils servent à simuler un système donné prédéfini par l'utilisateur et sont plutôt dédiés à évaluer une certaine configuration du système et à visualiser manuellement l'effet d'un changement dans ses paramètres.

HOMER s'avère être l'outil le plus largement utilisé dans les études de recherche à travers le monde, suivies par RETSCREEN, HOGA, HYBRID2, TRNSYS et ARES.

La performance des logiciels dédiés à la conception de systèmes d'énergie hybrides peut être améliorée grâce à la mise en œuvre de diverses méthodes de contrôle, et de gestion du dispatch de l'énergie entre les différentes sources du SMS.

CHAPITRE IV :
Optimisation de la gestion des SMS
Energétiques

1. Introduction :

Dans le chapitre précédent, un état de l'art sur les outils de simulation des systèmes énergétiques multi source a été présenté.

En dépit des avantages que présentent ces outils graphiques, notamment en matière d'optimisation du dimensionnement des centrales hybrides renouvelables sur des horizons de plusieurs années, ceci dit, la plupart de ces outils ne prennent pas en charge la gestion de l'énergie produite par les différentes sources d'une manière optimale ; les deux seuls outils capables d'assurer cette fonctionnalité (à savoir HOMER et HYBRID2) se présentent sous forme de boîte noire, ils s'agit d'outils bridés, ou le code source n'est ni accessible ni modifiable.

Autre point faible de ses outils commerciaux, étant le fait que ceux-ci ne peuvent rester optimaux tout au long du cycle de vie du SMS énergétique, autrement dit, ces outils ne tiennent pas compte de l'évolution inévitable du nombre de ménages (généralement en augmentation), de l'évolution des profils de consommation et à la possible dégradation d'une partie du SMS.

D'où la nécessité de jumeler ces outils de dimensionnement à une stratégie de gestion de dispatch de puissance des différentes sources du SMS, ce qui assurera un fonctionnement optimal du SMS tout au long de son cycle de vie.

Ce chapitre est consacré à la formulation de la problématique inscrite dans le cadre de la minimisation du coût d'Énergie produite par les différentes source su système énergétique hybride.

Plusieurs méthodes d'optimisations seront présentées ; l'algorithme le mieux adapté à notre contexte sera retenu pour résoudre la problématique.

2. Optimisation de la gestion des SMS énergétiques :

L'objectif principal de notre travail consiste à élaborer une stratégie optimale de gestion de la puissance délivrée par les ressources énergétiques du SMS, afin de la coupler à un outil de dimensionnement et ainsi améliorer les performances globales du SMS.

Cette stratégie permettra une répartition optimale de la puissance entre les différents éléments constituant le SMS, de manière à :

- Assurer tout au long du cycle de vie du SMS le besoin de la charge en énergie électrique dans des régions isolées (continuité de service), et ce en dépit des fortes variations de l'énergie produite.
- Réduire l'utilisation des éléments de stockage au minimum.
- Réduire la consommation de carburant de la source non renouvelable.
- Prolonger la durée de vie du SMS énergétique.

2.1. Formulation du problème d'optimisation :

Notre objectif est de définir la meilleure stratégie de distribution possible entre les sources du SMS afin de satisfaire les besoins en énergie de la charge, et ce, avec un impact économique (minimisation du cout d'Énergie) et /ou environnemental (minimisation de la consommation du carburant).

D'où la fonction objectif peut être traitée comme un problème mono-objectif (économique, notre cas d'étude) ou multi-objectifs (économique, et environnemental).

- Fonction Objectif(Optimum) :
- Minimum \longrightarrow $Cout [Cout (pv)+Cout(Wt) + \dots]$ (IV-1)
- Sous réserve de la restriction imposée par le critère de satisfaction énergétique

$$P_{pv} + P_{wt} + \dots = P_{charge} \tag{IV-2}$$

En prenant compte des contraintes de faisabilité :

- Limite de production :
- $$P_{pv} \leq P_{pv-max} \tag{IV-3}$$

$$P_{wt} \leq P_{wt-max} \tag{IV-4}$$

$$P_{Gd} \leq P_{Gd-max} \tag{IV-5}$$

.
.

.

- Limites de l'état de charge de la batterie
- $$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \tag{IV-6}$$

2.2. Description de la procédure d'optimisation

- **Principe :**

Nous présentons dans ce qui suit le principe de la procédure qui a été mise en place pour réaliser l'optimisation de la gestion de distribution entre les différentes sources du SMS énergétique.

Les données à fournir sont :

- Les données nécessaires à la simulation du système hybride :
- Les paramètres des modèles ($\eta_{dc/dc}$, $\eta_{ac/dc}$, η_{inv} , η_{cha} , η_{dis} et η_{wr}),
- Les données de la vitesse du vent, de l'irradiance et du profil de consommation (par an, mois, jours, heure...)
- Les paramètres de coûts (économique et énergétique),
- Les conditions limites et initiales (temps de simulation, SOC_{min} , SOC_{max} et SOC_{ini}).
- Les données nécessaires à la méthode d'optimisation :
- Les paramètres à optimiser,
- L'(es) objectif(s) recherché(s),
- Les contraintes (restriction imposée par le critère de satisfaction énergétique et contraintes de faisabilité).
- Les conditions d'arrêt.
- Un point de départ pour la procédure (jeu de paramètres initiaux).

3. Choix de la méthode d'optimisation :

Le problème d'optimisation de la gestion d'un système hybride multi-sources est un problème d'optimisation continue non linéaire multi variables sous contraintes.

En effet, les fonctions objectif sont polynomiales.

Il est nécessaire d'utiliser la simulation dynamique pour calculer aussi précisément que possible les différentes valeurs de sortie.

Pour cette raison, une méthode basée sur de la programmation informatique (mathématique déterministe ou non) doit être utilisée pour l'optimisation.

Nombreuses sont les méthodes d'optimisation. On peut cependant les classer en deux grandes catégories : les méthodes déterministes et les méthodes stochastiques. Dans la première classe, on rencontre toutes les méthodes qui cherchent le minimum d'une fonction en se basant sur la connaissance d'une direction de recherche, souvent donnée par le gradient de cette fonction. Dans le cas d'optima multiples, elles s'arrêtent sur le premier rencontré. Les méthodes stochastiques sont une alternative pour pallier cet inconvénient.

Les trois méthodes stochastiques les plus répandues sont les algorithmes génétiques, le recuit simulé et la Aissam particuliers.

Elles sont capables de trouver le minimum global d'une fonction même dans des cas très difficiles, mais le temps de calcul peut être élevé. Ceci est particulièrement pénalisant lorsque le calcul de la performance de chaque nouvelle solution proposée par le processus aléatoire nécessite la résolution d'un modèle éléments finis.

3.1. Classification des méthodes d'optimisation :

Les méthodes d'optimisations sont classées, selon le mode de recherche de l'optimum, en deux grands groupes : les méthodes déterministes et les méthodes stochastiques.

3.1.1. Méthodes déterministes :

Ces méthodes peuvent être subdivisées en plusieurs sous classes, les méthodes heuristiques, les méthodes statistiques, les méthodes Branch&Bound, les méthodes mathématiques, et les méthodes d'apprentissage automatique, classification est illustrée sur **Figure VI.1**.

➤ Les méthodes utilisant les plans d'expériences

Récemment, les développements se sont concentrés sur la mise au point de stratégies d'optimisation utilisant une suite de plans d'expériences. Des méthodes déterministes d'ordre zéro et globales ont été proposées [90]. Ces méthodes sont bien adaptées aux problèmes électrotechniques et n'entrent pas dans le cadre de ce travail. Elles sont habituellement employées lorsque le nombre de paramètres est faible, en tous cas inférieur à 10 [91].

➤ Les méthodes Branch&Bound

Elles s'appuient sur l'algèbre de Moore ou algèbre des intervalles qui permet d'estimer l'intervalle de variation d'une fonction à partir de son expression analytique et des intervalles de variation des paramètres [92]. Elles sont déterministes d'ordre zéro et globales mais ne s'appliquent que pour des modèles analytiques. Les plus évoluées sont capables de localiser tous les optima de la fonction avec une certaine précision liée à la taille des subdivisions de l'espace et aux incertitudes d'estimation des intervalles de variation de la fonction objectif. Elles sont généralement coûteuses en temps de calcul et ne peuvent s'appliquer que pour un nombre réduit de paramètres.

➤ Les méthodes heuristiques ou méthodes géométriques

Elles explorent l'espace par essais successifs en recherchant les directions les plus favorables. La stratégie de Hooke et Jeeves, la méthode de Rosenbrock, ou la méthode du Simplex sont les plus souvent employées. Toutes ces techniques sont déterministes et locales mais elles sont

beaucoup plus robustes que les méthodes mathématiques, en particulier lorsque la fonction objectif est discontinue. Par contre, elles deviennent moins robustes lorsque le nombre de paramètres est élevé [93].

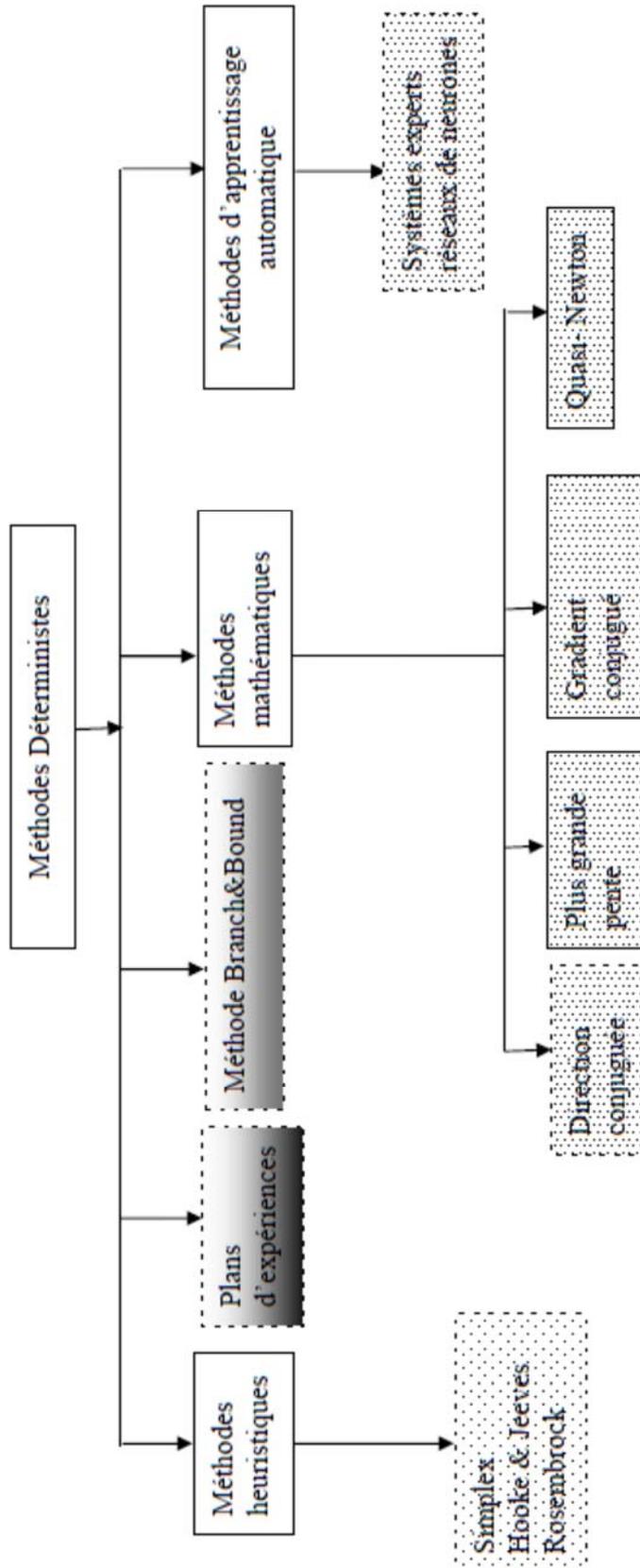


Figure IV.1 Méthodes d'optimisation déterministes

➤ Méthodes mathématiques

Pour déterminer un optimum, les méthodes mathématiques se basent sur la connaissance d'une direction de recherche donnée souvent par le gradient de la fonction objectif par rapport aux paramètres. Elles génèrent une suite de points qui convergent vers un minimum local de la fonction *objectif*.

L'inconvénient principal des méthodes à base de gradient est que la dérivée de la fonction *objectif* n'est pas toujours connue, dans ce cas, il faut l'estimer par différences finies.

Dans ces conditions le choix du pas du gradient est très important, il conditionne la bonne détermination de la direction de recherche.

Les exemples les plus significatifs des méthodes mathématiques sont la méthode de Cauchy ou méthode de la plus grande pente et la méthode du gradient conjugué qui sont d'ordre un [93].

D'autres techniques de gradient construisent une estimation du Hessien c'est-à-dire des dérivées secondes comme les méthodes dites quasi-Newton [93].

Parmi ces méthodes, la méthode du gradient conjugué, la méthode quasi-Newton, la méthode SQP et la méthode de Powell sont présentées brièvement. Elles sont comparées par la suite avec les méthodes stochastiques.

- La méthode de gradient conjugué

La méthode de gradient conjugué est une variante améliorée de la méthode de la plus grande pente, qui consiste à suivre la direction opposée au gradient. Cette méthode a l'inconvénient de créer des directions de recherche orthogonales, ce qui ralentit la convergence de l'algorithme. La méthode de Fletcher et Reeves [93] résout ce problème en déterminant la nouvelle direction de recherche à partir du gradient aux pas courant et précédent.

- Méthode quasi-Newton

Les méthodes quasi-Newton consistent à imiter la méthode de Newton où l'optimisation d'une fonction est obtenue à partir de minimisations successives de son approximation au second ordre. Elles ne calculent pas le Hessien mais elles utilisent une approximation définie positive du Hessien qui peut être obtenue soit par l'expression proposée par Davidon-Fletcher-Powell (DFP) [94], soit par celle proposée par Broyden-Fletcher- Goldfard-Shanno (BFGS) [94].

- Méthode SQP

La méthode de programmation quadratique séquentielle (SQP), développée par Schittkowski en 1983 [93], est une méthode de programmation non-linéaire. Elle a été reconnue comme étant une des méthodes les plus efficaces pour résoudre des problèmes d'optimisation avec contraintes de taille petite et moyenne. Comme son nom le suggère, la méthode SQP trouve la

solution optimale par une séquence de problèmes de programmation quadratique. A chaque itération, une approximation quadratique de la fonction objectif et des approximations linéaires des contraintes sont utilisées. Le Hessien est construit par la méthode BFGS. Une analyse canonique fournit le minimum de la fonction Lagrangienne et un déplacement est fait vers ce point.

- **La méthode des directions conjuguées de Powell**

Lorsqu'il n'est pas possible de calculer le gradient, la méthode de direction conjuguée propose de trouver l'optimum uniquement par des recherches linéaires [95]. Elle effectue n recherches linéaires successives suivant des directions conjuguées qui sont modifiées à chaque itération pour accélérer la convergence.

Ces méthodes convergent rapidement et précisément vers l'optimum si celui-ci est proche du point initial.

Si ces méthodes sont intéressantes en raison de leur grande rapidité de convergence, elles ont plusieurs inconvénients :

1. les valeurs de la fonction objectif et éventuellement de ses dérivées doivent être accessibles.
2. lorsque le gradient de la fonction n'est pas calculable directement, sa détermination par la méthode des différences finies est toujours délicate à cause de problèmes liés au choix du pas de variation pouvant conduire à des problèmes de convergence [96].
3. ces méthodes nécessitent la résolution de systèmes matriciels pouvant être mal conditionnés [94].
4. la convergence est exclusivement locale. L'optimum trouvé dépend du point initial. La sensibilité par rapport aux conditions initiales est importante.

3.1.2. Méthodes stochastiques :

Les méthodes d'optimisation stochastiques s'appuient sur des mécanismes de transition probabilistes et aléatoires. Cette caractéristique indique que plusieurs exécutions successives de ces méthodes peuvent conduire à des résultats différents pour une même configuration initiale d'un problème d'optimisation. Ces méthodes ont une grande capacité à trouver l'optimum global du problème. Contrairement à la plupart des méthodes déterministes, elles ne nécessitent ni point de départ, ni la connaissance du gradient de la fonction objectif pour atteindre la solution optimale.

Elles sont d'ordre zéro. Cependant, elles demandent un nombre important d'évaluations de la fonction objectif.

Parmi ces méthodes stochastiques, les méthodes Monte-carlo et les méthodes évolutionnistes seront présentés brièvement.

➤ **Monte-Carlo :**

C'est la plus simple des méthodes stochastiques [97]. Elle consiste à tirer une solution au hasard à chaque itération.

La fonction objectif est évaluée en ce point. Si elle est meilleure que l'optimum courant, cette valeur est enregistrée, ainsi que la solution correspondante et le processus continue jusqu'à ce que les conditions d'arrêt soient vérifiées. Il s'agit donc d'un processus d'exploration. Les méthodes Monte-Carlo peuvent être utilisées, en première approche, pour avoir des renseignements utiles sur la forme de la fonction. Elles permettent par exemple de choisir de façon plus appropriée le point de départ d'un algorithme de recherche locale. Toutefois, cette association ne garantit pas la localisation de l'optimum global.

➤ **Méthodes évolutionnistes (Algorithmes génétiques) :**

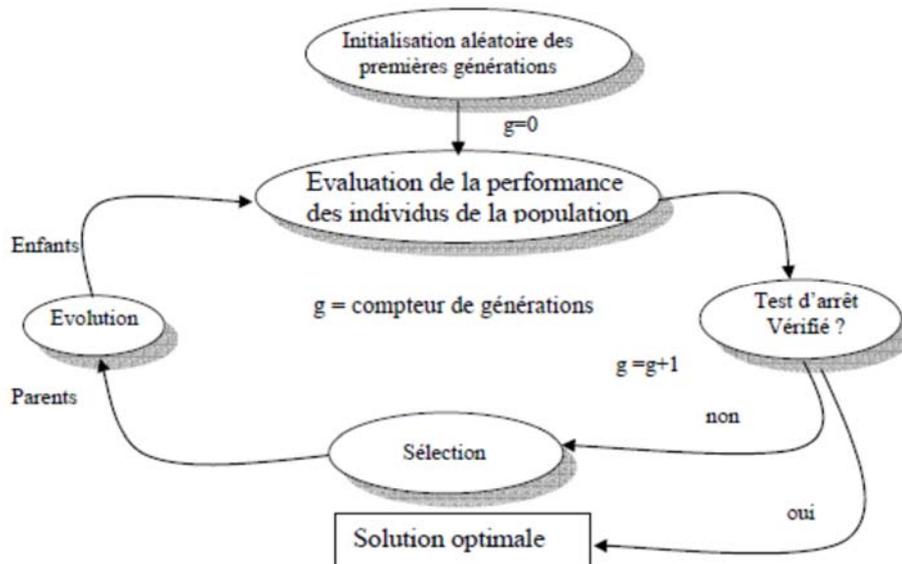


Figure. IV.2. Principe d'une méthode évolutionniste

Les méthodes évolutionnistes font partie de la dernière grande classe de méthodes stochastiques. Elles reposent sur une analogie avec la théorie de l'évolution naturelle des espèces de Darwin selon laquelle, les individus les mieux adaptés à leur environnement survivent et peuvent se reproduire pour donner des enfants encore mieux adaptés de génération en génération [98].

Contrairement aux techniques d'optimisation qui explorent l'espace à partir d'un point unique, les méthodes évolutionnistes partent d'un ensemble de configurations, c'est à dire d'une population d'individus, et la font évoluer à partir d'opérateurs à transition aléatoire, la sélection et l'évolution, selon le principe de la **Figure VI.2**.

3.2.Evaluation des méthodes et critères de choix (Cas d'une optimisation mono-objectif) :

Dans le cas de figure de notre problématique, nous cherchons à résoudre un problème de minimisation non linéaire sous contrainte non linéaire.

Le problème est décrit par la formulation **VI.1**.

3.2.1. La fiabilité ou convergence globale :

C'est-à-dire la capacité à déterminer un optimum global parmi plusieurs optimums locaux. D'une manière générale, la fiabilité d'une méthode dépendra de la forme de la fonction « objectif ». Rends [99] propose ainsi de choisir la méthode d'optimisation selon le relief de la fonction à optimiser.

La convergence des méthodes d'optimisation par programmation mathématique vers un optimum global est soumise à des conditions très restrictives sur la fonction et les contraintes. Ces méthodes seront plus performantes pour une fonction « objectif » linéaire, quadratique, unimodale (un seul optimum) ou multimodale simple. Répéter l'optimisation en utilisant plusieurs points initiaux permet d'améliorer la fiabilité dans les autres cas.

Les méthodes aléatoires présentent dans tous les cas une très bonne fiabilité.

L'algorithme de « recuit » simulé (méthode empirique provenant d'un processus utilisé en métallurgie) est particulièrement adapté pour des fonctions présentant un grand nombre d'optimums locaux (fonctions unimodales bruitées) car les solutions intermédiaires sont autorisées.

Les algorithmes génétiques sont particulièrement performants pour l'optimisation des fonctions qui présentent de nombreux optimums locaux non disposés de manière aléatoire et contenant donc une information sur la position des autres optimums. Enfin, les méthodes de recherche totalement aléatoire seront seules, fiables pour des fonctions multimodales sans structure (position des extremums locaux totalement aléatoire).

3.2.2. La vitesse de convergence locale :

Les méthodes de programmation mathématique présentant la vitesse de convergence locale la plus élevée, sont des méthodes du second ordre (convergence super-linéaire ou quadratique).

L'utilisation de ces méthodes pourra donc réduire le nombre d'itérations, si l'on se trouve initialement suffisamment proche de l'optimum.

La convergence des méthodes aléatoires et évolutionnaires est en général beaucoup moins bonne et ces méthodes nécessitent un très grand nombre d'évaluations de la fonction objectif. Elles seront donc pénalisantes si le calcul de la fonction objectif est long.

3.2.3. La précision :

D'une manière générale, les méthodes aléatoires sont beaucoup moins précises que les méthodes de programmation pour un même nombre d'évaluations de la fonction. Elles seront donc à éviter si l'on souhaite une grande précision des résultats.

3.2.4. La mise en œuvre :

La mise en œuvre des méthodes aléatoires est bien entendue plus facile puisque l'optimisation ne nécessite alors que des calculs directs de l'objectif.

L'utilisation des algorithmes génétiques demande toutefois la création de mécanismes de sélection, reproduction et mutation qui doivent parfois être spécifiques au problème pour des meilleurs résultats.

Les méthodes de programmation mathématique sont plus ou moins difficiles à mettre en œuvre. Dans ces cas, on devra au moins calculer les dérivées de l'objectif et des contraintes.

Les méthodes de gradient sont à éviter car elles doivent être adaptées à chaque type de problème. Les autres méthodes se ramènent à des problèmes linéaires ou quadratiques avec ou sans contraintes dont les techniques de résolution sont généralement très bien connues.

Le **Tableau IV.1** présente un comparatif des propriétés des méthodes d'optimisation continue mono-objectif non linéaire sous contrainte selon les critères précédents.

Tableau IV.1 : Tableau comparatif des méthodes d'optimisation non linéaire sous contraintes [100]

Méthode	Convergence globale	Vitesse de convergence locale	Précision	Mise en œuvre
Méthodes Mathématiques				
Gradient projeté	Non (oui en pratique pour des contraintes linéaires)	Linéaire, très lente pour des problèmes mal conditionnés	Bonne	Délicate à mettre en œuvre pour des cas généraux

Gradient réduit	Non (sous la forme de base)	Linéaire, très lente pour des problèmes mal conditionnés	Bonne	Impose des contraintes linéaires
Gradient réduit généralisé	Oui, sous des conditions très restrictives	Linéaire, très lente pour des problèmes mal conditionnés	Bonne	Délicate à mettre en œuvre pour des cas généraux
Newton et Wilson(point interieur)	Non si loin de l'optimum	Quadratique (super-linéaire avec des algorithmes quasi newtoniens)	Bonne	Se ramène à une optimisation quadratique
Pénalités (extérieures et intérieures)	Oui, sous des conditions peu restrictives	Dépend de la méthode sans contrainte utilisée (super linéaire pour quasi-Newton ou gradient conjugué)	Faible	Se ramène à une optimisation sans contraintes
Uzawa et Arrow-Hurwicz	Oui pour certaines versions améliorées	Linéaire	Bonne	Se ramène à une optimisation sans contraintes
Dantzig	Non si loin de l'optimum	Linéaire	Bonne	Se ramène à une optimisation linéaire sous contraintes
Lagrangiens augmentés	Non (sous la forme de base)	Selon la méthode sans contraintes utilisée (linéaire à quadratique)	Bonne, améliorée par rapport aux pénalités	Se ramène à une optimisation sans contraintes
Méthodes non déterministes ou stochastique				
Monte-Carlo et Recuit simulé	Bonne	Faible (nécessitent un grand nombre de calculs)	Faible	Ne nécessite que des calculs directs

Algorithmes génétiques	Très bonne	Faible (nécessite un grand nombre de calculs)	Faible	Nécessite le choix d'options d'optimisation influentes sur la qualité de la résolution
Essais particuliers	Possible mais pas garantie	Faible (temps de calcul élevé)	Bonne	Nécessite des calculs directs et réglage simple des paramètres

Si l'on cherche à optimiser sans trop de précision une fonction présentant de nombreux optimums locaux et si le temps de calcul n'est pas un facteur pénalisant, les méthodes aléatoires et évolutionnaires sont les mieux adaptées.

Les méthodes de programmation mathématique sont au contraire plus performantes et précises pour l'optimisation de fonctions simples (présentant peu d'optimums locaux). En revanche, leur mise en œuvre est également plus délicate.

4. Algorithme du point intérieur :

4.1. Définition :

Cette méthode est basée sur l'algorithme de Newton/Wilson [100], [101], [102]. Cette méthode itérative se décompose comme suit :

- Calcul de la fonction et du gradient au point actuel,
- Calcul de la direction d'avancée
- Approximation au point actuel par un problème quadratique,
- Résolution du problème quadratique,
- Calcul du pas qui permet une diminution suffisante d'une fonction de mérite quantifiant l'objectif et les contraintes (étape de minimisation unidimensionnelle),
- Calcul du point suivant et approximation de la matrice Hessienne pour l'itération suivante.

Plusieurs propriétés rendent cette méthode avantageuse [102]:

- Les points successifs (y compris le point initial) ne sont pas forcément solutions (ce qui est utile si l'on a du mal à trouver un point initial respectant toutes les contraintes),

- La résolution repose sur la résolution de problèmes quadratiques à l'aide de procédures simples et bien connues (ils se ramènent eux-mêmes à la résolution de systèmes linéaires).

4.2.Principe de la méthode :

Résoudre la problématique revient à la recherche d'un vecteur x minimisant une fonction quadratique, éventuellement soumise à des contraintes linéaires, exprimé par :

$$\text{Minimize } f(x) \tag{IV-15}$$

$$\text{s.t. } g(x) = 0 \quad (\text{contraintes d'égalité}) \tag{IV-16}$$

$$h_l < h(x) < h_h \quad (\text{contraintes d'inégalité}) \tag{IV-17)$$

Nous devons transformer les contraintes d'inégalité en contraintes d'égalité en introduisant des variables d'écart s_l, s_h ,

$$\begin{aligned} & \text{Min } f(x) \\ & \text{s.t.} \\ & g(x) = 0 \\ & h(x) - s_l - h_l = 0 \\ & h(x) + s_h - h_h = 0 \\ & s_l, s_h > 0 \end{aligned} \tag{IV-18}$$

Les conditions non négatives sur les variables de jeu dans l'équation (IV-18) peuvent être traités en ajoutant les fonctions de barrière logarithmique à l'objectif suivant.

$$f_\mu = f(x) - \mu \cdot (\sum_{j=1}^m \ln(s_l)_j + \ln(s_h)_j) \tag{IV-19}$$

Supposons qu'il existe n variables d'état x et m contraintes d'inégalité, et que le paramètre de barrière μ est un nombre positif qui est forcé de tendre de manière itérative vers zéro.

D'après le théorème de Fiacco et McCormick [103], lorsque μ tend vers zéro, la solution du sous-problème $x(\mu)$ se rapproche de la solution de Eq. (IV-18).

La fonction lagrangienne résultante du sous-problème à fonctions de barrière est :

$$\begin{aligned} L_\mu = & f(x) - \gamma_g^T \cdot g(x) - \mu_l^T \cdot (h(x) - s_l - h_l) + \mu_h^T \cdot (h(x) + s_h - h_h) - \\ & \gamma \cdot (\sum_{j=1}^m \ln(s_l)_j + \ln(s_h)_j) \end{aligned} \tag{IV-20}$$

Où, γ_g^T, μ_l^T et μ_h^T sont respectivement des multiplicateurs lagrangiens pour les contraintes dans l'équation (IV-18).

Ainsi, le point stationnaire de l'équation (IV-19) est la solution optimale du sous-problème, qui satisfait les conditions de premier ordre de Karush – Kuhn – Tucker (KKT) [104]:

$$\begin{aligned}
\nabla_x L_\mu &= \nabla f(x) - \nabla g(x)^T \cdot \gamma_g - \nabla h(x)^T \cdot (\mu_l + \mu_h) = 0 & (a) \\
\nabla_{s_l} L_\mu &= \mu_l - \mu s_l^{-1} e = 0 \Rightarrow s_l \cdot \mu_l = \mu e & (b) \\
\nabla_{s_h} L_\mu &= \mu_h - \mu s_h^{-1} e = 0 \Rightarrow s_h \cdot \mu_h = \mu e & (c) \\
\nabla_{\gamma_g} L_\mu &= -g(x) = 0 & (d) \\
\nabla_{\mu_l} L_\mu &= -(h(x) + s_l - h_l) = 0 & (e) \\
\nabla_{\mu_h} L_\mu &= h(x) + s_h - h_h = 0 & (f)
\end{aligned} \tag{IV-21}$$

Où, $e = [1, \dots, 1]^T$, $s_l = \text{diag}(s_{l1}, s_{l2}, \dots, s_{lm})$, $s_h = \text{diag}(s_{h1}, s_{h2}, \dots, s_{hm})$.

Ces équations non linéaires sont ensuite résolues par la méthode de Newton [105].

La nouvelle approximation des variables pour la prochaine itération est déterminée par ce qui suit:

$$\begin{aligned}
x^{k+1} &= x^k + \delta \cdot \Delta x & \gamma_g^{k+1} &= \gamma_g^k + \delta \cdot \Delta \gamma_g \\
s_l^{k+1} &= s_l^k + \delta \cdot \Delta s_l & \mu_l^{k+1} &= \mu_l^k + \delta \cdot \Delta \mu_l \\
s_h^{k+1} &= s_h^k + \delta \cdot \Delta s_h & \mu_h^{k+1} &= \mu_h^k + \delta \cdot \Delta \mu_h
\end{aligned} \tag{IV-22}$$

Ici, la taille du pas scalaire δ est choisie pour préserver les conditions de non-négativité sur les variables de jeu s_l , s_h et les variables doubles μ_l , μ_h .

Au lieu de prendre plusieurs étapes de Newton pour converger vers le point optimal du sous-problème à μ fixe, à chaque itération, μ est réduit jusqu'à ce que $\mu \rightarrow 0$ et que l'itération de Newton obtienne la solution pour l'équation (IV-18).

5. Conclusion :

Dans ce chapitre, le modèle mathématique de la problématique de gestion du dispatch de puissance des sources d'un système énergétique multi source hybride a été présentée.

La méthode de résolution du « point intérieur convexe » a été retenu pour résoudre la problématique présentée.

Le chapitre suivant sera dédié à la mise en place de la stratégie d'optimisation développée, sur un système multi source déjà dimensionné, sis au CDER, site de Bous mail (wilaya de Tipasa)

Des résultats de simulation et différents scénarios avec des discussions et des commentaires seront abordés.

CHAPITRE V :
Eude de cas ; Gestion optimale d'un
site isolé existant

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'implémentation d'une stratégie de gestion d'un système hybride PV / éolienne / générateur diesel / batterie électrochimique existant, dimensionné pour alimenter un site autonome d'un ensemble de ménages ruraux, situé dans la zone du Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) à Bousmail, en Algérie [8].

La stratégie proposée repose sur la planification des différentes sources de cette centrale hybride.

L'objectif principal est de minimiser le coût énergétique générée et de permettre une qualité de service optimale, tout en tenant compte de l'évolution de l'environnement, notamment du nombre de consommateurs, du profil de consommation et de la probable dégradation des sources d'énergie.

En résumé, il s'agit de mettre en œuvre un mode opératoire qui va accompagner le système multi-source et optimiser son fonctionnement tout au long du cycle de vie de l'installation.

La stratégie de planification est modélisée comme étant un problème quadratique contraint et résolue à l'aide de l'algorithme *interior-point-convex*.

Les résultats de la simulation reposent sur les données environnementales disponibles au sein du CDER, prévues à l'avance dans cette région.

2. Description du système

2.1. Configuration du SMS

Le système multi-source renouvelable considéré ici se situe dans la zone du CDER à Bousmail, Algérie. Il comprend une éolienne (1 KW), 10 panneaux photovoltaïques (4 KW), une batterie électrochimique (500 AH) et un générateur diesel (2.6KVA) (**Figure V.1**).

Le but de ce système est d'alimenter une charge isolée composée de 4 foyers ruraux en énergie issue de la combinaison de l'énergie éolienne et de l'énergie photovoltaïque.

La charge, l'énergie éolienne et le rayonnement solaire sont des fonctions du temps (heures, jours ou mois... etc.).

L'équilibre entre l'apport énergétique de l'ensemble des sources et la demande (charge) n'est pas toujours assuré.

Le manque d'énergie peut être compensé par l'insertion d'un accumulateur électrochimique et d'un groupe diesel si nécessaire.

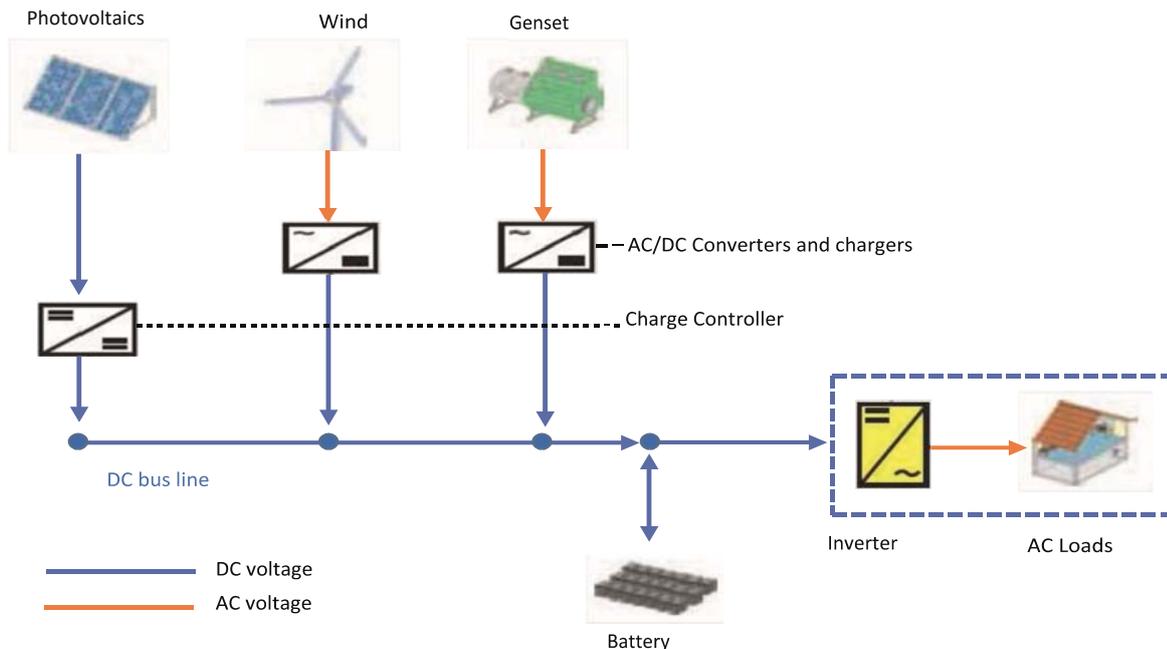


Figure V.1 : Le micro-système renouvelable hybride CDER

Les caractéristiques du système installé sont :

Aérogénérateur à axe horizontal "ELECTRO" ·

- Diamètre du rotor : 3 m
- Nombre de pales : 2
- Hauteur du pylône : 9 m ·
- Tension de sortie : 24 V ·
- Puissance nominale : 1 kW à 11m/s

Champs photovoltaïques ·

- Puissance crête : 400 W ·
- Tension nominale : 24 V ·
- Nombre de modules : 10

Batteries de stockage d'énergie ·

- Capacité : 500 Ah ·
- Type : OLDHAM, stationnaires au plomb

Convertisseur ·

- Type AEG SW 24 V – 1000 W ·
- Tension de sortie 220 V 50 Hz

Groupe électrogène “ LEROY SOMER” ·

- Puissance nominale : 2,6 kVA
- Tension : 110-220 V ·
- Courant nominal : 20,3 A ·
- Vitesse de rotation : 3000 tr/min

Le générateur diesel est intentionnellement surdimensionné ; en effet, la centrale devrait répondre à la demande énergétique sur un horizon de 10 ans en tenant compte de l'évolution du nombre de ménages.

Nous pouvons apprécier l'énergie quotidienne produite par le générateur hybride (**Figure V.2**).

On peut noter la complémentarité entre les sources de production d'énergie éolienne et photovoltaïque. Le caractère continu de la disponibilité d'énergie tout au long de la journée est très satisfaisant pour l'atténuation de la sollicitation de la batterie.

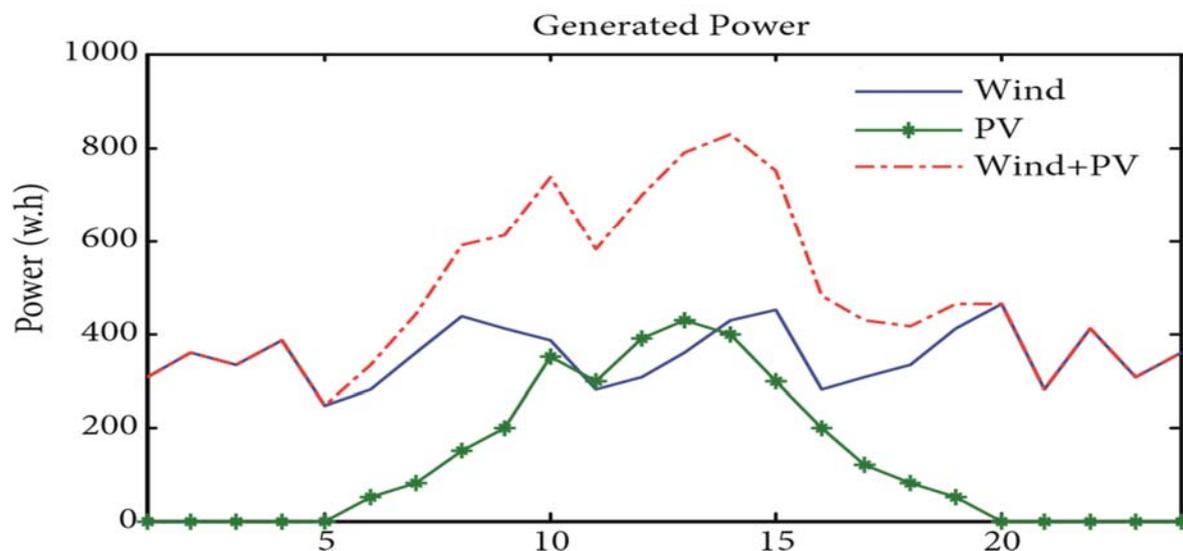


Figure V.2 : Vent horaire et potentiel PV du site

2.2. Profil de demande énergétique

La **Figure V.3** illustre la demande d'énergie électrique quotidienne d'un ménage rural typique en Algérie (1 seul foyer).

Les équipements les plus fréquemment utilisés sont les réfrigérateurs, l'éclairage, la télévision, la pompe à eau et le ventilateur électrique.

Nous désignons la période de pointe entre 17h00 et 21h00.

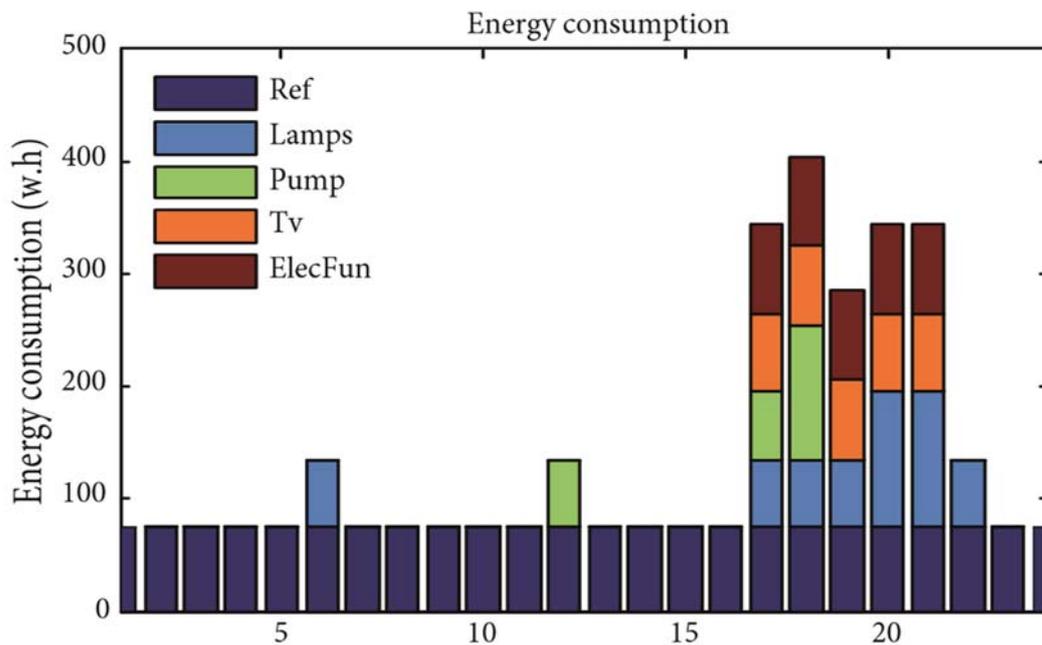


Figure V.3 : Profil de la demande en énergie d'un ménage rural

3. Modèle mathématique

3.1. Modèles PV et éoliens

La production d'énergie photovoltaïque et éolienne dépend fortement des conditions météorologiques.

Nous avons abordé dans le chapitre 2 les modèles analytiques les plus utilisés pour calculer la production d'énergie éolienne et photovoltaïque.

Dans cette démonstration, nous allons utiliser les données prévisionnelles fournies par le CDER (**Figures V.2 et V.3**).

3.2. Modèle générateur diesel

Le générateur diesel est modélisé ici par le coût de consommation de carburant donné par le constructeur.

$$C(P_{Diesel}) = \begin{cases} a \times P_{Diesel}^2 + b \times P_{Diesel} + c & \text{if } P_{Diesel} \neq 0 \\ 0 & \text{if } P_{Diesel} = 0 \end{cases} \quad (IV-1)$$

Où : a (\$/(kW)²h), b (\$/kWh) and c (\$/h) sont des coefficients de coût.

3.3. Modèle de batterie

En fonction de la production d'énergie photovoltaïque et éolienne et des exigences de charge, l'état de charge de la batterie peut être calculé à partir des équations suivantes :

3.3.1. État de charge

Lorsque la puissance de sortie totale de l'éolienne et des panneaux PV est supérieure à la demande de puissance, la batterie est en cours de charge. L'état de charge au temps t est donné par :

$$SOC(t) = SOC(t-1) \times (1 - \sigma) + P_{Bat-Char}(t) \quad (IV-2)$$

Où :

$$P_{Bat-Char}(t) = (P_{Tot}(t) - P_{Load}(t) / \eta_{Inv}) \eta_{Bat} \quad (IV-3)$$

$$P_{Tot}(t) = P_{Wind}(t) + P_{PV}(t) + P_{Diesel}(t) \quad (IV-4)$$

$SOC(t)$ et $SOC(t-1)$ représentent l'état de charge du groupe de batteries aux instants t et $t-1$.

$P_{Bat-Char}(t)$, P_{Wind} , P_{PV} , P_{Diesel} , P_{Load} correspondent respectivement à la puissance de charge de la batterie, de l'énergie éolienne, de l'énergie photovoltaïque, de l'énergie diesel et à la demande en énergie.

σ , η_{Inv} , η_{Bat} sont le taux horaire d'autodécharge, le rendement de l'onduleur et l'efficacité de charge de la batterie.

3.3.2. État de décharge

L'état de la batterie en phase de décharge est donné par :

$$SOC(t) = SOC(t-1) \times (1 - \sigma) + P_{Bat-Dis}(t) \quad (IV-5)$$

$$P_{Bat-Dis}(t) = (P_{Load}(t) / \eta_{Inv} - P_{Tot}(t)) \quad (IV-6)$$

$P_{Bat-Dis}$ représente la puissance de décharge de la batterie.

4. Formulation de la fonction objectif

Le problème est formulé comme étant une stratégie de gestion optimale, dans un contexte de d'efficacité énergétique en minimisant les coûts énergétiques et en garantissant un équilibre optimal entre la puissance disponible et la charge.

Les hypothèses suivantes sont considérées :

- Le profil de la demande en énergie est le même pour tous les ménages ruraux.
- Le niveau initial de l'énergie stockée dans la batterie est connu à l'avance.

4.1. Fonction objectif

La fonction objectif « *Cost* » est une fonction de coût quadratique qui inclut le coût de l'énergie produite par chaque partie de la centrale et qui doit satisfaire la charge rurale.

Minimiser *Cost*,

$$Cost = \sum_{t=1}^{24} \left(P_{Wind}(t) \times C_{Wind} + P_{PV}(t) \times C_{PV} + C((P_{Diesel}(t), t) + P_{Bat-Dis}(t) \times C_{Bat-Dis}) \right. \\ \left. - P_{Bat-Char}(t) \times C_{Bat-Char} - E_{Ex}(t) \times C_{Ex} + E_{Und}(t) \times C_{Und} \right) \quad (IV-7)$$

Sujet aux contraintes suivantes :

4.2. Contraintes

- Bilan de Energétique : l'équilibre entre l'énergie fournie par la source d'une part, et la charge d'autre part devra toujours être satisfait.

$$\sum_{t=1}^{24} (P_{Wind}(t) + P_{PV}(t) + P_{Diesel}(t) + P_{Bat-Dis}(t) + E_{Und}(t)) = P_{Load}(t) + P_{Bat-Char}(t) + E_{ex}(t) \quad (IV-8)$$

- Limites de production du groupe diesel : la puissance générée par le groupe diesel P_{Diesel} ne peut dépasser la puissance nominale définie par le fabricant $P_{Diesel-max}$.

$$P_{Diesel}(t) \leq P_{Diesel-max} \quad (IV-9)$$

- Limites de l'état de charge : Le niveau de charge de la batterie se situe tout le temps entre un niveau inférieur et un niveau supérieur définis par le constructeur.

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (IV-10)$$

-Limites de décharge maximales durant chaque période, compte tenu de l'état de charge à t-1

$$P_{Bat-Dis}(t) \leq SOC(t-1) \quad (IV-11)$$

-Limites de charge maximales durant chaque période, en considérant l'état de charge à t-1

$$P_{Bat-Char}(t) \leq SOC_{max} - SOC(t-1) \quad (IV-12)$$

E_{Ex} , E_{Und} : représentent respectivement l'énergie excédentaire et non livrée.

C_{Wind} , C_{PV} , $C_{Bat-dis}$, $C_{Bat-char}$ and C_{Ex} représentent les coûts respectifs de chaque type de source d'énergie.

5. Méthodologie

Pour résoudre le problème formulé, l'algorithme du point intérieur est utilisé.

Cette technique est très avantageuse pour résoudre le problème de la recherche d'un vecteur x minimisant une fonction quadratique, soumise à des contraintes (Chapitre IV).

6. Résultats de simulation

Le modèle présenté ci-dessus est appliqué à un cas réel. Une microcentrale hybride renouvelable située sur le site du CDER, près d'Alger, en Algérie, devrait alimenter une charge rurale composée de quatre ménages. La demande énergétique typique de chaque ménage est présentée à la **Figure V.3**.

Bazmi AA, et Zahedi G [107] ont donné une synthèse des coûts d'énergie de différentes technologies de production d'électricité.

Dans notre simulation, les coûts considérés [107] sont les suivants :

0,7 \$/kWh pour l'énergie éolienne, photovoltaïque et l'énergie de charge de la batterie ;

0,9 \$/kWh pour l'énergie de décharge de la batterie ;

0 \$ / kWh pour l'énergie excédentaire.

2 \$ / kWh pour l'énergie non livrée.

Les paramètres de la fonction coût du groupe diesel sont présentées dans le **Tableau IV.1**.

Tableau IV.1 : Paramètres du générateur diesel

Maximal power (kW)	a (\$/(kW) ² h)	b (\$/kWh)	c (\$/h)
2	0.006	0.00657	0.5818

6.1 Simulation de la gestion de dispatch d'énergie

6.1.1 Gestion Classique (principe de priorité)

Dans un premier temps, et afin de permettre une étude comparative significative, il est plus judicieux de présenter les résultats de simulation sans management (**Figure V.4**), cad selon le principe de priorité suivant :

- Priorité pour l'éolien et le photovoltaïque.
- Décharge de la batterie (si disponible)
- Générateur diesel (si nécessaire).
- Le surplus d'énergie sert à charger la batterie.

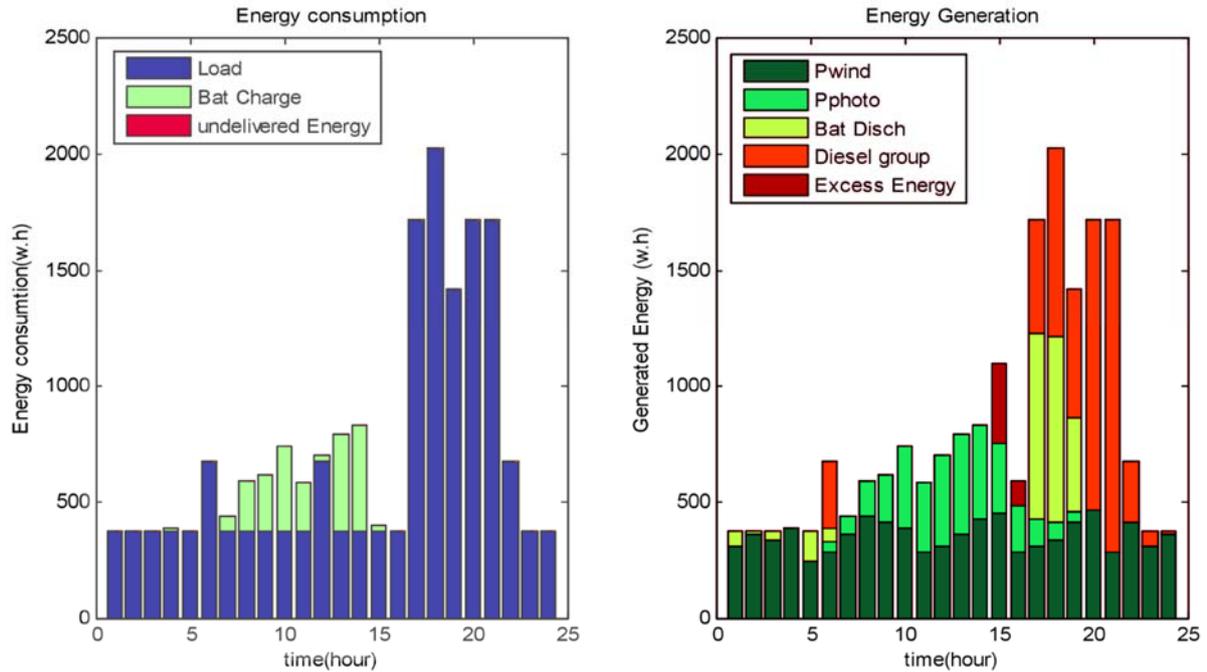


Figure V.4 : Dispatch d'énergie lors d'une gestion classique

La charge est satisfaite pendant toute la durée de la simulation (24 h).

On peut apprécier la charge de la batterie aux intervalles 4,7, 8, 9, 10, 11,12, 13, 14 et 15 et la décharge de la batterie aux intervalles 1, 2, 3, 5, 6, 17, 18 et 19.

Le groupe diesel n'entre en action qu'en période de pointe (à 6 heures et de 17 heures à 23 heures).

Le coût de l'énergie produite par la centrale durant une journée vaut **16,84 \$/jour**.

6.1.2 Gestion Optimale

La **Figure V.5** illustre la répartition optimale de l'énergie à l'aide de la stratégie de management développée.

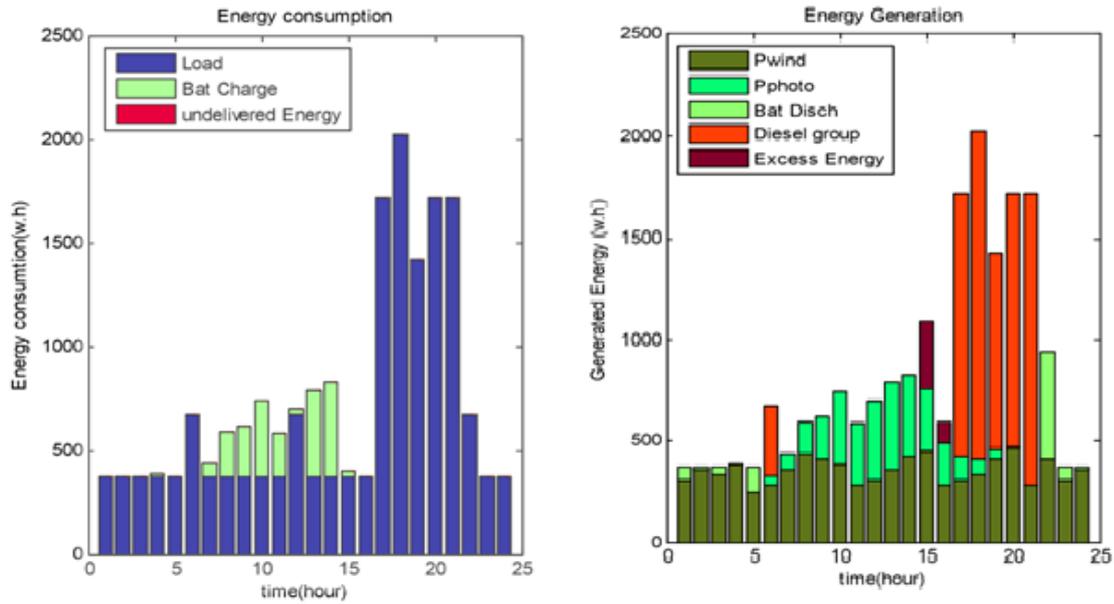


Figure V.5 : Gestion optimale dans des conditions normales

Les sources d'énergie renouvelables constituent la première priorité.

La deuxième priorité est régie par la gestion du système ; Cela permet de prendre une décision optimale entre la décharge de la batterie ou la mise en marche du générateur diesel (selon la fonction de coût de l'énergies produite par le générateur diesel) (Figure V.6) :

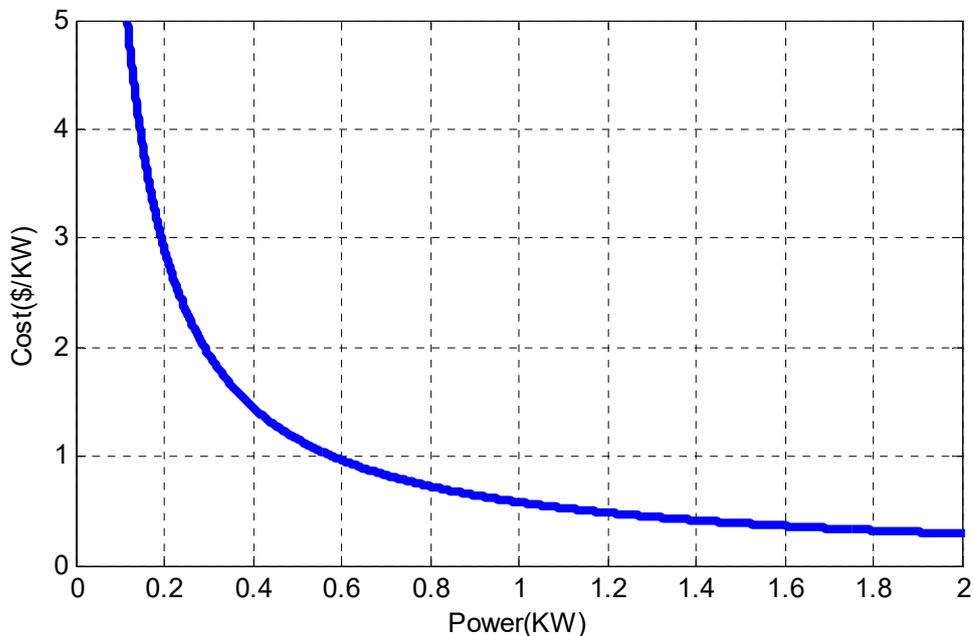


Figure V.6 : Fonction de coût du générateur diesel

La fonction coût d'énergies produite par le générateur Diesel entend que :

- Le coût de l'énergie produite par le groupe diesel est relativement élevé pour une faible demande d'énergie, ce qui implique dans ce cas de figure la priorité pour la décharge de la batterie (si disponible).
- Le coût de l'énergie produite par le groupe diesel est relativement faible pour une demande d'énergie élevée, ce qui fait que le générateur diesel est prioritaire par rapport à la décharge de la batterie.

Le coût de l'énergie produite durant une journée par la microcentrale calculé en utilisant la stratégie développée vaut **14,12 \$/jour**.

Ceci met en exergue l'avantage de notre stratégie de management par rapport au management classique (par priorité) ; En effet, nous économisons **2,72 \$/jour**, soit **16,15%** du coût énergétique globale par jour.

6.2. Evolution de l'environnement du SMS

En plus de la première contribution qui consiste à améliorer l'efficacité énergétique dans des conditions normales, nous avons proposé une nouvelle approche de gestion adaptative à l'état de fonctionnement de l'installation SMS. Cette approche peut être considérée comme un outil d'aide à la décision et permettra d'anticiper le fonctionnement de l'installation dans plusieurs scénarios.

En effet, le cycle de vie de l'installation du SMS varie de 10 à 20 ans. Par conséquent, il est très difficile voire impossible d'imaginer un fonctionnement parfait ou du moins sans anomalie des éléments de l'installation. C'est pourquoi, nous nous sommes orientés vers la prise en charge du fonctionnement du système en cas de mise hors service de l'une des sources d'énergie.

Afin de valider l'efficacité de l'approche proposée, plusieurs scénarios représentant l'évolution de l'environnement du SMS ont été testés.

Pour chaque scénario, nous avons refait la simulation afin trouver le vecteur optimal et le coût énergétique optimal.

6.2.1. Eolienne hors service

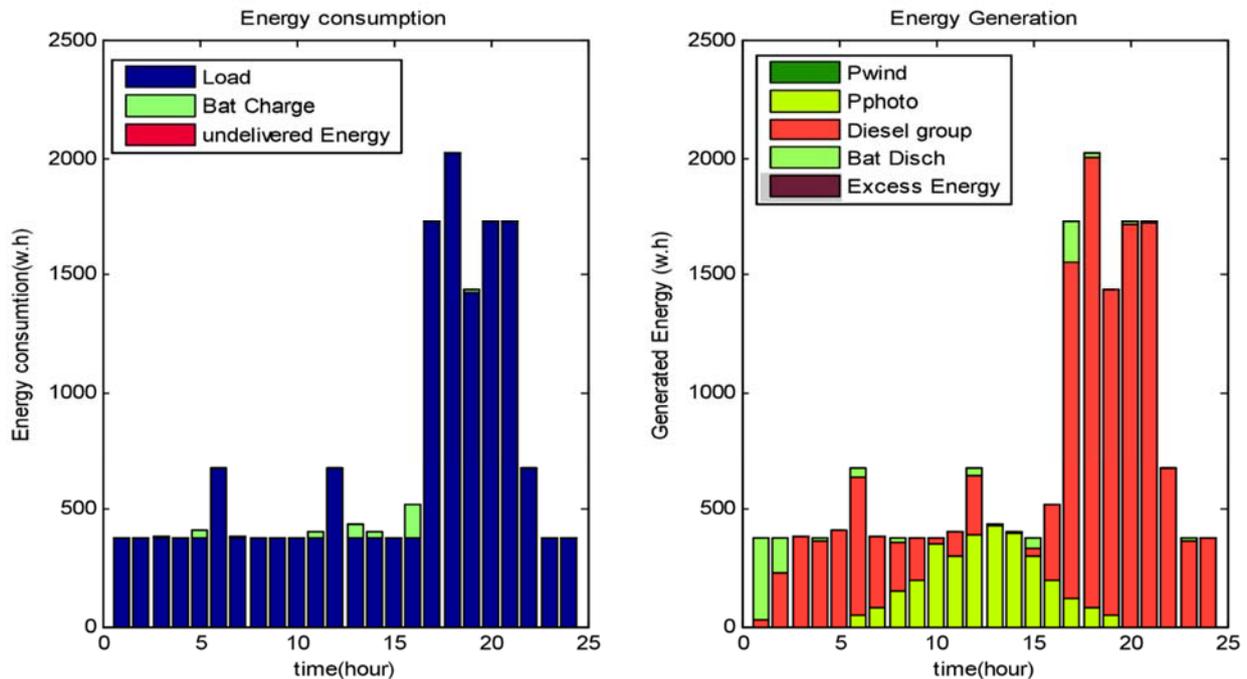


Figure V.7 : Gestion optimale lorsque l'éolienne est en panne

Dans cette situation, pour satisfaire la charge, le groupe diesel entre en action pendant la quasi-totalité de la période de simulation (Figure V.7). Nous notons dans ce cas une augmentation substantielle du coût de production soit **19,60 \$/jour**.

6.2.2. Générateur diesel hors service

La **Figure V.8** représente le scénario dans lequel le générateur diesel est en panne. Seules des sources renouvelables et la batterie sont disponibles pour alimenter la charge, qui n'est pas satisfaite dans ce cas de figure.

L'énergie non livrée est représentée par la couleur marron dans l'illustration de gauche.

Dans cette situation, deux cas de figure nous sont offertes :

- Soit, obliger les ménages à s'effacer (réduire leur consommation) lors des heures de pointe « Outil d'aide à la décision pour un service minimum ».
- Soit, redimensionner le SMS « cette option est hors scope dans notre thèse ».

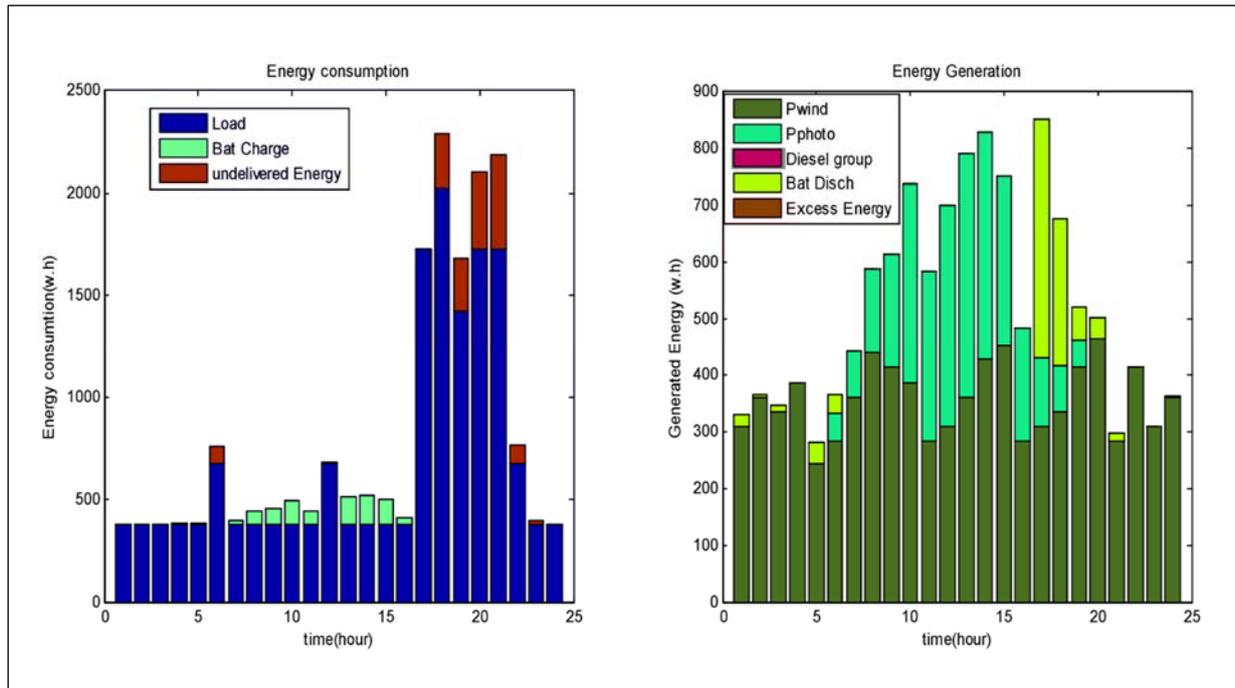


Figure V.8 : Gestion optimale lorsque le groupe électrogène diesel est en panne

Service minimum

Afin d'assurer l'équilibre énergétique entre la source et la charge, le gestionnaire de l'installation (SMS) impose un service minimum aux ménages en utilisant des compteurs intelligents. Les équipements de seconde nécessité doivent être coupés.

Type de charge	Délestage si nécessaire
Réfrigérateur	
Éclairage	
Pompe à eau	
Télévision	X
Ventilateur électrique	X

La **Figure V.9** illustre la gestion optimale du système lorsque le groupe électrogène diesel est en panne.

Les téléviseurs et les ventilateurs électriques sont coupés pendant la période de pointe, ce qui permettra de satisfaire la demande de charge (**Figure V.9**).

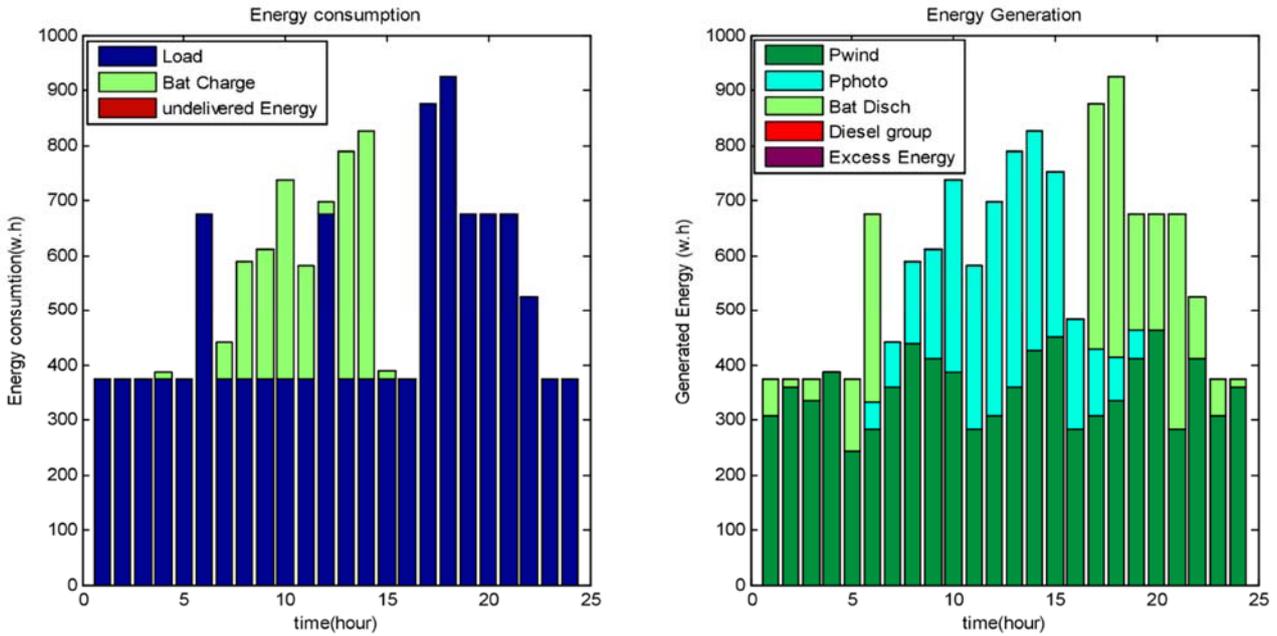


Figure V.9 : Gestion optimale lorsque le groupe électrogène diesel est en panne (service minimum)

6.2.3. Evolution du nombre de ménages

Afin de mettre en évidence le comportement de la centrale lors de l'évolution du nombre de ménages, nous avons simulé le nombre maximum de ménages que la centrale peut alimenter tout en garantissant l'équilibre énergétique.

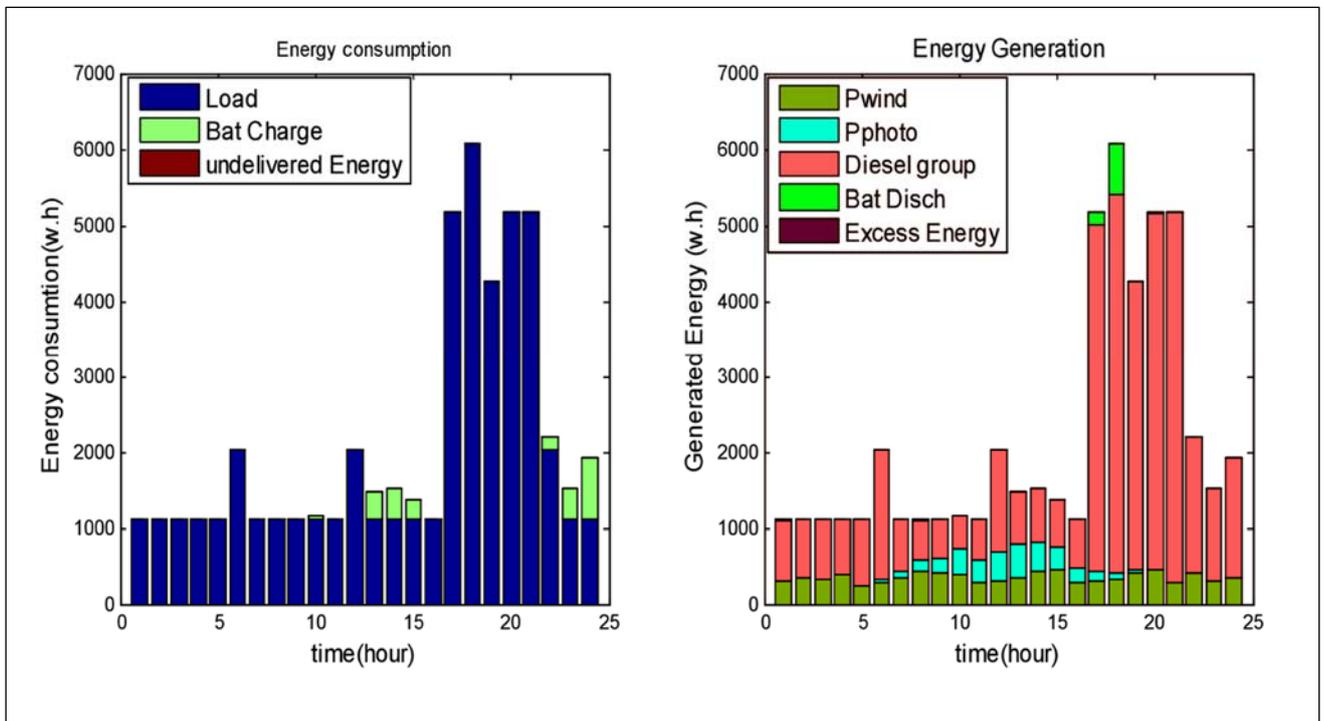


Figure V.10 : Gestion optimale de 14 ménages dans des conditions normales

La microcentrale concernée par notre étude peut satisfaire les besoins énergétiques d'un maximum de 14 ménages (**Figure V.10**), au-delà de ce nombre de ménages, il faut la renforcer voire la redimensionner.

6.3. Discussion Générale :

Remarque 1 : L'installation n'est pas dimensionnée de manière optimale. En effet, d'après les résultats de simulation et compte tenu des coûts énergétiques des différentes sources d'énergie et leurs rendements, on remarque que, plus le nombre de ménage augmente, plus la part de production du groupe diesel l'emporte sur les autres sources et encore davantage sur les batteries.

Remarque 2 : L'approche adoptée dans cette thèse est non seulement une approche qui optimise le fonctionnement de l'installation en assurant une efficacité énergétique durant tout le cycle de vie de l'installation, mais apporte une contribution très intéressante comme outil d'aide à la décision pour le dimensionnement ou le redimensionnement d'un système SMS.

Remarque 3 : L'implémentation de l'outil d'aide à la décision au niveau du centre de contrôle (salle de télé-conduite) de la microcentrale SMS passe par l'installation de compteurs intelligents (Smart Meters).

Ce type d'appareils électroniques est capable de transmettre de façon continue des informations sur la consommation des clients et de procéder au délestage des charges non prioritaires conformément aux décisions anticipées par l'outil d'aide à la décision.

Ainsi, une application interactive pourra facilement être développée et portée sur des dispositifs électroniques tels que les tablettes et les smartphones et permettra aux propriétaires de gérer de manière intelligente et en temps réel la production et la consommation énergétique de son domicile. Cette orientation s'inscrit fortement avec les tendances de gestion technique des bâtiments ou bien la domotique.

7. Conclusion

Dans cette étude, un problème d'ordonnancement a été formulé pour identifier la stratégie de gestion opérationnelle optimale pour un système hybride renouvelable de taille réduite.

Cette stratégie opérationnelle prend en compte les changements environnementaux, traduits par l'évolution du nombre de clients (généralement en augmentation), de leurs profils de consommation et par la panne éventuelle d'une partie de la centrale.

Pour une qualité de service optimale, la continuité de service a été assurée tout en minimisant le coût énergétique généré. L'approche a été modélisée sous forme d'un problème quadratique contraint et résolue à l'aide de l'algorithme *interior-point-convex* implémenté sous MATLAB.

Comme les conditions initiales sont bien connues dans ce type de problème, cette technique a été facile à implémenter et pas gourmande en temps de calcul.

La stratégie de management d'énergie présentée dans ce travail constitue un outil d'aide à la décision très efficace dédié aux gestionnaires de SMS autonomes.

Conclusion Générale

Conclusion générale

L'Algérie dispose d'un potentiel énergétique important, que ce soit en énergies fossiles ou renouvelables.

Les experts économiques du monde entier ont affirmé que l'utilisation des énergies renouvelables dans un pays comme l'Algérie est une nécessité absolue, en tant que pays où 98% de ses exportations sont de sources hydrocarbures.

Le gisement solaire en Algérie est considéré parmi les plus importants au niveau mondial, mais son exploitation reste encore très limitée, du fait de la politique énergétique nationale, mais aussi du fait du manque d'études statistiques et techniques pour la récupération de cette source d'énergie renouvelable.

Le gouvernement algérien a amorcé depuis 2011 une politique développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique et prévoit la production de 40% de l'électricité d'origine renouvelable à l'horizon 2030

Afin d'atteindre cet objectif, le gouvernement a mis en place le lancement de projets pilotes qui consistent à diversifier l'implantation des énergies renouvelables à travers le territoire national, dont la majorité des implantations concernent énergie le solaire et le photovoltaïque.

Ajouté à cela le plan de formation dans cette nouvelle discipline, l'organisation de séminaires, et de conférences national et international dans différentes régions du pays, dans le but essentiel est de manifester l'intérêt pour le développement de ce type d'énergie.

Dans le cadre de cette thèse, l'objectif principal était d'optimiser le dispatch d'énergie d'un système multi source hybride, destiné à fournir l'Energie électrique pour un site isolé constitué d'un nombre d'habitats ruraux.

Pour ce faire, nous avons développé un mode opératoire permettant de déterminer pour chaque pas temporel, les sources d'énergies les mieux adaptées, dans le but de satisfaire le profil de consommation électrique, en assurant une efficacité énergétique durant tout le cycle de vie de l'installation.

L'approche adoptée tiens compte de l'évolution de l'environnement, notamment du nombre de consommateurs, du profil de consommation et de la probable dégradation des sources d'énergie.

Afin de montrer l'efficacité de ladite approche, celle-ci a été testé sur un système multi source hybride constitué d'une station PV éolien avec batteries et groupe diesel déjà dimensionné par le CDER.

Plusieurs scénarios illustrant l'évolution du contexte ont été simulés, notamment ; la panne de l'éolienne, du groupe électrogène, et l'évolution du nombre d'habitats.

Le résultat était très prometteur, un gain de 16% sur le coût d'énergie durant une journée par rapport à une gestion classique a été constaté, en plus d'une prise en charge efficace du mode dégradé.

La démarche présentée dans ce travail apparaît comme un outil d'aide à la décision adapté aux gestionnaires des centrales autonomes ; Ainsi, l'implémentation d'un tel outil sur des dispositifs électroniques tels que les tablettes et les smartphones permettra aux gestionnaire/consommateur de gérer de manière intelligente et en temps réel la production et la consommation énergétique.

Cette orientation s'inscrit fortement avec les tendances de gestion technique des bâtiments ou bien la domotique.

Ces travaux de thèse peuvent subir des extensions et des nombreuses perspectives peuvent être dégagées à leur issue ; notamment, en raison de l'évolution inévitable du contexte autour des systèmes multi-sources, il serait très intéressant comme perspective, d'inclure à ce travail une étude technique et statistique qui permettrons de définir le bon moment pour mettre à jour le dimensionnement du SMS énergétique.

Il serait envisageable de passer vers une problématique multicritère, ce qui se ramène par exemple à la prise en charge de la minimisation des émissions des gaz à effet de serre, en plus de la perspective principale, à savoir, la minimisation du cout d'énergie générée.

En termes de méthodes numériques d'optimisation, et afin d'augmenter la fiabilité et la précision tout en diminuant le temps de calcul, il serait très intéressant d'hybrider un algorithme déterministe et un algorithme stochastique, ce qui se rame à combiner les avantages des deux types de méthodes, On pourrait par exemple s'approcher de l'optimum global par une méthode stochastique puis affiner les résultats par une méthode déterministe. On pourrait aussi utiliser un grand nombre de points initiaux choisis aléatoirement et réaliser des optimisations déterministes à partir de tous ces points.

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Kumar P, Palwalia DK. *Decentralized Autonomous Hybrid Renewable Power Generation*. Journal of Renewable Energy 2015; 1-18.
- [2] Ruther Rliu, Schmid A, Beyer H, Montenegro A, Oliveira H. *Cutting on diesel, boosting PV: the potential of hybrid diesel/PV systems in existing mini-grids in the Brazilian Amazon*. In: Proceeding of 3rd world conference on photovoltaic Energy Conversion; 11-18 May 2003; Osaka, Japan.
- [3] Kaabeche A, Belhamel M Ibtouen R. *Sizing optimization of grid-independent hybrid photovoltaic/wind power generation system*. Energy 2011; 36: 1214-22.
- [4] AZIZ AS. *Economic analysis using different types of hybrid energy generation for desert safari camps in UAE*. Turk J Elec Eng & Comp Sci 2017; 25: 2122 -2135.
- [5] Siddique MN, Aftab AHMAD, Nawaz MK, Bukhari SBA. *Optimal integration of hybrid (wind-solar) system with diesel power plant using HOMER*. Turk J Elec Eng & Comp Sci 2015; 23: 1547-1557.
- [6] Tabatabaei M, Karimi K, Kumar R, Horváth IS. *Renewable Energy and Alternative Fuel Technologies*. BioMed Research International 2015; 2015: 1-2.
- [7] Zhou W, Lou C, Li Z, Lu L, Yang H. *Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar-wind power generation systems*. Applied Energy 2010 ; 87 : 380–389.
- [8] Belhamel M, Moussa S, Kaabeche A. 2002. *Production d'Electricité au Moyen d'un Système Hybride (Eolien- Photovoltaïque -Diesel)*. Rev. Energ. Ren : Zones Arides 2002 ; 1 : 49-54.
- [9] Mons L (2005). *Les enjeux de l'énergie*, Larousse, France.
- [10] Lopez M (2008). *Contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée*. PhD Thesis, Université Paris-Sud11, France.
- [11] Cycleco. *Analyse du Cycle de Vie de la production d'électricité d'origine éolienne en France*. [archive][PDF], sur ADEME, décembre 2015, p. 78.
- [12] Robyns B, Bastard P. *Production décentralisée d'électricité : contexte et enjeux techniques*. La revue 3EI n°39, Décembre 2004.
- [13] Recherche ECRIN entreprise. *L'électronique de puissance vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables*. Rapport de synthèse, mai 2002.
- [14] www.ets-net.org.
- [15] Attar A. *Les énergies renouvelables*. Ancien PDG de Sonatrach et ancien Ministre des Ressources en Eau, lecourrier-dalgerie.com, Novembre 2018.
- [16] Walker JF, Jenkins N. *Wind energy technology*. John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- [17] Mathew S. *Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics*. Springer, Germany (2006).

- [18] www.portail.cder.dz
- [19] OPCIT, www.reflexiondz.net. (Intervention de l'expert international- Docteur Abderrahmane MEBTOUL lors de la convention sur l'énergie organisée par le Front des Forces Socialistes – FFS- Alger 31 octobre- 01 novembre 2013).
- [20] Bernard EQUER, Jacques PERCEBOIS, *Energie solaire photovoltaïque ; aspects économiques*, édition MARKETINE, Paris 1993, P 7-12.
- [21] Guide pratique ACFCI, *Gestion de l'environnement pour les PME et PMI*, édition AFNOR, Paris 2007, p40-41.
- [22] Bey M, Hamidat A, Benyoucef B, Nacer T (2016). *Viability study of the use of grid connected photovoltaic system in agriculture: case of Algerian dairy farms*. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 63, 333e345. <https://doi.org/10.1016/j.rser..>
- [23] www.uneca-an.org.
- [24] RABEHI Mohamed Amine. *Contribution des énergies renouvelables dans le développement durable*. Mémoire pour l'obtention d'un diplôme d'ingénieur d'affaire, Paris Graduate School of Management, Juillet 2009, p 55.
- [25] ATMANIA Hanane. *La stratégie d'implantation des énergies renouvelables en Algérie*. Mémoire pour l'obtention d'un diplôme de Magister en Mangement, Université d'ORAN-2, Janvier 2015, p 87.
- [26] Saiah SBD, Stambouli AB (2017). *Prospective analysis for a long-term optimal energy mix planning in Algeria: towards high electricity generation security in 2062*. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 73, 26e43. <https://doi.org/10.1016/j.rser>.
- [27] Bilan Energétique National [WWW Document], n.d. URL <http://www.energy.gov.dz/francais/index.php?page=bilan-des-realizations-2>.
- [28] Programme National des Energies Renouvelables 2015-2030. [WWW Document], n.d. URL, <http://era.dz/era/wp-content/uploads/2017/10/SKTM-Programme-National-des-Energies-Renouvelables-2015-2030.pdf>.
- [29] site web EconoStrum, 2019.
- [30] Gergaud O. *Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur*. Thèse de doctorat en électrotechnique, école Normale Supérieure, 2002.
- [31] <http://unfccc.int>.
- [32] <http://www.aprue.org.dz/publications.html>.
- [33] Labouret A et Villos M. *Energie solaire photovoltaïque*. Dunod 3ème édition, Paris 2006.
- [34] <http://www.agriculture-durable.org/wp-content/uploads/2010/05/nrj6volets.pdf>
- [35] <http://www.cite-sciences.fr/lexique/Site/upload/media/419/grand/soleil.swf>
- [36] http://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin_002_07.pdf

- [37] Wereme A. *Contribution à la mise au point d'un modèle de calcul des composantes spectrales du rayonnement solaire au sol dans les conditions d'une atmosphère de brume sèche en Afrique sahélienne*. Thèse de doctorat en sciences et techniques, université de Cheikh Anta Diop de Dakar, 2001.
- [38] Gergaud O. "Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur", Thèse de doctorat en électrotechnique, école Normale Supérieure de Cachan, 2002.
- [39] Bobin JL et al. *L'énergie de demain*. Edition EDP Sciences, France 2005.
- [40] Pastor AC. *Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques*. Thèse de doctorat en Conception des Circuits Microélectroniques et Microsystèmes, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006.
- [41] Vighetti S. *Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion*. Thèse de doctorat en Génie Electrique, Université de Grenoble, 2010.
- [42] <http://www.edf.com/html/panorama/production/individuels/photovoltaique/intro.html>
- [43] Salas V, Olías E, Barrado A et Lázaro A. *Review of the maximum power point tracking algorithms stand-alone photovoltaic systems*. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 90, n° 11, pp. 1555-1578, 2006.
- [44] Boitier V et Maussion P. *Recherche du maximum de puissance sur les générateurs photovoltaïques*. *Revue 3E. I*, 2008 - academia.edu.
- [45] Singo AT. *Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome*. Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy I, Nancy, France, 2010.
- [46] Dubois C. *Le guide de l'éolien, techniques et pratiques*. Édition Eyrolles, Paris 2009.
- [47] <http://www.iscience.ca/energieeo/ateliers/energieeoliennecomposantes.php>
- [48] http://codev.pays-des-paillons.fr/fichiers/etatArt_ARENE+.pdf
- [49] <http://www.energiepropre.net/maison4.html>
- [50] http://www.discip.ac-caen.fr/phch/college/troisieme/exos_interactifs/centrales_web/co/centrale_eolienne.html
- [51] Villalva MG, Gazoli JR et Ruppert E. *Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays*. *Brazilian Journal of Power Electronics*, vol. 14, n° 1, pp. 35-45, 2009.
- [52] Tong W. *Wind Power Generation and Wind Turbine Design*, WIT Press, 2010.
- [53] Cruz I, Arias F, Avia F, Arribas LM, Fiffe RP. *Assessment of different energy storage systems for wind energy integration*. *European Wind Energy Conference* 2001.
- [54] Faure F. *Suspension magnétique pour volant d'inertie*. Thèse soutenue à l'Institut National Polytechnique de Grenoble le 20 juin 2003.

- [55] ALTER AFRICA. *Les différents types de batteries plomb Acide*. ALTER AFRICA, 2004. [En ligne]. Available: <http://www.batterie-solaire.com/types-batteries-plomb.htm>.
- [56] Adam M. *Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance*. Thèse de Doctorat, Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique Industrielle, l'ENSEEIH, Toulouse, 2005.
- [57] Dali M. *Commande et Gestion Energétique des Systèmes Hybrides Photovoltaïque – Eolien*. Thèse de Doctorat, ENIT, Tunis, 2009.
- [58] Pop V, Bergveld HJ, Danilov D, Regtien PPL et Notten PHL. *Battery Management Systems: Accurate State-of-Charge Indication for Battery-Powered Applications*. 1e éd., Springer, 2008, p. 71.
- [59] Thiaux Y. *Optimisation des profils de consommation pour minimiser les coûts économique et énergétique sur cycle de vie des systèmes photovoltaïques autonomes et hybrides, Évaluation du potentiel de la technologie Li-ion*. ENSC, 2010.
- [60] Luque A et Hegedus S. *Handbook of photovoltaic science and engineering*. John Wiley & Sons Ltd, 2003, pp. 812-849.
- [61] Kamwa I, Saulier IB. *Modélisation, simulation et régulation d'un réseau éolien/diesel autonome*. Rapport N°IREQ4340, Varennes, Canada, 1989.
- [62] Papathanassiou SA, Papadopoulos MP. *Dynamics Characteristics of Autonomous Wind-Diesel Systems*. Renewable Energy, Vol. 23, Pag. 293-311, 2001.
- [63] Tuken T, Fullmer RR, VanGerpen J. *Modelling, Identification, and Torque Control of a Diesel Engine for Transient Test Cycles*. SAE SP, no.819, Detroit, 1990.
- [64] R. Chedid et S. Rahman. *Unit sizing and control of hybrid wind-solar power systems*. IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 12, n° 11, pp. 79-85, 1997.
- [65] Seeling-Hochmuth GC. *A combined optimisation concept for the design and operation strategy of hybrid-PV energy systems*. Solar Energy, vol. 61, n° 12, pp. 77-87, 1997.
- [66] SN Laboratories, *Stand-Alone Photovoltaic systems - A Handbook of Recommended Design Practices*, 1e éd., Springfield, USA: Sandia National Laboratories, 1991.
- [67] Messenger RA et Ventre J. *Photovoltaic Systems Engineering*. 2e éd., Florida, USA: CRC Press, 2004, pp. 209-257.
- [68] Bernal-Agustín JL et Dufo-López R. *Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 13, n° 18, pp. 2111-2118, 2009.
- [69] Dhaker A. *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, Juin 2012.

- [70] Kadri R. *Contribution à l'amélioration de la capture de l'énergie solaire photovoltaïque dans l'habitat résidentiel : nouvelles structures de puissance et de commande*. Ph.D. thesis, Université de Poitiers, 2010.
- [71] Sinha S, Chandel S.S. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 192–205, (2014)
- [72] Lambert T, Gilman P, Lilienthal P. *Micropower system modeling with HOMER*. Integration of Alternative Sources of Energy New Jersey: John Wiley & Sons Inc.; 2006. p. 379–418.
- [73] <http://www.ceere.org/rerl/projects/software/hybrid2>.
- [74] Manwell JF et al. *Hybrid2 – a hybrid system simulation model, theory manual*. Renewable Energy Research Laboratory, Department Of Mechanical Engineering, University Of Massachusetts Report. Sub-contract No. Xl-1-11126-1-1; June 30, 2006.
- [75] <http://www.retscreen.net/ang/home.php>
- [76] <http://www.unizar.es/rdufo/user%20manual.pdf>
- [77] <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/>
- [78] <http://www.unizar.es/rdufo/grhyso.htm>
- [79] Patel MS, Pryor TL. *Monitored performance data from a hybrid RAPS system and the determination of control set points for simulation studies*. In: Proceedings of the ISES 2001 solar world congress, Adelaide, Australia; November 25–December 2, 2001.
- [80] http://www.web.co.bw/sib/somes_3_2_description.pdf
- [81] Aronson EA, Caskey DL, Caskey BC. *SOLSTOR description and users guide*. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories; 1981 (Sand 79-2330).
- [82] Kendrick L, Pihl J, Weinstock I, Meiners D, Trujillo D. *Hybrid generation model simulator (HybSim)*. In: Proceedings of the EESAT conference, San Francisco, Sand2003-3790 a; October 27–29, 2003.
- [83] http://www.risoe.dtu.dk/research/sustainable_energy/wind_energy/projects/
- [84] http://www.iea-pvps-task11.org/htmlobj-167/gehrke_ipsys_valencia08.pdf.
- [85] Morgan TR, Marshall RH, Brinkworth BJ. ARES. *A refined simulation program for the sizing an optimization of autonomous hybrid energy systems*. Solar Energy 1997;59(4-6):205–15.
- [89] Schaffrin C, Knoblich I, Seeling-Hochmuth GC, Van Kuik E. *Solsim and hybrid designer: self-optimizing software tools for simulation of solar hybrid applications*. EuroSun 98 ; September 14–17, 1998. p. 1–7.
- [90] Vivier. “*Stratégies d’optimisation par la méthode des plans d’expériences et application aux dispositifs électrotechniques modélisés par éléments finis*”, Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2002.
- [91] Goupy J. “*Plans d’expériences pour surfaces de réponse*”.DUNOD, Paris, 1999
- [92] Messine F, Nogarède B, Langounaelle JL. *Optimal Design of Electro-Mechanical Actuators: A New Method Based on Global Optimization*.

- [93] Hajji O. *Contribution au développement de méthodes d'optimisation stochastiques. Application à la conception des dispositifs électrotechniques*. Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2003.
- [94] Minoux M. *Programmation mathématique : Tome 1 Théorie et algorithmes*. Ed. Dunod, 1983.
- [95] Powell M.J.D. *An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivations*. Computer Journal, Vol. 7, pp. 155-162, 1965.
- [96] Fletcher R. *Practical Methods of Optimization*. John Wiley & Sons, ISBN 0-471-49463-1, 1987.
- [97] Elperin T. *Monte Carlo structural optimization in discrete variables with annealing Algorithm*. International Journal for numerical methods in engineering, Vol. 26, pp. 815-821, 1988.
- [98] Darwin Ch. *The origin of species by means of natural selection*. John Marray London, 1859.
- [99] Renders JM, *Algorithmes génétiques et réseaux de neurones : Applications à la commande de processus*, Hermes Sciences, 1995.
- [100] Deshmukh M et Deshmukh S. *Modeling of hybrid renewable energy systems*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, n° 11, pp. 235-249, 2008
- [101] Salazar L et Urrea J. *A Novel Two Input Single Switch DC-DC Converter for Hybrid Electricity Generators*. *Canadian Journal on Electrical and Electronics Engineering*, vol. 2, n° 111, 2011.
- [102] Kong P, Zhao J et Xing Y. *Series-parallel Resonant High Frequency Inverter for Standalone Hybrid PV/Wind Power System*. *Energy Procedia*, vol. 12, n° 1, The Proceedings of International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE 2011), pp. 1090-1097, 2011
- [103] Mellit A, Kalogirou S, Hontoria L et Shaari S. *Artificial intelligence techniques for sizing photovoltaic systems: A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, n° 12, pp. 406-419, 2009
- [104] Mehrotra S. *On the Implementation of a Primal-Dual Interior Point Method*. *SIAM Journal on Optimization* 1992; 2: 575-601
- [105] Byrd RH, Hribar ME, Nocedal J. *An Interior Point Algorithm for Large-Scale Nonlinear Programming*. *SIAM Journal on Optimization* 1999; 9: 877-900.
- [106] Gould N, Toint PL. *Preprocessing for quadratic programming*. *Mathematical Programming* 2004; 100: 95-132.
- [107] Bazmi AA, Zahedi G. *Sustainable energy systems: Role of optimization modeling techniques in power generation and supply-A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2011; 15:3480–3500.

Abstract: Often, authors deal with the sizing issue of hybrid power plants on horizons of several years. Proposed approaches are certainly essential to optimize energy costs. However, these solutions cannot remain optimal throughout the life cycle of the plant due to the inevitable evolution of the number of households, their consumption profiles, and possible degradation of a part of the plant. In this work, an efficient management strategy of a sized hybrid renewable system is developed. It is based on the scheduling of the different resources of the plant. The main aim is to minimize the generated energy cost while ensuring an optimal quality of service and taking into account the evolution of the environment. The scheduling issue was modeled as a constrained quadratic problem and solved using the interior-point convex algorithm. To show the effectiveness of the approach, several scenarios representing the changing context have been developed and implemented on an existing power plant. Obtained results were compared with the case of energy dispatch without management and significant energy cost savings was noticed. This work provides an efficient decision aid tool for the microgrid manager and fits well with the general policy of smart grids.

Key words: Energy management, scheduling problem, hybrid power system, PV/wind turbine/battery/diesel power system, renewable energy

Résumé : Les auteurs abordent souvent le problème de dimensionnement des centrales hybrides sur des horizons de plusieurs années. Les approches proposées sont certainement essentielles pour optimiser les coûts énergétiques. Cependant, ces solutions ne peuvent rester optimales tout au long du cycle de vie de la centrale, et ce en raison de l'évolution inévitable du nombre de ménages, de leurs profils de consommation et de la dégradation possible d'une partie de la centrale. Dans ce modeste travail, une stratégie de gestion efficace d'un système hybride renouvelable est développée. Elle repose sur l'ordonnement des différentes ressources de la centrale. L'objectif principal est de minimiser les coûts énergétiques générés tout en garantissant une qualité de service optimale et en tenant compte de l'évolution de l'environnement. Le problème d'ordonnement a été modélisé comme un problème quadratique contraint et résolu à l'aide de l'algorithme interior-point convex. Pour montrer l'efficacité de l'approche, plusieurs scénarios représentant l'évolution du contexte ont été développés et mis en œuvre sur une centrale existante. Les résultats obtenus ont été comparés au cas de figure sans management ; Des économies de coûts d'énergie significatives ont été constatées. Ce travail constitue un outil d'aide à la décision efficace pour le gestionnaire du micro-réseau et s'intègre parfaitement dans la politique générale des réseaux intelligents.

Mots clés : Gestion de l'énergie, problème d'ordonnement, système d'alimentation hybride, système d'alimentation photovoltaïque / éolienne / batterie / diesel, énergie renouvelable.

ملخص : غالبًا ما يتعامل الباحثون مع مسألة تحديد حجم محطات توليد الطاقة الهجينة على آفاق عدة سنوات. النهج المقترحة ضرورية بالتأكيد لتحسين تكاليف الطاقة. ومع ذلك ، لا يمكن أن تظل هذه الحلول مثالية طوال دورة حياة المحطة بسبب التطور الحتمي لعدد المستهلكين ، و كفاءة الاستهلاك ، والتدهور المحتمل لجزء من المحطة. في هذه البحث ، تم تطوير استراتيجية إدارة فعالة لمحطة هجينة متجددة. يعتمد على التوزيع الأمثل للموارد المختلفة للمحطة. الهدف الرئيسي هو تقليل تكلفة الطاقة المولدة مع ضمان جودة الخدمة المثلى ومراعاة تطور البيئة. تم تصميم إشكالية الجدولة كمعادلة تربيعية مقيدة و تم حلها باستخدام خوارزمية "Interior point convex"

لإظهار فعالية النهج ، تم تطوير وتنفيذ العديد من السيناريوهات التي تمثل السياق المتغير في محطة توليد كهرباء هجينة موجودة. تمت مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها مع حالة توزيع الطاقة دون إدارة ، وقد لوحظ اقتصاد كبير في تكاليف الطاقة.

يوفر هذا العمل أداة مساعدة فعالة في اتخاذ القرارات لمدير المحطة ، ويتناسب تمامًا مع السياسة العامة للشبكات الذكية.

الكلمات المفتاحية : إدارة الطاقة ، مشكلة الجدولة ، نظام الطاقة الهجين ، التوربينات الكهروضوئية/ طاقة الرياح/ بطارية / نظام طاقة الديزل/ الطاقة المتجددة.