

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة فرحات عباس - سطيف 1
UNIVERSITE FERHAT ABBES - SETIF 1
كلية التكنولوجيا
FACULTE DE TECHNOLOGIE
قسم الإلكترونيات
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

THESE

Pour l'obtention du diplôme de

Doctorat en Sciences

Option: Automatique

Par

LAYADI TOUFIK MADANI

Thème

Intégration des Méthodes d'Optimisation dans une Approche Productique

Soutenue le 04/02/2016 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. CHAMPENOIS Gérard	Université de Poitiers, France	Co-directeur de Thèse
Pr. TAHAR Bahi	Université Badji Mokhtar, Annaba	Examinateur
Pr. LABAR Hocine	Université Badji Mokhtar, Annaba	Examinateur
Pr. RADJEAI Hammoud	Université Ferhat Abbas, Sétif-1	Examinateur

Remerciements

Le travail présenté dans cette thèse s'inscrit dans le cadre des travaux de coopération définies entre le **Laboratoire d'Automatique de Sétif (LAS)** - Université Ferhat Abbas Sétif 1- Algérie, et le **Laboratoire d'Informatique et d'Automatique pour les Systèmes (LIAS)** de l'Université de Poitiers - France.

J'exprime toute ma gratitude et reconnaissance à mon directeur de thèse Monsieur **Mohammed MOSTEFAI**, Professeur à l'Université de Sétif, pour les précieux conseils qu'il m'a donnés et l'attention et le sérieux avec lesquels il a suivi de près mes travaux de recherche.

J'exprime également mes profonds remerciements à mon co-directeur de thèse, Monsieur **Gérard CHAMPENOIS**, Professeur à l'Université de Poitiers, qui m'a donné la chance de réaliser ces travaux dans des conditions très favorables. Je retiens ses conseils avisés et la disponibilité permanente dont il a toujours fait preuve.

Remerciements et profonde gratitude vont également aux membres de jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail : Monsieur **Lazhar RAHMANI**, Professeur à l'Université de Sétif, d'avoir accepté de juger mon travail et de présider le jury de soutenance de cette thèse. Monsieur **Bahi TAHAR** et Monsieur **Hocine LABAR**, Professeurs à l'Université d'Annaba, Monsieur **Hammoud RADJELI** Professeur à l'université de Sétif, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'être les examinateurs de cette thèse.

J'exprime mes profonds remerciements à Monsieur **Laïd ABED**, membre de l'Ordre de l'OIQ, spécialiste en validation aux Laboratoire Sterigen Inc du Québec, pour son aide et ses précieux conseils au long de toutes les années de recherche.

J'exprime également mes profonds remerciements aux autorités de notre ministère de l'enseignement supérieure et de la recherche scientifique, de m'avoir octroyé le bénéfice d'un stage résidentiel à l'étranger qui m'a été très bénéfique. **Je** suis très reconnaissant au directeur du Laboratoire d'Informatique et d'Automatique pour les Systèmes (**LIAS**) de l'université de Poitiers, Monsieur **Patrick Coirault**, pour l'accueil chaleureux et pour m'avoir donné l'opportunité d'exploiter le matériel et tous les moyens du laboratoire pour réaliser ces travaux. **Je** tiens à remercier également Monsieur **Jean-Paul Gaubert**, Professeur à l'Université de Poitiers et **Dhaker Abbes**, chercheur à l'université de Lille (L2EP) pour leur aide.

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

Dédicaces

Je dédie ce travail à mes parents et ma femme pour leur soutien inestimable au long de la période de préparation de la thèse. Je dédie également ce travail à mon fils *Mouhammed Nouari*, ma fille *Raya Imène*, mes frères, mes sœurs et toute ma famille.

Table des Matières

Liste des Acronymes et Nomenclatures.....	I
Liste des Figures.....	V
Liste des Tables.....	IX
Introduction Générale.....	1

Chapitre 1 : Etat de L'art Sur les Systèmes Multi-Sources

1.1 Introduction	7
1.2 Classification des systèmes multi-sources.....	8
1.2.1 Configurations hybrides ou non hybrides	8
1.2.1.1 Configuration PV	9
1.2.1.2 Configuration WT autonome	10
1.2.1.3 Configuration hybride PV+WT autonome avec et sans stockage	11
1.2.2 Configuration hybrides renouvelables avec sources fossiles.....	11
1.2.2.1 Configuration hybride PV/DG avec systèmes de stockage	11
1.2.2.2 Configuration hybride WT/DG avec systèmes de stockage	12
1.2.2.3 Configuration hybride PV/WT/DG+Batterie avec un BUS continu	12
1.2.2.4 Configuration hybride PV/WT/DG+ Batterie avec commutation.....	13
1.2.2.5 Configuration hybride PV/WT/DG+ Batterie avec deux BUS.....	14
1.3 Dimensionnement et optimisation des systèmes multi-source.....	15
1.3.1 Techniques de dimensionnement des systèmes multi-sources	16
1.3.1.1 Techniques de dimensionnement classiques	16
1.3.1.2 Techniques de dimensionnement modernes	16
1.3.2 Optimisation des systèmes multi-sources	17
1.4 Conclusion et problématique de thèse.....	18

Chapitre 2 : Modélisation des Systèmes Multi-Sources pour le Dimensionnement

2.1	Introduction	22
2.2	Modélisation du système multi-sources (SMS).....	23
2.2.1	Partie1 : Modèles de puissance des sources d'énergie	24
2.2.1.1	Modélisation du générateur solaire.....	24
2.2.1.2	Modélisation du générateur éolien.....	27
2.2.1.3	Modélisation du générateur diesel.....	28
2.2.1.4	Modélisation du système de stockage.....	32
2.2.1.5	Modélisation de la charge	33
2.2.2	Partie 2 : Modèles en énergie grise et analyse du cycle de vie du SMS.....	36
2.2.2.1	Principe de l'analyse du cycle de vie (Life Cycle Assessment)	37
2.2.2.2	Analyse du Cycle de Vie du générateur solaire.....	38
2.2.2.3	Analyse du Cycle de Vie du générateur éolien.....	42
2.2.2.4	Analyse du Cycle de Vie des systèmes de stockage	44
2.2.2.5	Analyse du Cycle de Vie des groupes électrogènes	45
2.2.3	Partie 3 : Modèles de vieillissement des sources d'énergie du SMS	54
2.3.1	Vieillessement des panneaux photovoltaïques	55
2.3.2	Vieillessement des générateurs éoliens	55
2.3.2.1	Vieillessement de la boîte à vitesse de la turbine éolienne	56
2.3.2.2	Vieillessement des pâles de la turbine éolienne	56
2.3.3	Vieillessement des générateurs diesel.....	57
2.3.4	Vieillessement des systèmes de stockage.....	59
2.3.4.1	Présentation des méthodes d'estimation de vieillissement des batteries	60
2.3.4.2	Description de la méthodologie de vieillissement proposée.....	61
2.3.4.3	Principe d'extraction des cycles de fonctionnement en utilisant l'ARF.....	69
2.3.4.4	Application de la méthodologie proposée pour l'estimation de vieillissement des batteries plomb-acide dans un SMS	70
2.3.4.5	Discussion des résultats sur l'étude de vieillissement	75
2.3.4.6	Discussion.....	77
2.4	Conclusion.....	78

Chapitre3 : Simulation Dynamique des Systèmes Multi-Sources pour le Dimensionnement

3.1	Introduction	80
3.2	Classification des méthodes de simulation.....	81
3.2.1	Simulations statique et dynamique	81
3.2.1.1	Notion de simulation statique	83
3.2.1.2	Notion de simulation dynamique	83
3.2.2	Simulation hybride (continue et discrète).....	84
3.2.3	Simulations déterministe et stochastique	84
3.3	Choix de simulation en vue du dimensionnement et optimisation du SMS (PV/WT/DG+Batterie)	85
3.4	Présentation de quelques outils de simulation des systèmes multi-sources	85
3.4.1	L'outil de simulation HOMER	85
3.4.2	L'outil de simulation iHOGA (Improved Hybrid Optimization by Genetic Algorithms).....	86
3.4.3	L'outil de simulation Hybrid2	86
3.4.4	L'outil de simulation PV DesignPro	86
3.4.5	L'outil de simulation TRNSYS	87
3.4.6	L'outil de simulation Pvsyst	87
3.4.7	L'outil de simulation energyPRO	87
3.4.8	L'outil de simulation Ipsys	88
3.5	Comparaison entre les outils de simulation présentés	88
3.6	Présentation du simulateur dynamique développé	91
3.6.1	Principe de Fonctionnement du simulateur dynamique.....	95
3.7	Application du simulateur dynamique pour la simulation des SMS	98
3.7.1	Influence du GD et du banc de stockage sur le dimensionnement	99
3.7.2	Influence des seuils de commande et la puissance du GD sur le dimensionnement	105
3.8	Conclusion.....	108

Chapitre 4 : L'optimisation de la Modélisation par la Méthode du Plan d'Expériences

4.1	Introduction	111
4.2	Détermination des modèles pour les SMS	111
4.2.1	Présentation de la méthode du plan d'expériences (PE)	111
4.3	Modélisation des SMS par la méthode du plan d'expériences	113
4.3.1	Algorithme pour la génération d'expériences	117
4.3.2	Résultats de modélisation par la méthode du plan d'expériences	119
4.4	Conclusion	127

Chapitre 5 : Dimensionnement et Optimisation des Systèmes Multi-Sources

5.1	Introduction	129
5.2	Classification des méthodes d'optimisation	129
5.2.1	Les algorithmes d'optimisation déterministes	130
5.2.2	Les algorithmes d'optimisation stochastiques	131
5.3	L'algorithme choisi pour l'optimisation du SMS	132
5.3.1	Description de l'algorithme d'optimisation hybride MADSGA	132
5.4	Optimisation du dimensionnement du SMS	135
5.4.1	Définition de la fonction objectif et les variables de décision	136
5.4.2	Définition des contraintes d'optimisation	138
5.4.2.1	Contraintes liées au coût de conception	138
5.4.2.2	Contraintes liées à la charge	139
5.4.3	Formulation du problème d'optimisation mono-objectif	140
5.4.4	Application de l'algorithme MADS pour l'optimisation mono objectif du SMS	141
5.5	Conclusion	153

Conclusion Générale et Perspectives..... 154

Bibliographie..... 158

Liste des Acronymes et Nomenclatures

A_{pv} [m^2] : Surface du champ solaire

A_{wt} [m^2] : Surface balayée par le rotor de la turbine de rayon

$A_{pv,min}$, $A_{pv,Max}$: La borne inférieure et la borne supérieure de surface du champ solaire

$A_{wt,min}$, $A_{wt,Max}$: La borne inférieure et supérieure de la surface balayée par le rotor de la turbine éolienne

C_{Bat} : Capacité du banc de batteries

$C_{n,min}$, $C_{n,Max}$: Les limites de variation de la capacité du banc de stockage

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

DOD : Profondeur de décharge (Depth Of Discharge).

EE : Energie grise (Embodied Energy)

EE_{DG0} [MJ] : Energies grises liées à la mise de disposition du générateur diesel sans carburant

EE_{FuelDG} [MJ] : Energies grises liées au carburant (Fuel) consommé par le générateur diesel

EE_{FDG} [MJ] : Energie grise pour la fabrication du générateur diesel

EE_{TDG} [MJ] : Energie grise liée au transport du générateur diesel

$EE_{PFuelDG}$ [MJ] : Energie grise pour la production (ou la fabrication) du carburant

$EE_{TFuelDG}$ [MJ] : Energie grise de transport du carburant

$EE_{ConsFuelDG}$ [MJ] : Energie grise consommée par le générateur diesel pendant son fonctionnement.

$Fuel_{DG}$ [L/h] : Le carburant consommé par le générateur pendant une heure

GD : Générateur Diesel

$I_{r,pv}$ [W/m^2] : L'irradiation instantanée ou horaire sur le panneau solaire

$I_{r,pv,NOCT}$ [W/m^2] : La moyenne de l'irradiation horaire sur le panneau solaire sous les conditions nominales ($800 W/m^2$).

I_r [wh/m^2] : Irradiation solaire

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

$\widehat{LPSP}(x)$: Paramètre de satisfaction estimé

N_{Bat} : Le nombre total de batteries

N_{Bats} : Le nombre de batteries connectées en série

N_{Batp} : Nombre de batteries connectées en parallèle

$N_{c(DOD)T}$: Nombre maximal de cycles à la température T

$N_{c(DOD)20}$: Nombre maximal de cycles à la température $20^{\circ}C$

$P_{Bat} [w]$: Puissance fournie par le banc de batteries

$P_{DG} [w]$: Puissance fournie par le générateur diesel

$P_{pv} [w]$: Puissance délivrée par le générateur solaire

$P_{wt} [w]$: Puissance fournie par la turbine éolienne

$P_{load} (t)$: Puissance demandée par la charge pendant un instant de temps t

$P_{Load} [Kwh/yr]$: Energie annuelle consommé par le profil de charge

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

$T_a [^{\circ}C]$: La température ambiante

$T_r [^{\circ}C]$: La température de référence qui vaut la valeur $25^{\circ}C$

$T [^{\circ}C]$: Température absolue

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

$T_{a,NOCT}$: Température ambiante sous des conditions de fonctionnement à température nominale (Nominal Operation Cell Temperature) et typiquement égale à $25^{\circ}C$;

$w_s [m/s]$: La vitesse du vent.

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

$Z [m]$: L'altitude et T_a la température ambiante.

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

V_{Bus} : Tension de bus DC.

Δt : Le pas de simulation.

$N_{LDG/Lifetime}$: Nombre de litres consommés par le générateur diesel pendant sa durée de fonctionnement.

$PCI_{FuelDG} [kwh/L]$: Pouvoir Calorifique Interne de combustion du carburant diesel (ou l'énergie interne du carburant diesel).

$EE_{MDG} [MJ]$: Coût de maintenance du GD.

Lifetime [h]: La durée de vie du générateur diesel.

ΔT : Variations de température liées aux pertes thermiques internes P_{Th} .

OP_{DG} : Temps de fonctionnement du GD.

R_a : Taux de vieillissement du banc de batterie PbA.

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

SOC_{min} [%]: Seuil minimum du banc de batteries

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

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

SN_{DG} : *Nombre de démarrage du GD.*

SD : *Simulateur dynamique.*

SMS : Systèmes Multi-Sources.

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.

VEB1: Batterie Ventilée avec plaques positives tubulaires et séparation spécifique (OPzS).

VEB2: Batterie Ventilée avec plaques positives tubulaires et séparation spécifique (OPzS Solar-Cells).

VEB3: Batterie Ventilée avec plaques positives tubulaires et séparation spécifique (OPzS Solar-Blocks).

$P_{re}(t)$: Puissance renouvelable.

$\bar{R}_a = \bar{T}_v$: *Le taux de vieillissement estimé du banc de stockage.*

$\overline{OT}_{DG} = \overline{TF}_{GD}$: *Le temps de fonctionnement estimé pour générateur diesel*

$\overline{SN}_{DG} = \overline{ND}_{GD}$: *Le nombre de démarrage du générateur diesel estimé*

$P_{GD,min}, P_{GD,Max}$: Les bornes de variation de la puissance délivrée par le générateur diesel.

SMS : Système multi-sources.

MADSGA : Algorithme d'optimisation direct adaptatif avec motif *Mesh Adaptive Direct Search & GA.*

$\bar{EE}(x_i)$: *La fonction objectif estimée qui représentée en termes d'énergie grise*

$\bar{R}_a(x)$: *Taux de vieillissement estimé ou prédit pour le banc de batteries*

ARF : *Algorithme Rainflow*

$\bar{SN}_{DG}(x_i)$: *Nombre de démarrage estimé ou prédit pour générateur diesel*

$SOCd_{Max,min}, SOCd_{Max,Max}$: *Les bornes de variation du seuil d'arrêt pour le générateur diesel*

η_G : Rendement global du générateur solaire

η_r : Rendement de référence du générateur solaire

η_d : Facteur de dégradation du générateur solaire

η_{gb} : Le rendement du variateur de vitesse.

η_g : Le rendement de la génératrice.

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.

η_{Bat} : Rendement de charge-décharge de la batterie.

Z_{Th} : L'impédance thermique composée d'une capacité thermique C_{Th} en parallèle avec une résistance thermique R_{Th} .

Liste des Figures

Figure 1.0 : Squelette d'organisation de la thèse.....	5
Figure 1. 1 : Configuration PV autonome.	10
Figure 1. 2 : Configuration PV + Batterie.	10
Figure 1. 3 : Configuration PV/WT/DG+ Batterie avec un BUS DC	13
Figure 1. 4 : Configuration PV/WT/DG+ Batterie avec commutateur.	14
Figure 1. 5 : Configuration PV/WT/DG + Batterie et deux BUS.	15
Figure 1. 6 : Principe d'optimisation en ligne des SMS.....	18
Figure 2. 1 : Relation entre les types de modélisation.....	23
Figure 2. 2 : Groupe électrogène Diesel de type ouvert [GDK15].....	29
Figure 2. 3 : Consommation des groupes électrogènes en fonction de la charge appliquée.	32
Figure 2. 4 : Profil de charge pour un habitat résidentiel.	34
Figure 2. 5 : Irradiation pour un an de mesure.	35
Figure 2. 6 : Température ambiante du site pour un an de mesure.	36
Figure 2. 7 : vitesse du vent pendant un an de mesure.....	36
Figure 2. 8 : Processus du cycle de vie des systèmes en générale.....	37
Figure 2. 9 : Cadre d'analyse de cycle de vie d'un panneau solaire.	39
Figure 2. 10 : Energie grise totale consommée à la fabrication du PV de type Multi Cristallin Silicium relative à quatre années différentes.	41
Figure 2. 11 : Distribution de l'énergie primaire d'un PV type Multi cristallin Silicium (MuC-Si) pour l'année 2007.	42
Figure 2. 12 : Cadre de l'ACV d'une turbine éolienne	43
Figure 2. 13 : Schéma bloc de l'ACV du Générateur Diesel	47
Figure 2. 14 : Schéma bloc de l'ACV du carburant Diesel.....	48
Figure 2. 15 Détermination de l'énergie grise en MJ pour la fabrication et l'utilisation d'un GD	49
Figure 2. 16 : Energie grise associée aux processus liés à la fabrication du générateur diesel de 4 kW et le carburant utilisé sur une durée de vie égale à 20 ans dans l'application visée.	52
Figure 2. 17 : Distribution des émissions à effet de serre sur une durée de vie du générateur diesel égale à 20 ans.	52

Figure 2. 18 : Distribution des causes de vieillissement du GD [KRH90]	59
Figure 2. 19 : Modèle pour l'étude de vieillissement de la batterie.	62
Figure 2. 20 : Nombre de cycles en fonction de profondeur de décharge DOD.	64
Figure 2. 21 : Influence de température sur le nombre maximal de nombre de cycles.	66
Figure 2. 22 : Modèle thermique de la batterie.	67
Figure 2. 23 : Evolution de taux de vieillissement par cycle $R_a/CDOD, T$ en fonction de DOD pour des températures différentes.....	69
Figure 2. 24 : Principe d'extraction des cycles en utilisant l'algorithme Rainflow.	70
Figure 2. 25 : Courant de batterie et SOC en fonction du temps ($DOD_{Max} = 70\%$ and $SOC_{max} = 100\%$)	72
Figure 2. 26 : Etat de charge de la batterie pour $DOD_{Max} = 30\%$ and $SOC_{max} = 100\%$..	72
Figure 2. 27 : profondeurs de décharge DOD(k) en fonction de nombre.....	73
Figure 2. 28 : Température ambiante T_a mesurée à partir du site.	74
Figure 2. 29 : Variations de la température interne ΔT de la batterie.	74
Figure 2. 30 : Variations de la température absolue T de la batterie durant un an.	75
Figure 2. 31 : Température moyenne T(k) pour chaque cycle.	75
Figure 2. 32 : Evolution du taux de vieillissement $R_{a(k)}$ en fonction de cycle k ($DOD_{Max} = 70\%$).....	76
Figure 2. 33 : Histogramme de nombre de cycles en fonction de DOD(k) pour trois valeurs de capacité.	77
Figure 3. 1 : classification des types de modèles.....	82
Figure 3. 2 : Modèles déterministes et probabilistes.	84
Figure 3. 3 : Spécifications essentielles d'un outil de dimensionnement	90
Figure 3. 4 : Schéma bloc du simulateur dynamique.	92
Figure 3. 5 : Schéma bloc du système multi-sources	93
Figure 3. 6 : Organigramme de fonctionnement du simulateur dynamique.	97
Figure 3. 7 : Variation temporelle de différence de puissance, l'état de charge et la puissance fournie par le GD sur un an ($C_n = 3500 PDG = 5.53kW$)	100
Figure 3. 8 : Variation temporelle des variables de sortie du simulateur sur un an ($C_n = 3500, PDG = 3.38 kW$).	100
Figure 3. 9 : Variations de la puissance délivrée par le générateur solaire et le générateur éolien pendant un an ($C_n = 4000 PDG = 2.53$).	101

Figure 3. 10 : Evolution du temps de fonctionnement du GD par an en fonction de sa puissance.	101
Figure 3. 11 : Variation du nombre de démarrage du GD par rapport à la puissance de fonctionnement.	102
Figure 3. 12 : L'évolution du taux de vieillissement du banc de batteries par rapport à la puissance du GD.	103
Figure 3. 13 : L'énergie produite par le GD pour chaque puissance de fonctionnement et pour différentes capacités.	104
Figure 3. 14 : Comparaison entre les paramètres de satisfaction LPSP pour trois valeurs différentes de capacité.	104
Figure 3. 15 : Evolution du nombre de démarrage du GD pour plusieurs seuils de fonctionnement.	106
Figure 3. 16 : Variation de l'excès d'énergie en fonction de la puissance du GD et à plusieurs seuils de fonctionnement.	106
Figure 3. 17 : Variation du paramètre de satisfaction en fonction de la puissance du GD et les seuils de fonctionnement.	107
Figure 3. 18 : Etat de charge de batterie et l'état du générateur diesel.	108
Figure 4. 1 : principe de conception et de modélisation par plan d'expériences.....	112
Figure 4. 2 : Relation entre le SD et la méthode du PE.	114
Figure 4. 3 : Principe de génération des expériences par le SD	117
Figure 4. 4 : Organigramme de modélisation par PE	118
Figure 4. 5 : La fonction observée de l'énergie grise avec $R^2=0.966$	122
Figure 4. 6 : La fonction observée de nombre de démarrages avec $R^2=0.961$	122
Figure 4. 7 : La fonction observée pour le temps de fonctionnement du GD avec $R^2=0.995$	123
Figure 4. 8 : La fonction observée du taux de vieillissement Ra de batterie avec $R^2=0.995$...	123
Figure 4. 9 : La fonction observée de la fonction LPSP avec $R^2=0.86$	124
Figure 4. 10 : Les expériences générées par le SD et celle générées par PE.....	125
Figure 4. 11 : Les expériences générées par le SD et celle générées par PE.....	125
Figure 4. 12 : Les expériences générées par le SD et celle générées par PE.....	126
Figure 4. 13 : Les expériences générées par le SD et celle générées par PE.....	126
Figure 4. 14 : Les expériences générées par le SD et celle générées par PE.....	127
Figure 5. 1 : Classification de s méthode s d'optimisation.....	130

Figure 5. 2 : Exemple de cadres dans MADS $P_k = p_1, p_2, p_3$	135
Figure 5. 3 : principe de sélection du point initial pour l’algorithme d’optimisation.	144
Figure 5. 4 : Solutions d’optimisation de dimensionnement obtenues pour un nombre de démarrage $SNDG \leq 800, SNDG \leq 600$ et $SNDG \leq 400$	146
Figure 5. 5 : Evolution du nombre de démarrage du GD et l’état de charge du banc de batteries pour $SNDG \leq 400$	147
Figure 5. 6 : Evolution du nombre de démarrage du GD et l’état de charge du banc de batteries pour $SNDG \leq 600$	147
Figure 5. 7 : Evolution du nombre de démarrage du GD et l’état de charge du banc de batteries pour $SNDG \leq 800$	148
Figure 5. 8 : Nombre de démarrage du générateur diesel pour les trois configurations présentées.	148
Figure 5. 9 : Zoom 1 représente les instants de commutation du générateur diesel.	149
Figure 5. 10 : Zoom 2 présente les instants de commutation du générateur diesel.	149
Figure 5. 11 : Zoom 3 présente les instants de commutation du générateur diesel.	150
Figure 5. 12: Zoom 4 présente les instants de commutation du générateur diesel.....	150
Figure 5. 13 : Zoom 5 présente les instants de commutation du générateur diesel.	151
Figure 5. 14 : Zoom 6 présente les instants de commutation du générateur diesel.	151
Figure 5. 15 : Puissance fournie par le générateur solaire et le générateur éolien pour $SNDG \leq 600$	152
Figure 5. 16 : Evolution du nombre de démarrage du GD et l’état de charge du banc de batteries pour $SNDG \leq 600$	152

Liste des Tables

Table 2. 1 : Comparaison entre plusieurs technologies des panneaux photo voltaïques.....	26
Table 2. 2 : Comparaison entre trois groupes électrogènes à des puissances différentes [GEI15]	30
Table 2. 3 .Caractéristiques des groupes électrogènes diesel de type CAT [TML13].	31
Table 2. 4 .Caractéristiques des groupes électrogènes diesel de type KIPOR [GKI15].	31
Table 2. 5 : Energie primaire de fabrication pour des technologies de panneaux différentes.	40
Table 2. 6 : variation de l'énergie grise pour la fabrication du PV type multi-Si cristallin à des années différentes.	40
Table 2. 7 : Modèles de coût énergétique pour des turbines éoliennes	44
Table 2. 8 : caractéristiques de quelques générateurs diesel à petite puissance	51
Table 2. 9 : Energie intrinsèque de production des matériaux et les émissions associées	51
Table 2. 10 : Nombre de cycles des batteries en fonction de la profondeur de décharge <i>DOD</i> . 63	
Table 2. 11 : Données d'entrée du simulateur dynamique.	70
Table 2. 12 : Rapports des rendements des convertisseurs	71
Table 2. 13 : Resistance interne et paramètres du modèle thermique.	74
Table 2. 14 : Taux de vieillissement pour des profondeurs de décharge différentes et <i>Cbat</i> = 250 Ah	76
Table 2. 15 : Taux de vieillissement pour des valeurs de capacités différentes et <i>DODMax</i> = 70%	77
Table 3. 1 : Quelques points forts et faibles pour différents outils de conception.	89
Table 3. 2 : Les valeurs des variables fixes pour les essais de simulation.	99
Table 4. 1 : Présentation de l'organisation de la base d'expériences	118
Table 4. 2 : Rendements des convertisseurs et de batterie	120
Table 4. 3 : Borne inférieure et borne supérieure des variables	120
Table 4. 4 : Facteurs des modèles obtenus par la méthode du PE.	120
Table 5. 1 : Borne inférieure et supérieure pour les variables de décision.....	137
Table 5. 2 : Paramètres d'optimisation de l'algorithme d'optimisation.....	143
Table 5. 3 : Points initiaux utilisés par l'algorithme d'optimisation	144
Table 5. 4 : Résultats d'optimisation pour des valeurs différentes de <i>SNDG</i>	145

Introduction Générale

Ces dernières années, les énergies renouvelables (**EnR**), non polluantes ont connu une exploitation croissante dans différents secteurs. Ces énergies renouvelables représentent des ressources très importantes aussi bien pour des besoins d'alimentation de nature autonome que pour des solutions de compensation avec des sources fossiles. Le potentiel énergétique pour ce type d'énergies varie en fonction de l'emplacement des régions dans le monde entier. Néanmoins, quel que soit la région ou le site énergétique considéré, l'installation d'un système de transformation de l'énergie renouvelable en énergie électrique est un processus qui nécessite des études approfondies au niveau du potentiel énergétique de la source renouvelable à transformer ainsi que des besoins de consommation.

Les systèmes de transformation de l'énergie sont généralement considérés comme des systèmes multi-sources (**SMS**) ou hybrides. Ces systèmes sont parfois appelés des micro-réseaux puisque ils sont composés des sources de natures différentes. On distingue deux grandes catégories de **SMS** :

- ❖ Les systèmes multi-sources purement renouvelables tels que les centrales d'électrification à base de générateurs photovoltaïques (PV) et/ou des générateurs éoliens avec des bancs de stockage.
- ❖ Les systèmes multi-sources par hybridation entre les sources renouvelables (PV, WT) et les sources fossiles (générateur diesel, turbine à gaz) avec des bancs de stockage.

Le stockage de l'énergie joue un rôle très important dans les systèmes d'alimentation électrique sans coupure, autonomes et non connectés au réseau. En effet, l'utilisation des systèmes de stockage offre des solutions en termes de continuité de fourniture d'énergie électrique, pour les systèmes autonomes. Parmi les moyens de stockage les plus couramment connus pour stocker de l'énergie électrique, on trouve les batteries électrochimiques de type plomb acide ou lithium et les super-condensateurs.

Ainsi, l'objectif des systèmes multi-sources est d'exploiter toutes les ressources naturelles (solaire, vent, biomasse, chaleur,...) non épuisables et non polluantes pour la

production de l'énergie électrique tout en minimisant la consommation produite par les énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon,...). En fait, la politique de l'exploitation des énergies renouvelables peut être résumée par deux aspects différents, un aspect économique et un aspect écologique.

Concernant l'aspect économique, l'utilisation de l'énergie renouvelable permet de minimiser le coût du kilowattheure délivré aux consommateurs. Ceci signifie qu'un système multi-sources autonome a la capacité de réduire le coût d'acquisition, le coût de maintenance et le coût de remplacement par rapport à un système purement fossile pendant sa durée de vie. En plus, les ressources fossiles posent des problèmes de durabilité.

Concernant l'aspect écologique, les énergies renouvelables sont des énergies moins polluantes par rapport aux sources d'énergies fossiles. En effet, les sources fossiles telles que les générateurs diesel dégagent des gaz à effet de serre lorsqu'ils produisent de l'énergie. Ceci, signifie que les pollutions dégagées par un générateur fossile varient proportionnellement par rapport à l'énergie produite.

Par ailleurs, l'inconvénient des systèmes multi-sources à base de sources purement renouvelables avec des systèmes de stockage (PV+Batterie, WT+Batterie ou PV/WT+Batterie) est que ces systèmes d'électrification sont parfois incapables de satisfaire parfaitement la charge demandée par le site. Aussi, le développement d'une installation d'électrification purement renouvelable permettant de couvrir la totalité de la puissance demandée exige un coût d'acquisition et d'installation plus élevé.

L'hybridation entre les générateurs renouvelables et les générateurs fossiles représente une solution performante, moins chère et durable dans les sites isolés. Alors, d'un point de vue économique, l'intégration des sources fossiles devient une bonne solution afin de servir parfaitement la puissance demandée par les sites isolés. Cependant, la détermination d'une solution hybride optimale nécessite un outil de dimensionnement et d'optimisation bien adapté au système multi-sources et au site considéré.

Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre d'un projet de coopération CMEP qui a été établi entre l'université de Sétif1-Laboratoire d'Automatique de Sétif (LAS), et l'université de Poitiers, France- Laboratoire d'Informatique et d'Automatique pour les Systèmes (LIAS) depuis l'année 2010. L'intitulé de ce projet est « ETUDE ET DEVELOPPEMENT DE SYSTEMES MULTI-SOURCES A BASE D'ENERGIES RENOUVELABLES : PHOTOVOLTAÏQUE / EOLIENNE ». Dans ce projet de recherche, deux parties ont été abordées. Une première partie qui traite la partie commande des systèmes renouvelables et une deuxième partie qui concerne l'optimisation du dimensionnement des systèmes multi-sources. Cependant, dans le cadre de

notre thèse, notre travail a été consacré et limité au dimensionnement et l'optimisation des systèmes multi-sources à base d'énergies renouvelables et fossiles avec banc de stockage (PHOTOVOLTAÏQUE / EOLIENNE / GENERATEUR DIESEL + Batterie). De plus, Ce travail nous a permis d'aborder des travaux complémentaires très intéressants et nécessaires pour l'accomplissement de cette thèse. Nous citons, à titre d'exemple, le développement d'un modèle qui estime le vieillissement des batteries de stockage plomb-acide de type VRLA (Valve Regulated Lead Acid).

Pour le dimensionnement du SMS, nous avons utilisé les données météorologiques réelles de deux sites géographiques : le premier site météorologique est un site tunisien qui se trouve à Sidi Daoud, et a bons potentiels d'irradiations solaire et éolien, dans lequel une ferme d'électrification éolienne a été installée. Un deuxième site localisé à Colorado aux États-Unis [NWT12], possède un potentiel éolien plus faible que celui du premier site, et un bon potentiel d'irradiation solaire.

Pour le dimensionnement et l'optimisation du SMS, nous avons utilisé un profil de charge réel en considérant que ce profil de charge se répète durant 25 ans.

Ainsi, pour traiter ce thème de recherche l'organisation de la thèse est présentée en cinq chapitres.

Dans le premier chapitre nous allons présenter un état de l'art sur les systèmes multi-sources (SMS) ou les systèmes hybrides (SH) les plus utilisés pour l'électrification des sites isolés. Dans ce chapitre, nous allons illustrer les différentes configurations des SMS et leurs points de différence. En plus, on va détailler les techniques de dimensionnement et d'optimisation des SMS traitées dans la littérature.

Dans le second chapitre, notre étude se focalise sur la modélisation globale du SMS. Pour cela, trois parties essentielles ont été abordées.

La première partie concerne la présentation des modèles de puissance pour les différentes sources d'énergies qui composent le SMS. Chaque source sera modélisée par un modèle de puissance propre qui permet de mesurer l'évolution de la puissance délivrée. Ces modèles de puissance sont nécessaires pour simuler le fonctionnement du système d'électrification, de mesurer les puissances des sources d'énergies renouvelables (PV et WT), la puissance fournie par le générateur diesel (GD) et la puissance stockée ou délivrée par le banc de batteries.

Dans la deuxième partie, des modèles en termes d'énergie grise traduisant le coût de chaque source d'énergie seront présentés. L'énergie grise des modèles est composée de

l'énergie utilisée pour la fabrication, l'énergie de maintenance et l'énergie de remplacement et le démantèlement pendant le cycle de vie du SMS. Ce modèle de coût est très important pour réaliser l'optimisation de dimensionnement du SMS.

Dans la troisième partie un modèle de vieillissement pour les batteries plomb acide (VRLA) sera développé en utilisant l'état de charge de la batterie et par l'application de l'algorithme de comptage Rainflow. Ce modèle de vieillissement est utilisé comme un critère pour le dimensionnement et l'optimisation du SMS.

Le troisième chapitre est consacré à la représentation d'un état de l'art sur la simulation dynamique des systèmes multi-sources pour le dimensionnement. A la fin de ce chapitre un simulateur dynamique (SD) a été développé pour le système multi-sources (PV/WT/DG+ Batterie) en se basant sur l'environnement de programmation Matlab-Simulink. Ce simulateur permet de traduire le comportement fonctionnel du SMS et représente un outil nécessaire pour le dimensionnement et l'optimisation de la configuration hybride choisie.

La modélisation du SMS par l'utilisation de la méthode statistique du plan d'expériences sera détaillée dans le quatrième chapitre. Pour cela, la génération des données de modélisation est réalisée à l'aide du simulateur dynamique développé au troisième chapitre.

Le dimensionnement et l'optimisation du SMS font l'objectif du dernier chapitre. Par l'application de l'optimisation mono objectif sur les méta-modèles obtenus par la méthode de plan d'expériences. Nous allons mettre en œuvre des algorithmes d'optimisation directs pour optimiser le dimensionnement et le fonctionnement du SMS. Le type de problème d'optimisation traité est un problème non linéaire avec des contraintes non linéaires.

En fin, on terminera la thèse par une conclusion générale résumant une discussion sur les résultats obtenus par ces travaux de recherche. Des perspectives

La [Figure 1](#) montre le squelette d'organisation de la thèse.

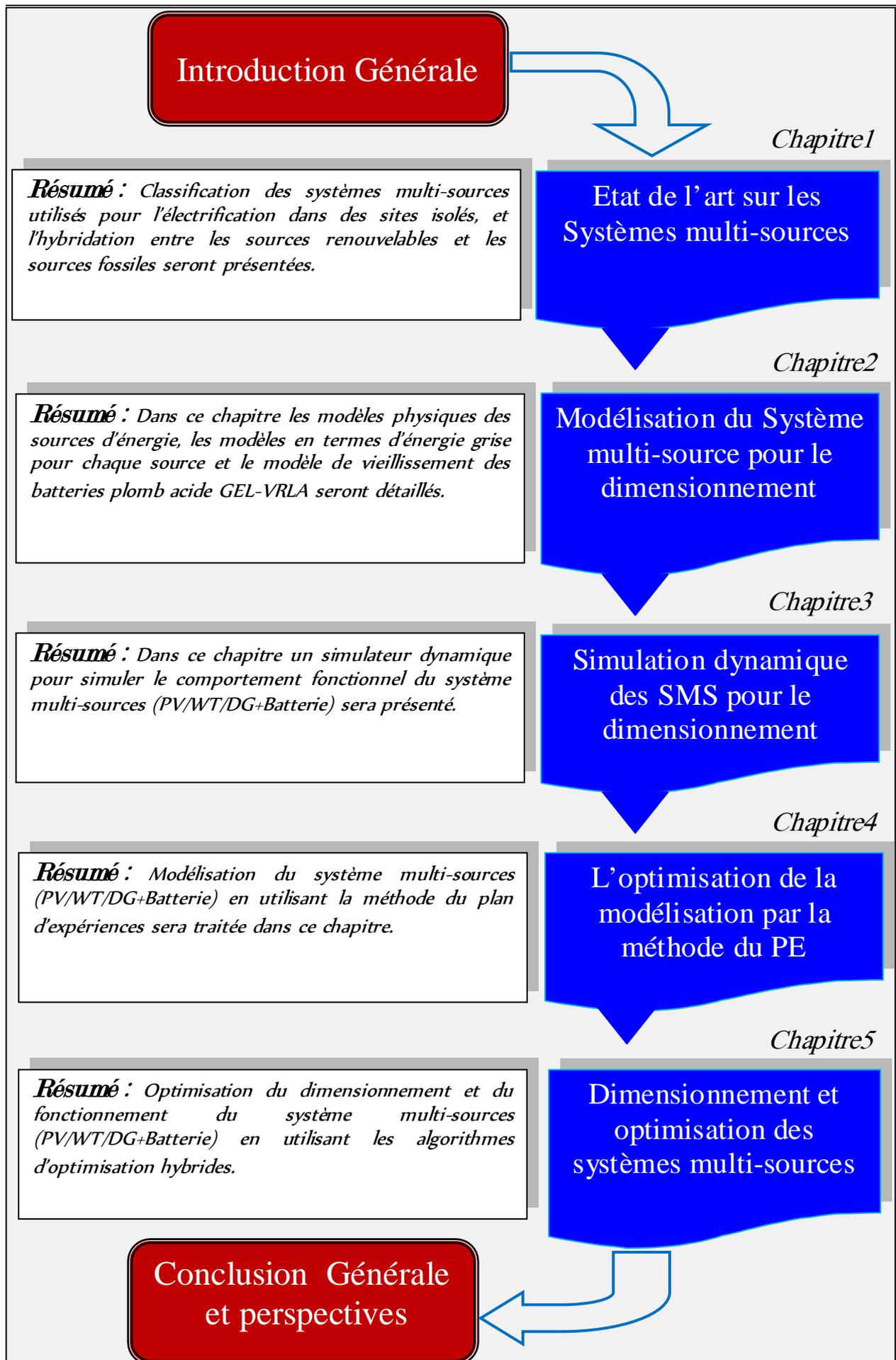


Figure 1 : Squelette d'organisation de la thèse.

ETAT DE L'ART SUR LES SYSTEMES MULTI-SOURCES

1.1 Introduction

Les systèmes multi-sources (SMS) utilisés pour des besoins d'électrification dans des sites isolés sont des systèmes conçus à base de sources d'énergie de natures différentes. L'hybridation entre les sources renouvelables (source solaire, source éolienne, etc....) et les sources fossiles (groupes électrogènes) représente une des solutions les plus avantageuses pour les systèmes d'électrification. En effet, par cette hybridation il est possible de minimiser le coût des systèmes (coût de l'énergie consommée) d'un côté et d'améliorer leurs performances d'un autre côté [AKM11][RWW12] [ZWe07].

Les performances des systèmes d'électrification peuvent être définies par la durée de vie du système global, et la qualité de la puissance fournie à la charge. Cependant, le choix de la taille des sources renouvelables et les systèmes de stockage par rapport à la source fossile joue un rôle très important. En effet, le coût des systèmes d'électrification dépend d'une part de la taille des sources d'énergie utilisées et d'autre part, de la méthodologie utilisée pour la gestion d'énergie dans le système. Ainsi, pour construire un système multi-sources avec un coût minimal et un fonctionnement optimal vis-à-vis d'un profil de charge défini, il est nécessaire d'optimiser le système. Cependant, l'optimisation de tel système devient une tâche difficile. En effet, connaissant ses grandeurs d'entrée et ses réponses de sortie, l'optimisation du SMS devient une tâche très complexe. Dans le cas de notre étude le nombre de variables caractérisant le SMS est important avec une durée de fonctionnement du SMS qui s'étale sur un horizon de 25 ans. En plus, les données météorologiques du site rend la simulation du SMS trop lourde. Ainsi, devant toutes ces contraintes, l'optimisation en ligne pour le SMS n'est pas toujours faisable.

Actuellement les systèmes multi-sources SMS (ou les systèmes hybrides) sont très utilisés pour la production de l'énergie. L'énergie produite par un système hybride peut être thermique, mécanique ou électrique. Ainsi, la conception d'un SMS s'effectue généralement en fonction de l'objectif désiré. Dans l'optique de notre travail, les systèmes hybrides qui nous intéressent sont les systèmes qui permettent de produire de l'énergie électrique. Un système d'électrification hybride est un système qui comporte plusieurs sources d'énergie. Chaque source d'énergie permet de générer de l'électricité à partir d'une source renouvelable ou une source fossile. Généralement, les SMS sont utilisés comme des micro-réseaux (des microcentrales) connectés entre eux pour l'électrification des sites isolés non connectés au réseau ou des sites connectés au réseau. L'objectif de connecter les SMS avec les réseaux d'électrification conventionnels est pour compenser la puissance d'alimentation.

Dans les sites isolés, les systèmes hybrides d'électrification sont des systèmes autonomes non connectés au réseau. Dans ce type d'électrification la présence des générateurs fossiles avec les générateurs renouvelables est très importante. Parmi, les systèmes hybrides les plus utilisés pour l'électrification on distingue : les systèmes purement renouvelables avec un banc de stockage (PV+Batteries, WT+Batteries ou PV/WT + Batterie) et les systèmes hybrides à base d'énergies renouvelables et d'énergies fossiles (PV/Diesel + Batteries, WT/Diesel+ Batteries ou PV/WT/Diesel+Batterie).

Dans l'optique de notre travail, les systèmes hybrides qui nous intéressent sont les systèmes qui permettent de produire de l'énergie électrique à partir de sources renouvelables « PV + Wind » et une source fossile « générateur diesel » couplés à un système de stockage « Batteries de type Plomb Acide ».

Dans le présent chapitre notre objectif est de présenter premièrement, un état de l'art sur les différentes configurations des SMS (PV/WT/DG+Batterie) utilisés dans les sites isolés d'une part, et les caractéristiques des configurations hybrides d'autre part. Ensuite, nous allons aborder les techniques de dimensionnement et d'optimisation des SMS les plus utilisées. A la fin de ce chapitre, la problématique de la thèse sera présentée.

1.2 Classification des systèmes multi-sources

La nature des sources d'électrification utilisées pour la conception des systèmes multi-sources dépend de plusieurs paramètres. Parmi ces paramètres on distingue: la disponibilité de l'énergie dans le site, le coût global de conception et d'installation, la nature des variations du profil de charge, la qualité de l'énergie demandée, la fiabilité de fonctionnement ou la qualité de service (QoS) et les contraintes environnementales. En plus, les performances des SMS sont aussi en relation directe avec la configuration choisie [AKM11]. Les systèmes multi-sources d'électrification sont classifiés en trois grandes configurations différentes :

- ❖ Les configurations hybrides ou non hybrides;
- ❖ Les configurations hybrides renouvelables avec sources fossiles.

1.2.1 Configurations hybrides ou non hybrides

Les systèmes d'électrification **non hybrides** sont des systèmes basés sur l'utilisation d'une seule source d'énergie. Par exemple un système renouvelable **non hybride** peut être un générateur composé de plusieurs panneaux PV, d'un générateur éolien, dans le cas de sources renouvelables, ou d'un groupe électrogène dans le cas non renouvelable. Cependant, ce type de configuration est rarement utilisé sauf pour les groupes électrogènes qui sont utilisés comme des

générateurs de secours pendant l'absence de l'alimentation par les réseaux publics. Les groupes électrogènes autonomes sont connectés généralement en parallèles pour alimenter de façon continue la charge. Les groupes diesel sont généralement dimensionnés pour répondre à la demande des instants de pointe à puissance nominale, comme ils peuvent fonctionner à très faible charge pendant les heures creuses pendant la journée et la nuit [AKM11][VNa10]. Les problèmes majeurs des stations d'électrification dans les sites isolés à bases des groupes diesel peuvent être résumés par les points suivants :

- Coût du kilowattheure élevé à cause de l'augmentation des coûts de carburant et du transport ;
- Des émissions à effet de serre et des pollutions affectent directement l'environnement ;
- Le fonctionnement des générateurs à faible puissance peut causer des combustions incomplètes ce qui entraîne une augmentation des coûts de maintenance ;
- Un bruit insupportable dans le cas où le nombre de groupes diesel est important et mal isolé phoniquement.

Les solutions **non hybrides** renouvelables ne sont pas très utilisées à cause de leurs coûts et leurs disponibilités. Ainsi, les configurations **hybrides renouvelables** sont les plus nombreuses [AKM11]. Dans ce chapitre notre étude sera limitée à quelques sources renouvelables. Parmi les sources les plus utilisées on trouve la source solaire, la source éolienne, la source thermique et la source de biomasse. L'hybridation entre les sources renouvelables permet l'exploitation de toutes les ressources renouvelables afin de construire un système d'électrification performant. Le coût de conception du système global dépend strictement de la pénétration de la source renouvelable utilisée. En effet, chaque source d'énergie dans le système est développée avec son coût propre. Donc, le coût de la configuration hybride peut varier en fonction de la région dans laquelle elle est installée. Suivant la littérature, les caractéristiques d'un système d'électrification autonome seul ne sont pas les mêmes que pour un système hybride.

1.2.1.1 Configuration PV

Les configurations PV, peuvent être utilisées comme des systèmes connectés aux réseaux ou comme un système d'électrification autonome. Ce type de configurations est conçu généralement pour alimenter les charge de type DC et/ou AC de façons indépendantes du réseau [HTT10] **Figure 1.1**. Cependant, la configuration PV autonome est incapable de satisfaire la consommation dans le cas où les irradiations sont faibles pendant la journée et toute la nuit. Pour cela cette configuration sera remplacée par la configuration hybride PV + système de stockage comme illustré par la **Figure 1.2**. Ainsi, les systèmes de stockage vont travailler quand les

générateurs solaires ne permettent pas de fournir la charge. Parmi les avantages des systèmes d'énergie photovoltaïques

- Utilisation dans une large variété d'applications ;
- Une durée de vie longue (jusqu'à 30 ans) avec un minimum de maintenance ;
- Fonctionnement silencieux sans bruits ou vibrations car les PV ne comportent pas de parties mobiles.

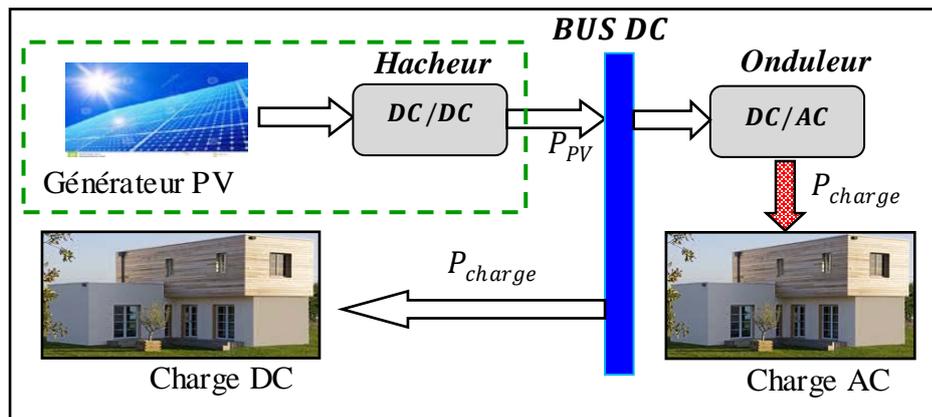


Figure 1.1 : Configuration PV autonome.

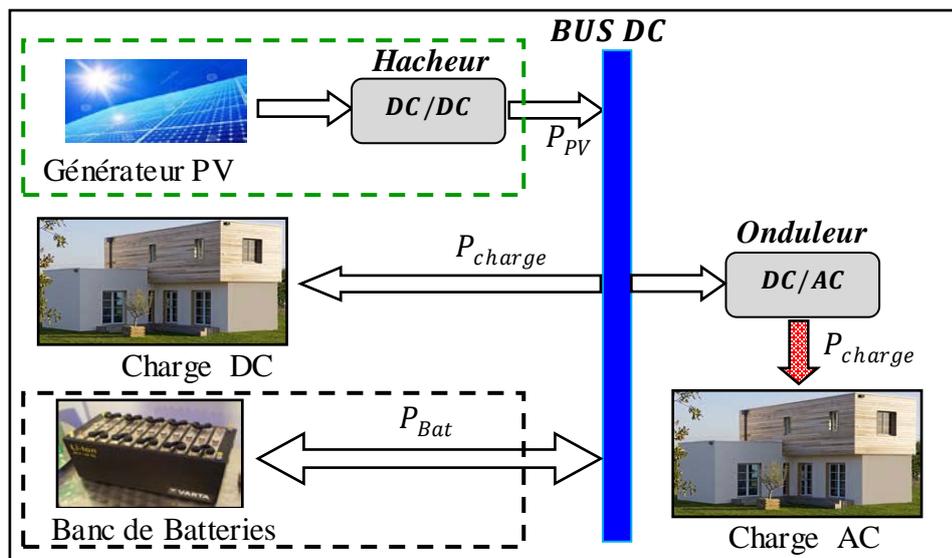


Figure 1.2 : Configuration PV + Batterie.

1.2.1.2 Configuration WT autonome

Les turbines éoliennes sont parmi les générateurs les plus utilisés pour la conversion de l'énergie renouvelable du vent dans les sites isolés. Les turbines éoliennes sont considérées efficaces lorsque la vitesse du vent dans le site ne diminue pas en dessous d'un certain niveau pour un type d'éolienne bien définie. Les turbines éoliennes n'occupent pas une superficie d'installation grande par rapport aux générateurs photovoltaïques. Par contre, elles nécessitent des opérations de contrôle et de maintenance permanentes car elles comportent des parties

mobiles. L'utilisation de WT de manière proche aux habitats résidentiels est généralement évitée, puisqu'elle produit des bruits non supportables avec des risques d'endommagement probables.

Dans la plupart des sites isolés, les systèmes d'électrification autonomes éoliens ne sont pas suffisants. En effet, la vitesse du vent dans les sites ne progresse pas en un régime constant pour produire l'énergie suffisante pour alimenter la charge. Pour cela, une hybridation entre les générateurs éoliens et les batteries de stockage sera nécessaire afin d'avoir une continuité de fourniture de l'énergie à la charge. Cependant, lorsque la demande de charge augmente, le coût de l'installation augmentera strictement en fonction du nombre des turbines et de la taille du banc de stockage.

1.2.1.3 Configuration hybride PV+WT autonome avec et sans stockage

Les configurations d'électrification de type PV+WT sont utilisées généralement dans les régions où le potentiel solaire et le potentiel éolien sont disponibles en même temps. Par l'hybridation entre les générateurs solaires et éoliens on peut étendre la plage de fonctionnement de la production d'énergie renouvelable [TRe12].

Cette configuration hybride renouvelable utilise les batteries conventionnelles et les super-condensateurs comme des moyens de stockage pour assurer la continuité d'alimentation.

D'après les caractéristiques des configurations hybrides purement renouvelables avec des systèmes de stockage il semble que, dans certaines régions qui sont géographiquement isolées, ces configurations ne représentent pas toujours des solutions optimales pour l'électrification. Dans ce cas, l'intégration des sources d'énergie non renouvelables dans les configurations renouvelables va devenir une des solutions favorables pour des besoins d'électrification rurales ou urbaines.

1.2.2 Configuration hybrides renouvelables avec sources fossiles

Selon les besoins d'électrification dans les sites isolés, les sources fossiles avec les systèmes renouvelables représentent les techniques d'électrification les plus fréquemment rencontrées [AKM11]. Plusieurs types de sources fossiles peuvent être utilisés.

Cependant, dans le cas de ce travail la source fossile utilisée avec les systèmes renouvelables sera limitée aux générateurs diesel. Dans la suite on va expliquer quelques configurations hybrides connues.

1.2.2.1 Configuration hybride PV/DG avec systèmes de stockage

Cette configuration d'électrification parmi les configurations les plus utilisées dans les sites isolés [DYN12]. Par rapport aux systèmes d'électrifications autonomes PV ou générateur

diesel seul, la configuration hybride est moins coûteuse avec des émissions à effet de serre réduites [MSI11]. Les avantages de cette configuration sont résumés comme suit [HTT10]:

- Réduction des coûts de fonctionnement avec minimisation de la consommation du carburant et un faible coût de maintenance pour le générateur PV.
- Amélioration dans les performances du système à cause de la fiabilité de fonctionnement et de continuité dans l'électrification.
- Optimisation dans la durée de vie du générateur diesel en minimisant le nombre d'heures de fonctionnement.
- Augmentation du cycle de vie de batterie par la gestion de l'énergie entre le générateur diesel et la batterie.

1.2.2.2 Configuration hybride WT/DG avec systèmes de stockage

Un système éolien-diesel hybride est un système autonome de production d'électricité en utilisant des générateurs éoliens et des générateurs diesel [HNa88] [DWi13]. Dans la plus parts des cas, les deux générateurs sont connectés à système de stockage qui permet d'absorber la puissance délivrée par les générateurs éoliens et/ou les générateurs diesel pour une continuité d'alimentation. En général dans les sites isolés, différents types de systèmes de stockage peuvent être utilisés avec la configuration WT/DG, des batteries conventionnelles (plomb acide, lithium, nickel) ou par la technique de l'air comprimé [HIA12][YRa12]. Le choix du système de stockage joue un rôle très important vis-à-vis du coût de conception et des contraintes environnementales.

1.2.2.3 Configuration hybride PV/WT/DG+Batterie avec un BUS continu

Dans cette configuration hybride, les sources d'énergie sont connectées sur un même bus continu DC via des modules d'adaptation ou de conversion de puissance. La **Figure 1.3** montre cette configuration.

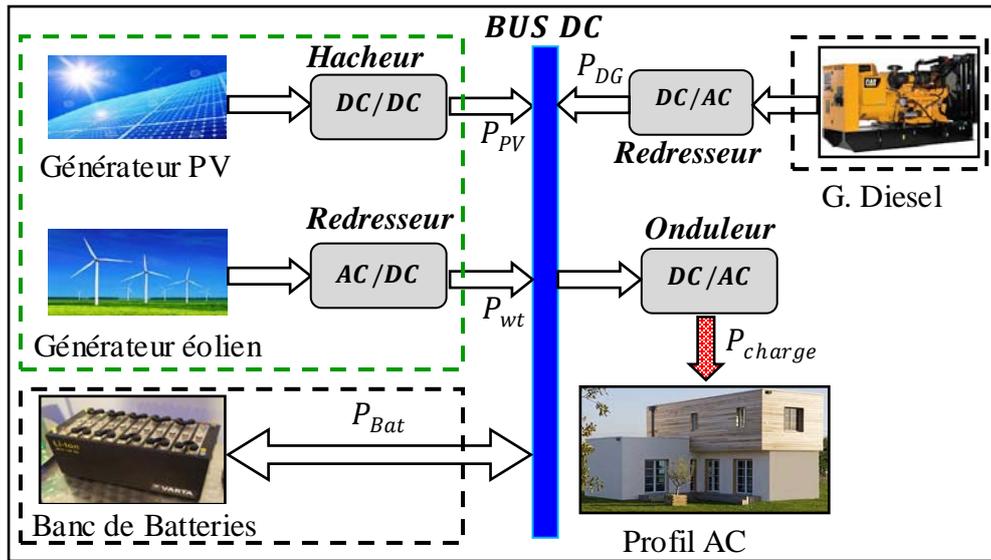


Figure 1.3 : Configuration PV/WT/DG+ Batterie avec un BUS DC

A partir de la **Figure 1.3**, on constate que toutes les sources d'énergie fournissent de la puissance sur le même bus continu. Pour chaque source, un convertisseur ou un contrôleur de puissance est associé. Ces modules de conversion sont gérés par des algorithmes de contrôle afin d'assurer le bon fonctionnement de l'installation d'une part et de transférer le maximum de puissance d'autre part. Les caractéristiques de cette configuration sont les suivantes :

- Ce type de configuration est réservé aux systèmes d'électrification à petite échelle ;
- Toutes les puissances alternatives sont converties en puissances continues ;
- Le fonctionnement du générateur diesel nécessite une gestion pour la commande de démarrage et l'arrêt ;
- Le fonctionnement du générateur diesel est configuré soit en fonction de l'état de la batterie soit en fonction du profil de la charge ;
- Dans cette configuration il existe des pertes générées par les convertisseurs ;
- Le vieillissement du GD dépend du type de gestion par rapport aux autres sources ;
- Le vieillissement du banc de stockage dépend de nombre de cycle de charge-décharge effectué.

1.2.2.4 Configuration hybride PV/WT/DG+Batterie avec commutation

La configuration hybride avec commutation présentée à la **Figure 1.4** est basée sur deux bus différents pour l'électrification. La première technique d'électrification utilise directement le générateur diesel sans compensation par les générateurs renouvelables ou banc de stockage. Dans ce cas, la puissance délivrée par le GD doit être égale à la puissance nominale demandée par de la charge.

Pour optimiser le fonctionnement du GD par rapport à sa durée de vie et minimiser l'excès de l'énergie il est nécessaire de configurer le GD à vitesse variable.

En première position du commutateur, l'alimentation seule par le GD supprime les pertes produites par les convertisseurs.

La deuxième position du commutateur est fondée sur l'utilisation de toutes les sources d'énergies (renouvelables et GD) et le banc de stockage. Ce type d'alimentation représente le même cas que la première configuration en utilisant un seul bus. La commutation entre les sources d'électrification est réalisée par un commutateur automatique.

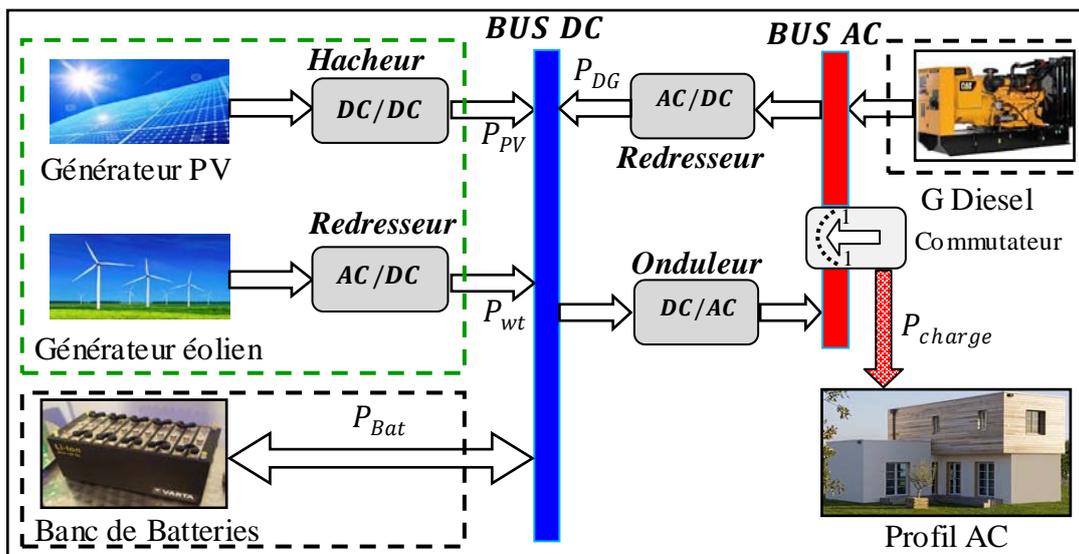


Figure 1. 4 : Configuration PV/WT/DG+ Batterie avec commutateur.

1.2.2.5 Configuration hybride PV/WT/DG+ Batterie avec deux BUS

Dans cette configuration toutes les sources d'énergie peuvent alimenter la charge. Selon la Figure 1.5, on constate que seul un onduleur bidirectionnel est utilisé pour le transfert de puissance délivrée par les générateurs renouvelables et la batterie de stockage vers la charge, ou la puissance fournie au banc de stockage. Dans ce type d'alimentation, le générateur diesel peut fonctionner avec une puissance inférieure à la puissance nominale demandée par la charge. En effet, les générateurs renouvelables ou le banc de stockage peuvent compenser l'insuffisance du GD.

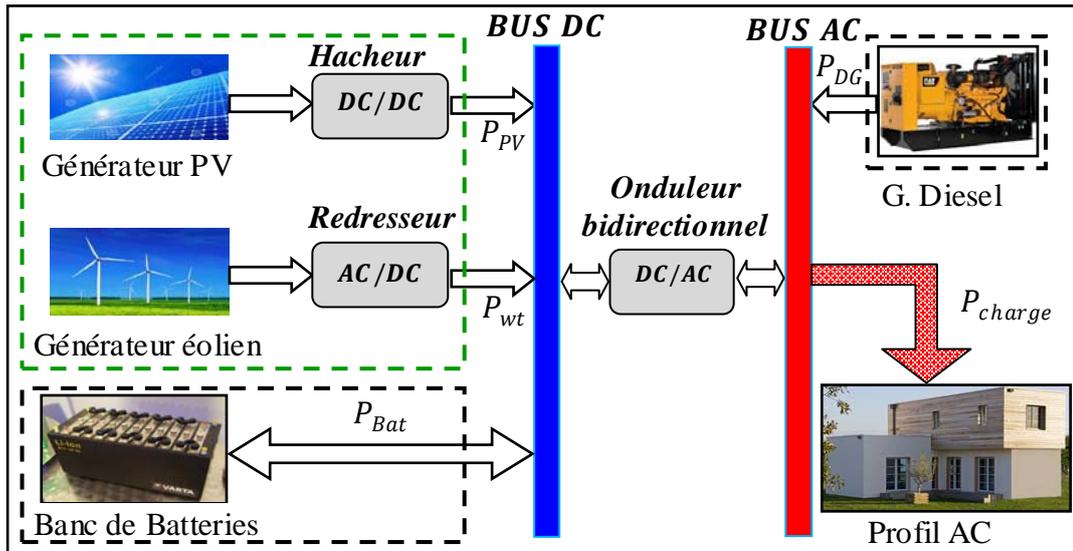


Figure 1. 5 : Configuration PV/WT/DG + Batterie et deux BUS.

Cette troisième configuration hybride est caractérisée par les points principaux suivants :

- La méthodologie de gestion du GD permet d'optimiser la durée de vie du GD et le cycle de vie du banc de stockage ;
- Le générateur diesel a la possibilité de fonctionner avec une puissance variable.

D'après les trois configurations hybrides (PV/WT/DG + Batterie) présentées précédemment on observe que, dans certaines configurations le fonctionnement en parallèle du générateur solaire et du générateur éolien minimise le temps d'opération du générateur diesel pour éviter le fonctionnement en pleine charge. En effet, le fonctionnement du générateur diesel à vitesse maximale a une influence directe sur sa durée de vie.

1.3 Dimensionnement et optimisation des systèmes multi-source

Le dimensionnement d'un SMS signifie l'obtention des dimensions de toutes les sources d'énergie connectées sur le même réseau. Donc, pour simuler le fonctionnement du système global il est important d'exploiter les modèles traduisant son comportement fonctionnel. Par conséquent, la modélisation des SMS devient une étape essentielle pour le dimensionnement.

Le dimensionnement des systèmes multi-sources représente une phase primordiale pour le développement ou la conception des systèmes d'électrification.

En effet, par l'outil de dimensionnement, il est possible de simuler le fonctionnement des sources d'énergie, de tester les algorithmes de gestion de systèmes et d'évaluer les performances du système.

1.3.1 *Techniques de dimensionnement des systèmes multi-sources*

Suivant la littérature, les techniques de dimensionnement des systèmes multi-sources peuvent être divisées en deux grandes catégories : les techniques classiques et les techniques modernes.

1.3.1.1 *Techniques de dimensionnement classiques*

Le dimensionnement par ces techniques est fondé sur l'évaluation des puissances fournies par les différentes sources d'énergies connectée au système par rapport à un profil de charge bien défini. Aussi, ces techniques n'utilisent aucun logiciel spécifique pour le dimensionnement et ne prennent pas en considération les conditions météorologiques réelles du site considéré.

Par ces techniques, les dimensions obtenues ne représentent pas forcément des valeurs optimales pour la configuration hybride. En plus, les profils de charge utilisés pour le dimensionnement sont très limités sur des dizaines d'heures avec un pas de mesure très large. Cette technique est applicable pour les systèmes d'électrification qui sont caractérisés par un nombre de source réduit (PV+batterie par exemple) et un profil de charge limité.

Le dimensionnement d'un système hybride à grande échelle comportant des sources d'énergie renouvelables différentes et des sources fossiles pour un profil de charge aléatoire, et sur un cycle de fonctionnement long, devient compliqué, voire impossible. C'est pour cette raison qu'il est nécessaire de trouver des techniques de dimensionnement plus puissantes.

1.3.1.2 *Techniques de dimensionnement modernes*

Ces techniques de dimensionnement sont basées sur l'utilisation des plateformes ou des outils de calcul performants. Ces plateformes sont développées à base de logiciels informatiques bien adaptés aux systèmes multi-sources. Parmi les logiciels les plus couramment utilisés pour la conception de ces plateformes, nous citons : langage C, Fortran, et Matlab/Simulink.

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.

Parmi les outils de dimensionnement modernes, actuellement les plus connus, on distingue : les outils HOGA, HOMER et HYBRID2.

Le détail de quelques outils de dimensionnement sera présenté dans le chapitre trois. Ces outils de dimensionnement sont réservés aux systèmes multi-sources de nature renouvelable ou fossile avec des bases de données météorologiques mesurées sur une période de plus d'un an et des pas de mesures très petits.

Dans le cas de notre travail nous allons développer un simulateur dynamique pour le dimensionnement des SMS en se basant sur l'environnement de programmation Matlab/Simulink. Le détail de ce simulateur dynamique sera développé dans le chapitre trois.

1.3.2 Optimisation des systèmes multi-sources

L'optimisation des SMS représente un moyen qui nous permet d'optimiser la configuration des systèmes d'électrification. Dans le cas général, le choix de la technique d'optimisation est très important pour la détermination de la configuration optimale du système.

D'après les travaux de recherche consultés, il existe deux approches différentes pour optimiser les SMS :

La première consiste à utiliser une des plateformes existantes de dimensionnement et d'optimisation des SMS [AAJ15][LAr11][TLa06]. Parmi ces plateformes nous citons par exemple l'outil HOGA, l'outil PVsyst et l'outil HYBRID2 qui seront présentées dans le chapitre 3.

La deuxième consiste à développer un modèle mathématique de simulation pour les SMS [ADh12][KEK06][BSB96][BZh14][OEa10][TML13][TML15a]. Pour un système d'électrification, le fonctionnement des modèles nécessite des grandeurs d'entrée afin de générer des réponses sur les sorties. Les grandeurs d'entrées sont généralement des paramètres de conception ou des données météorologiques. Les données météorologiques sont introduites sous forme de vecteurs remplis par des prélèvements ou des mesures bien définis. Le principe d'optimisation est fondé sur l'utilisation des entrées et des sorties du modèle de simulation comme le montre la **Figure 1.6**. Pour cela, un algorithme d'optimisation doit travailler sur l'évaluation de la fonction de coût du système global à partir de chaque exécution effectuée par le modèle de simulation.

Donc, afin de balayer tout l'espace de recherche par l'algorithme d'optimisation, il est nécessaire de générer toutes les configurations possibles du SMS. Ce type d'optimisation coûte trop cher en termes de temps. Pour réaliser plusieurs itérations par l'exécution d'un système multi-sources complexe qui possède un nombre important de variables, on a besoin d'un temps de calcul plus

long. En plus, la recherche de la configuration optimale, en utilisant un algorithme d'optimisation, prend aussi un temps de recherche qui varie en fonction du type d'algorithme utilisé.

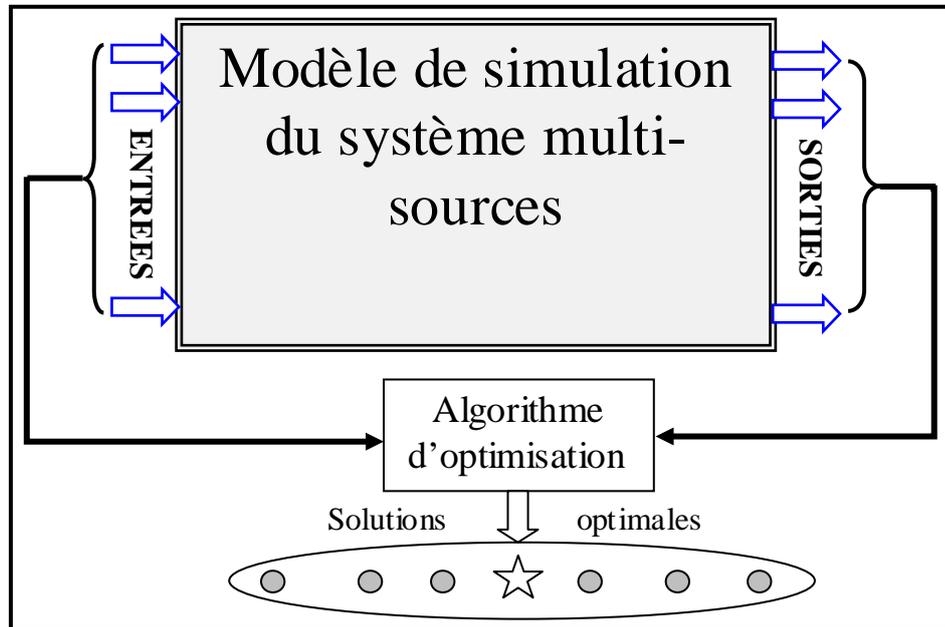


Figure 1. 6 : Principe d'optimisation en ligne des SMS.

1.4 Conclusion et problématique de thèse

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art sur les SMS 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.

Dans un second temps, une brève présentation des techniques classiques et modernes pour le dimensionnement et l'optimisation de ces configurations hybrides a été faite. Alors, d'après cet état de l'art, un ensemble de problématiques liées à la conception des SMS de natures différentes ont été tirées. Parmi les problématiques les plus prépondérantes nous citons :

- ❖ Dimensionnement des **SMS** avec des modèles de vieillissement des sources d'énergie (systèmes de stockage et générateur diesel);
- ❖ Dimensionnement des SMS en introduisant des contraintes de fonctionnement (nombre de démarrage du générateur diesel, nombre de remplacement du banc de stockage) ;
- ❖ Dimensionnement et optimisation des SMS (PV/WT/DG + Batteries) en introduisant le coût pour toutes les sources d'énergie du SMS ;
- ❖ Dimensionnement et optimisation des SMS sur un horizon de plus de 20 ans ;
- ❖ Temps d'optimisation important pour les SMS complexes caractérisés par un nombre important de variables.
- ❖ Difficulté de l'optimisation en ligne des SMS par l'utilisation des entrées et des sorties du simulateur des SMS. Cette difficulté est due à l'importance de la base de données traitée par le simulateur à chaque exécution.

Le traitement de l'ensemble des points cités précédemment permet de donner des informations suffisantes sur les SMS, ce qui augmente la qualité des modèles de dimensionnement et d'optimisation. Dans l'optique de notre étude, la méthodologie proposée pour la résolution des problématiques de dimensionnement et d'optimisation de la configuration hybride (PV/WT/DG+ Batteries) sera traitée de la manière suivante :

Premièrement, nous allons travailler sur le développement d'un modèle de simulation dynamique permettant de simuler le comportement fonctionnel des SMS (PV/WT/DG+ Batteries). Le fonctionnement de ce modèle de simulation nécessite les vecteurs d'entrée comportant les données météorologiques du site isolé, le profil de charge et les variables de conception des SMS. La validation de ce simulateur dynamique sera réalisée par un ensemble de simulations pour des sites géographiques bien définis.

Deuxièmement, des modèles de vieillissement pour les sources d'énergies du système multi-sources seront développés. Ces modèles de vieillissement permettent d'évaluer la durée de vie des générateurs de puissance dans un SMS par rapport à leurs utilisations dans le site. Cependant, dans le cas de cette étude nous allons développer un modèle de vieillissement pour les batteries plomb-Acide type **VRLA** (Valve Regulated Lead-Acide battery). Alors, ce modèle de vieillissement permet de mesurer le taux de dégradation annuel en fonction de son utilisation au sein du SMS. Pour tester le modèle de vieillissement de la batterie tout en prenant en considération l'effet de la température de fonctionnement, on installe le banc de batteries dans le SMS pour un profil de charge annuel connu. Donc, la dégradation du banc de stockage au sein du SMS dépend de ses sollicitations de charge-décharge effectuées pendant le fonctionnement.

Troisièmement, la simplification du simulateur dynamique par la méthode du plan d'expériences sera réalisée. Ainsi, par la méthode du plan d'expériences nous allons déterminer des méta-modèles spécifiques pour le comportement du SMS. Pour déterminer ces méta-modèles, il est nécessaire d'exploiter le simulateur afin de générer la base de données qui est composée de vecteurs d'entrée et de vecteurs de sortie, puis d'appliquer l'approche statistique du plan d'expériences sur la base générée.

En fin, la phase d'optimisation du dimensionnement du SMS sera réalisée à l'aide d'un algorithme d'optimisation bien adapté au problème traité. La nature d'optimisation utilisée est une optimisation mono-objectif avec contraintes. La fonction objectif du système global est une fonction définie en termes d'énergie grise (**Embodied Energy**). Les contraintes d'optimisation permettent de trouver des configurations optimales désirées. Ainsi, pour chaque solution on peut avoir une pénétration soit par rapport aux sources renouvelables soit ou par rapport à la source fossile [AKM11][VNa10].

Le détail de la méthodologie de dimensionnement et d'optimisation proposée sera expliqué au cours des chapitres suivants. Dans chaque chapitre, des résultats de simulation avec des discussions et des commentaires seront abordés.

MODÉLISATION DES SYSTÈMES MULTI-SOURCES
POUR LE DIMENSIONNEMENT

2.1 Introduction

Suivant la problématique citée à la fin du premier chapitre, l'objectif global de la thèse se focalise sur l'optimisation du dimensionnement du système multi-sources (SMS) en termes de coût global de conception. Pour cela, il est indispensable de définir de façon claire et précise les moyens nécessaires pour atteindre l'objectif désiré. Parmi ces moyens, nous citerons l'outil de modélisation des systèmes qui représente le cœur de ce présent chapitre. Ensuite, l'étude de vieillissement des sources d'énergie du SMS sera présentée avec une étude de vieillissement détaillée pour les batteries de type plomb-acide.

La « *modélisation* » représente un outil fondamental et indispensable pour l'analyse et l'étude des processus en général. La notion « **modélisation** » signifie la détermination d'un modèle capable de copier le comportement fonctionnel d'un système donné. Cependant, le sens de son utilisation varie en fonction de l'objectif défini par l'expérimentateur du système. Ainsi, suivant [JPG92], les objectifs de la modélisation peuvent être définis par les quatre raisons principales suivantes : réaliser une commande, comprendre le fonctionnement d'un système, prévoir l'état d'un système (par exemple : pour faire son diagnostic) ou bien la conception d'un système.

Dans ce chapitre nous allons expliquer l'utilité ou le rôle de la modélisation des systèmes énergétiques en vue du dimensionnement et l'optimisation du système d'électrification multi-sources. Dans le contexte de notre travail, la modélisation du système multi-sources doit avoir deux aspects différents afin d'atteindre l'objectif ciblé. Dans le premier aspect nous pourrions adopter des modèles physiques qui modélisent la dynamique des sources d'énergie dans le système d'électrification.

Ces modèles sont capables de traduire l'évolution de la puissance délivrée par les générateurs en fonction de l'ensemble des grandeurs appliquées aux entrées des générateurs. Dans le second aspect, la modélisation des sources d'énergie a un sens plus profond puisqu'elle est basée sur des modèles permettant d'évaluer le coût du système multi-sources hybride en quantifiant l'énergie grise (**Embodied Energy**) consommée pendant le cycle de vie. L'énergie grise ici signifie l'énergie nécessaire à la fabrication, le transport, l'exploitation d'un système et son démantèlement.

Elle est mesurée en MJ. La détermination de ces derniers modèles est fondée sur l'utilisation de l'analyse du *cycle de vie* des différentes sources d'énergie d'une façon séparée. La **Figure 2.1** montre les deux aspects de modélisation du système multi-sources et leurs utilités pour procéder au dimensionnement et son optimisation.

Dans la suite de ce chapitre les modèles détaillés de chaque générateur de puissance seront présentés. Dans la dernière section du chapitre nous allons étudier le vieillissement des

différentes sources d'énergie du SMS. Cependant, cette étude de vieillissement sera détaillée seulement par rapport aux batteries de stockage de type plomb-acide. Les outils utilisés pour l'étude de vieillissement du banc de stockage sont : un simulateur dynamique du SMS et l'algorithme de comptage des cycles Rainflow (ARF).

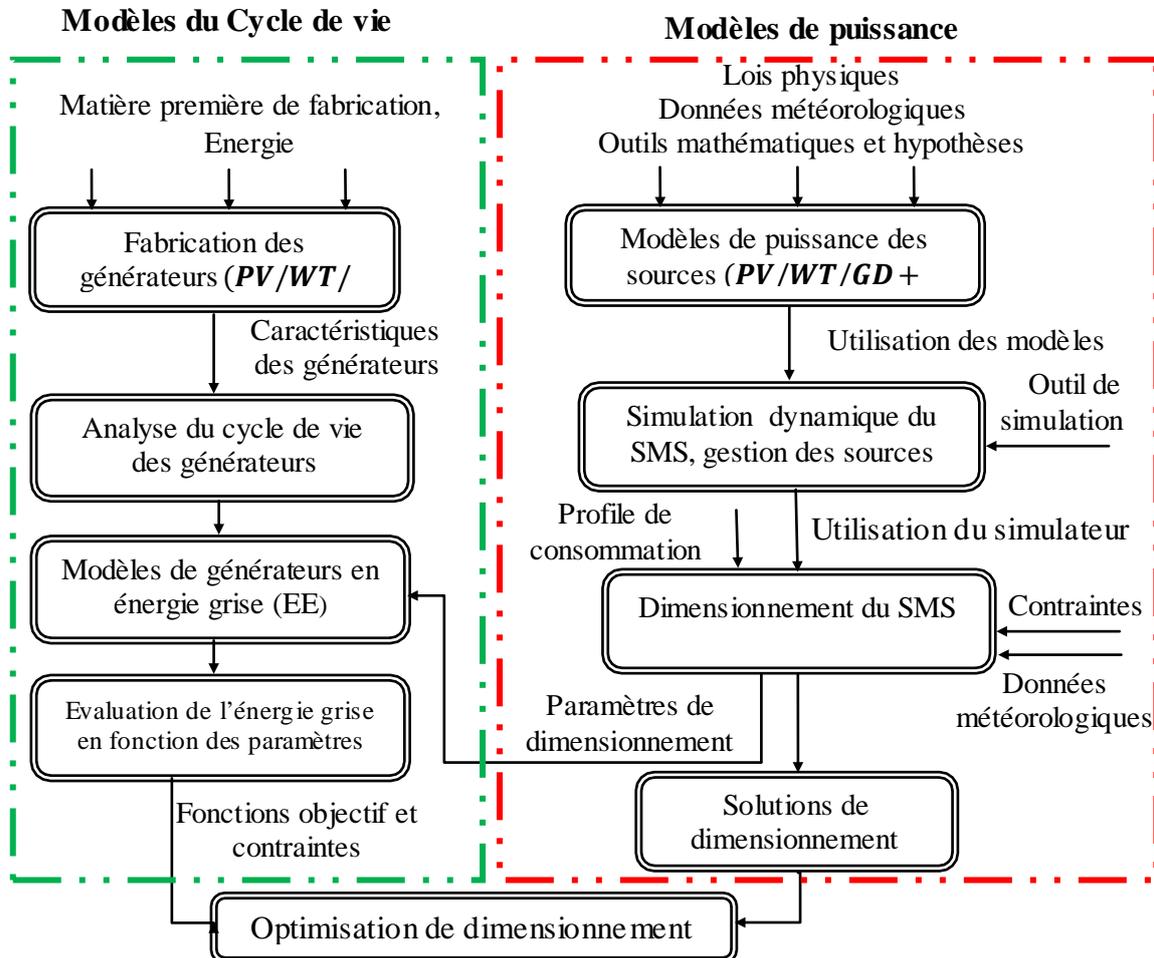


Figure 2.1 : Relation entre les types de modélisation.

2.2 Modélisation du système multi-sources (SMS)

La modélisation du système multi-sources hybride représente une étape primordiale pour la conception du système complet. La phase de dimensionnement de la configuration multi-source proposée exige la modélisation propre de chaque source d'énergie. Les sources à modéliser sont : deux sources de puissance renouvelables (générateur solaire et générateur éolien), une source fossile (générateur diesel) et un système de stockage (banc de batteries plomb-acide).

Ainsi, pour chaque source d'énergie on doit déterminer deux type de modèles différents, un premier modèle décrivant l'évolution de la puissance fournie par le générateur et un deuxième

modèle utilisé pour l'évaluation du coût de conception et d'exploitation basé sur l'énergie grise comprise dans le générateur le long d'un cycle de vie donné.

L'utilisation du premier modèle servira à mettre en œuvre la simulation du comportement d'une installation donnée. Par contre, le second modèle permettra d'estimer le coût de l'installation. L'utilisation simultanée des deux types de modèles est le seul moyen permettant de déterminer le dimensionnement optimal de l'installation relativement à son coût. Les sous sections suivantes illustrent les modèles du système multi-sources.

2.2.1 Partie 1 : Modèles de puissance des sources d'énergie

Chaque modèle décrit le comportement d'un générateur pour mesurer l'évolution de la puissance en fonction des grandeurs d'entrée par rapport au temps d'échantillonnage. Ainsi, nous allons donner par la suite, le modèle détaillé du générateur solaire, du générateur éolien, du générateur diesel et des batteries de stockage.

2.2.1.1 Modélisation du générateur solaire

La première source d'énergie renouvelable dans le système multi-sources est l'énergie solaire. L'élément principal qui peut transformer cette énergie naturelle en une énergie électrique est la cellule solaire. Le développement d'un générateur solaire est un assemblage de plusieurs cellules selon une architecture de connexion donnée. La puissance délivrée par le générateur solaire dépend de plusieurs paramètres, le nombre de cellules, le type et la qualité de ces cellules et les données climatiques.

Dans la littérature, plusieurs modèles de puissance ont été présentés pour la modélisation des comportements des générateurs solaires. Chaque modèle est caractérisé par un modèle mathématique bien déterminé. Cependant, la majorité des modèles obtenus sont fondés sur des variables météorologiques communes telles que l'ensoleillement ou l'irradiation et la température.

Ainsi, les points de différence entre les modèles développés sont relativement liés à la technologie de conception et le type de cellules utilisées dans les panneaux solaires. Dans le

cadre de notre travail le choix du modèle de puissance du générateur solaire est le point le plus important. En effet, notre objectif est d'utiliser un modèle qui nous permet de réaliser de façon facile la phase du dimensionnement et d'optimisation du système hybride global. Ainsi, le modèle du générateur solaire que nous avons choisi est celui présenté par l'expression (2.1) suivante [HTT10], [JHJ09] et [DAh12]:

$$P_{pv} = \eta_G A_{pv} I_r \quad (2.1)$$

Avec :

P_{pv} [w]: est la puissance délivrée par le générateur solaire ;

η_G : est le rendement global du générateur ;

I_r [wh/m²] : représente l'Irradiation solaire ;

A_{pv} [m²] : représente la surface du panneau solaire.

L'expression de la variation du rendement global η_G est donnée par l'équation (2.2) suivante :

$$\eta_G = \eta_r \eta_d [1 - \beta_t (T_c - T_{NOCT})] \quad (2.2)$$

Où

η_r : est le rendement de référence du générateur solaire. La détermination de ce rapport de rendement nécessite la connaissance de la puissance fournie par le générateur solaire P_{PV} , et la puissance fournie par l'ensoleillement capté par le générateur comme le montre l'équation (2.3) suivante :

$$\eta_r = P_{PV} / P_{I_r} \quad (2.3)$$

La valeur numérique de ce rapport de rendement varie en fonction des matériaux et des technologies de fabrication. Dans le modèle présenté à l'équation (2.1) on constate que la puissance délivrée par le générateur dépend à la fois de la variation des trois facteurs : rendement, surface et ensoleillement. La **Table 2.1** résume les variations de rendement pour plusieurs types de panneaux solaires [BFD07].

Table 2. 1 : Comparaison entre plusieurs technologies de s panneaux photovoltaïques

Matériau de fabrication	Rapport de rendement	Durée de vie	Evaluation de performances	Lieu d'utilisation
La famille des panneaux en silicium				
Silicium mono cristallin	12 à 18% (24,7% en laboratoire)	20 à 30 ans	Meilleure performance Stabilité de production Installation coûteuse et laborieuse.	Aérospatiale, modules pour toits façades,...
Silicium poly cristallin	11 à 15% (19,8% en laboratoire)	20 à 30 ans	Adapté à la production à grande échelle Stabilité de production Plus de 50% du marché mondial.	Modules pour toits, façades, générateurs
Amorphe	5 à 8% (13% en laboratoire)		Possibilité de fonctionner sous la lumière fluorescente. Fonctionnement pour faible luminosité. Fonctionnement par temps couvert. Fonctionnement si ombrage partiel La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment
La famille des panneaux non en silicium				
Composite mono cristallin (GaAs)	18 à 20% (27.5% en laboratoire)		Lourd, fissure facilement	Systèmes de concentrateurs Aérospatiale (satellites)
Composite poly cristallin (CdS, CdTe, CuInGaSe ₂ ,etc.)	8% (16% en laboratoire)		Nécessite peu de matériaux mais certains contiennent des substances polluantes	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment

Durant de notre étude on s'est intéressé par les deux premiers types de panneaux photovoltaïques issus de la famille du silicium (Silicium mono cristallin et silicium poly cristallin).

η_d : représente le facteur de dégradation du générateur solaire en fonction de sa durée de vie. Ce facteur varie en fonction des phénomènes externe comme la pluie, la neige et la poussière qui peuvent dégrader le rendement du panneau solaire.

La valeur de ce facteur est estimée pendant tout le cycle de vie des panneaux et qui varie entre 0.5 et 0.9% pendant 20 ans [DCJ12].

β_t : Ce paramètre représente le coefficient de l'influence de la température des cellules photovoltaïques sur la puissance du générateur qui est situé entre 0.004 et 0.005/°C [HTT10] et [SRW07].

La variation de la température de jonction ou de cellule notée T_c [°C] du panneau photovoltaïque est en relation avec deux grandeurs différentes : l'irradiation et la température ambiante. L'expression donnée ci-dessous montre la relation entre cette température et les deux grandeurs.

$$T_c = 30 + 0.075(300 - I_r) + 1.14(T_a - T_r) \quad (2.4)$$

Avec

T_{NOCT} : est la température nominale de fonctionnement (Nominal Operating Cell Temperature) ;

T_a : est la température ambiante [°C];

T_r : est la température de référence qui vaut la valeur 25°C.

Dans une étude de performance des panneaux solaires présentée par [THo00], la variation du rendement global η_G du générateur est donnée par l'expression suivante :

$$\eta_G = \eta_r \left[1 - 0.9\beta_t \frac{I_{r,PV}}{I_{r,PV,NOCT}} (T_{c,NOCT} - T_{a,NOCT}) - \beta_t (T_a - T_r) \right] \quad (2.5)$$

Avec

$I_{r,pv}$ [W/m^2]: L'irradiation instantanée ou horaire sur le panneau solaire ;

$I_{r,PV,NOCT}$ [W/m^2]: La moyenne de l'irradiation horaire sur le panneau solaire sous les conditions nominales ($800 W/m^2$).

$T_{c,NOCT}$: Température de cellule sous des conditions de fonctionnement à température nominale (Nominal Operation Cell Temperature) et typiquement varie entre la valeur 43 et 45°C ;

$T_{a,NOCT}$: Température ambiante sous des conditions de fonctionnement à température nominale (Nominal Operation Cell Temperature) et typiquement égale à 25°C;

A partir de la **Table 2.1** illustrant les paramètres d'évaluation de plusieurs technologies de panneaux solaires, nous allons choisir le type le plus adapté aux sites isolés. Donc, notre choix est limité sur la famille de silicium entre mono Cristallin et poly cristallin.

2.1.1.2 Modélisation du générateur éolien

Le générateur de puissance à base de l'énergie éolienne représente la deuxième source renouvelable dans le système multi-sources que nous avons développé. Dans le cas général, une chaîne de production éolienne est composée d'une partie mécanique et d'une partie électrique.

L'énergie produite par l'énergie cinétique du vent représente la source principale de l'énergie éolienne. Dans la littérature on trouve plusieurs types de générateurs éoliens et leurs domaines d'utilisation.

Le type du générateur éolien choisi est un générateur à axe horizontal, l'expression donnée par l'équation (2.6) représente le modèle de puissance du générateur [VR04].

$$P_{WG} = \frac{1}{2} C_p \eta_{gb} \eta_g \rho A_{wt} w_s^3 \quad (2.6)$$

$$P_{WG} = \frac{1}{2} \eta_G \rho A_{wt} w_s^3 \quad (2.7)$$

Où

P_{WG} : la puissance fournie par le générateur éolien ;

C_p : est le coefficient de puissance de la turbine éolienne (sa valeur maximale proche de 0.6) ;

η_{gb} : est le rendement du variateur de vitesse ;

η_g : est le rendement de la génératrice ;

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

$A_{wt} [m^2]$: la section ou la surface balayée par les pâles de la turbine de rayon $R [m]$;

$w_s [m/s]$: la vitesse du vent ;

$\rho [kg/m^3]$: la densité volumique de l'air.

La variation de la densité volumique de l'air ρ qui est principalement fonction de l'altitude et la température ambiante, est donnée par l'équation (2.8).

$$\rho = (353.049/T_a). \exp[-0.034(Z/T_a)] \quad (2.8)$$

Avec

$Z [m]$: est l'altitude et T_a la température ambiante.

Le coefficient de puissance C_p d'une turbine éolienne est le coefficient qui permet aux concepteurs d'évaluer les performances énergétiques de la turbine.

La valeur de ce coefficient varie en fonction de plusieurs paramètres et parmi ces paramètres la vitesse du vent, le nombre et la longueur des pâles, l'angle de calage β des pâles et la vitesse de rotation (pour une éolienne de type horizontal).

2.1.1.3 Modélisation du générateur diesel

Définition : Un groupe électrogène est un système énergétique composé d'un moteur thermique et d'une génératrice. Plusieurs types de moteurs thermiques peuvent être utilisés pour les groupes électrogènes, des moteurs thermiques à essences et des moteurs thermiques diesel. Le choix du type de groupes électrogènes pour des besoins d'électrification joue un rôle très

important. Ainsi, ce choix peut dépendre de plusieurs points. Les points les plus importants sont les suivants :

- Le coût du groupe électrogène sur un cycle de vie ;
- La fiabilité assurée par le groupe électrogène pendant sa période de fonctionnement ;
- La durée de vie requise pour le groupe.

Le groupe électrogène utilisé dans notre étude est un générateur diesel de petite puissance. La **Figure 2.2** montre un type ouvert du générateur diesel utilisé. Les groupes électrogènes ouverts sont des groupes montés sur des châssis classiques non fermés. La **Table 2.2** représente les caractéristiques principales de plusieurs générateurs diesel.



Figure 2. 2 : Groupe électrogène Diesel de type ouvert [GDK15].

Table 2.2 : Comparaison entre trois groupes électrogènes à des puissances différentes [GEI15].

Type du moteur	Capacité d'huile (L)	Puissance de GE [kW] (P_n, P_{max})	Type de génératrice	Puissance de Génératrice (P_n [kW])	Poids net du GE [kg]	Ampérage /voltage du GE [A]/ [V]
Essence-HY170	0.6	(2.2, 2.8)	2kW160L-115	2.5	36.00	12.2/230
Essence-IC425	1.1	(4, 4.5)	4kW190L-125	4.0	61.00	19.1/230
Essence-IC390E	1.1	(5, 5.5)	L190-110	5.0	83.00	22/230
Essence-HY420E	1.1	(6.5, 7.15)	7kW190L-140	6.5	86.00	28.7/230
Essence-IC680E	1.5	(9, 10)	9kW245L-130	10	172.00	41.7/230
Essence-IC680E	1.5	(11.3, 12.5)	9kW245L-130	12.5	172.00	17.2/400
Diesel-D400E	1.65	(5, 5.5)	5kW190L-140	5.0	88.00	22/230
Diesel-D500E	1.65	(6, 6.5)	6,5kW190L-140	6.0	88.00	35/230
Diesel-D500E	1.65	(7.5, 8.1)	6,5kW190L-140	7.5	88.00	35/400

Dans le système multi-sources que nous avons proposé, le rôle du générateur diesel est utilisé pour alimenter le site isolé dans le cas où les autres sources sont incapables de satisfaire la charge demandée. Ainsi, le générateur diesel est utilisé pour alimenter la charge et charger le banc de stockage en même temps. Ce type de fonctionnement du GD est choisi pour optimiser la durée de vie du GD d'une part et d'optimiser la configuration du système global d'autre part.

Modèle de puissance des groupes électrogènes

La puissance délivrée par un groupe électrogène (**GrE**) représente un paramètre très important pour dimensionner un système d'électrification. Généralement, chaque groupe électrogène est capable de fournir dans un intervalle borné, des puissances à des niveaux différents. Dans cet intervalle de fonctionnement, le groupe électrogène peut délivrer une puissance minimale qui correspond à une consommation minimale de carburant ou une puissance maximale pour une consommation maximale. Cependant, le fonctionnement permanent du GrE par une puissance minimale (limite inférieure) ou maximale (limite supérieure) a une influence directe sur sa durée de vie. En effet, ces deux points de fonctionnement correspondent à un rendement faible. Donc,

pour une durée de vie meilleure et un rendement maximum, le point de fonctionnement choisi pour le groupe électrogène est le point de fonctionnement nominal. Suivant la littérature, les modèles de puissances des groupes électrogènes sont en relation directe avec le carburant consommé. Ainsi, plusieurs auteurs ont utilisé des modèles de puissance approximatifs, linéaires ou non linéaires [YTh10] [RDL05].

Dans le cadre de notre étude, le générateur diesel représente une source d'énergie importante dans le système multi-sources. Ainsi, afin de déterminer le modèle de puissance de ce générateur, nous allons nous baser sur des données réelles des groupes électrogènes de la gamme Caterpillar (CAT) [TML13]. Les données que nous avons utilisées pour la détermination du modèle de puissance, sont présentées respectivement dans la **Table 2.3** et la **Table 2.4**.

Table 2.3. Caractéristiques des groupes électrogènes diesel de type CAT [TML13].

Type du GD	Capacité nominale (kW)	Puissance maximale (kW)	Fuel consommé (L/h)			
			Charge 50%	Charge 75%	Charge 100%	Charge 110%
GD1	7.6	9.5	1.5	2.0	2.5	2.8
GD2	11.0	13.8	2.0	2.7	3.6	4.0
GD3	14.4	18	2.6	3.4	4.4	4.8
GD4	17.6	22	2.9	3.9	5.3	5.9
GD5	26.4	33	3.8	5.2	6.9	7.6
GD6	39.8	50	5.6	7.9	10.6	11.8
GD7	44.0	55	5.8	8.0	11.7	13.3

Table 2.4. Caractéristiques des groupes électrogènes diesel de type KIPOR [GKI15].

Type du GD	Capacité nominale (kW)	Puissance maximale (kW)	Fuel consommé (L/h)		
			Charge 25%	Charge 50%	Charge 75%
KDE2500E	1.7	2	0.22	0.44	0.66
KDE3500E	2.8	3.2	0.35	0.7	1.05
KDE6500E	4.5	5	0.53	1.07	1.6
KDE12000EA	8.5	9.5	0.9	1.9	2.8
KDE19EA	14.4	16.7	1.58	3.16	4.74

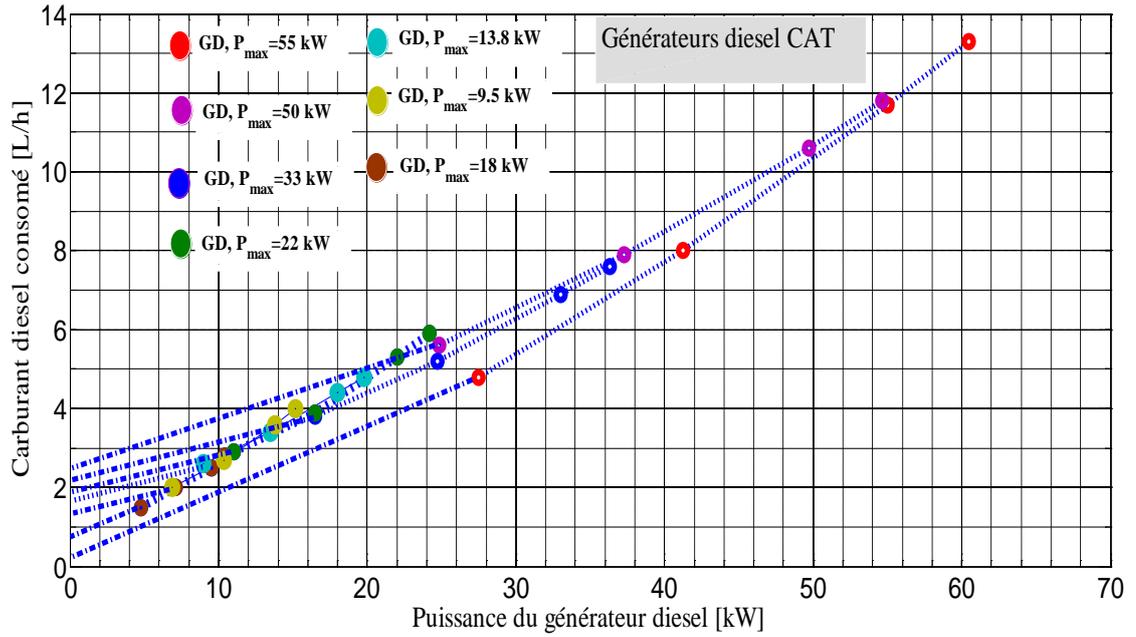


Figure 2. 3 : Consommation des groupes électrogènes en fonction de la charge appliquée.

Donc, à partir de la Table 2.3 précédent caractérisant les différents types de groupes électrogènes, nous avons déterminé le modèle de puissance suivant :

$$P_{GD} = 0.04155 Fuel_{GD}^2 + 4.2Fuel_{GD} \tag{2.9}$$

Où

P_{DG} [kW]: la puissance fournie par le générateur diesel.

$Fuel_{DG}$ [L/h]: le carburant consommé par le générateur pendant une heure.

2.2.1.4 Modélisation du système de stockage

Le système de stockage représente un élément nécessaire pour le système multi-sources. Il est utilisé pour le stockage et la fourniture de l'énergie électrique soit délivrée par les autres générateurs non consommée par la charge, soit demandée par la charge et non délivrée par les autres générateurs. Dans notre étude nous allons nous baser sur des batteries de type plomb-acide comme moyen de stockage. L'expression générale de charge-décharge de la batterie plomb-acide est donnée par l'expression suivante :

$$SOC(t) = SOC(t - 1) + \left(P_G(t) - \frac{P_{load}(t)}{\eta_{dcac} \eta_{wr}} \right) \frac{\eta_{Bat}}{V_{Bus}} \Delta t \tag{2.10}$$

Avec

$$P_G(t) = P_{pv}(t)\eta_{dcac} + P_{wt}(t)\eta_{acdc} + P_{DG}\eta_{acdc} \tag{2.11}$$

Où

SOC : l'état de charge du banc de batteries (State Of Charge) ;

$SOC(t - 1)$: l'état de charge du banc de batteries à l'instant $t - 1$;

$P_{pv}(t)$: puissance délivrée par le générateur solaire;

$P_{wt}(t)$: puissance fournie par le générateur éolien;

P_{DG} : puissance fournie par le générateur diesel ;

$P_{load}(t)$: puissance demandée par la charge pendant un instant de temps t ;

η_{Bat} : rendement de charge-décharge de la batterie, égal à 1 pendant la décharge et égale à 0.8 ou 1 pendant la charge [TML14] [TML13].

V_{Bus} : tension de bus DC égale à 48 V (quatre batteries de 12V connectées en série);

Δt : le pas de simulation ;

La capacité nominale C_n du banc de stockage en fonction de la capacité unitaire d'une batterie est exprimée par l'équation (2.12) [TML13] [KEK06] et [BRZ11].

$$C_n = \left(\frac{N_{Bat}}{N_{Bats}} \right) C_{Bat} = N_{Batp} C_{Bat} \quad (2.12)$$

Où

N_{Bat} : le nombre total de batteries ;

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

N_{Batp} : nombre de batteries connectés en parallèle ;

C_{Bat} [Ah]: capacité d'une batterie unitaire. Toutes les batteries connectées en série possèdent la même capacité. Le banc de stockage connecté au système multi-sources est composé d'une branche de quatre batteries connectées en série. Chaque batterie est caractérisée par une tension nominale V_{Bat} égale 12 V et capacité C_n . La valeur de cette dernière est obtenue après l'optimisation de dimensionnement du SMS. La tension continue (V_{Bus}) du SMS est égale à la tension mesurée aux bornes du banc de stockage qui correspond la valeur de 48V. Ce bus continu est connecté directement à la charge.

La relation liant l'état de charge maximale et l'état de charge minimale est donnée par la formule suivante :

$$SOC_{min} = (1 - DOD)SOC_{max} \quad (2.13)$$

Avec

DOD : représente la profondeur de décharge.

2.2.1.5 Modélisation de la charge

Le modèle de la charge représente un point très important pour le dimensionnement et l'optimisation du système multi-sources. En effet, la variation de la taille du système

d'électrification et sa configuration optimale sont en relation directe au profil de charge et les profils météorologiques. Ainsi, dans notre étude, nous allons nous baser sur un profil de consommation réel. Ce profil sera défini par la distribution de consommation de la France pour l'année 2013 [RIE13]. A partir de cette distribution, nous allons déterminer un profil de consommation annuel adapté pour un habitat résidentiel comportant plusieurs maisons. La **Figure 2.4** montre la répartition de la puissance annuelle pour un habitat résidentiel.

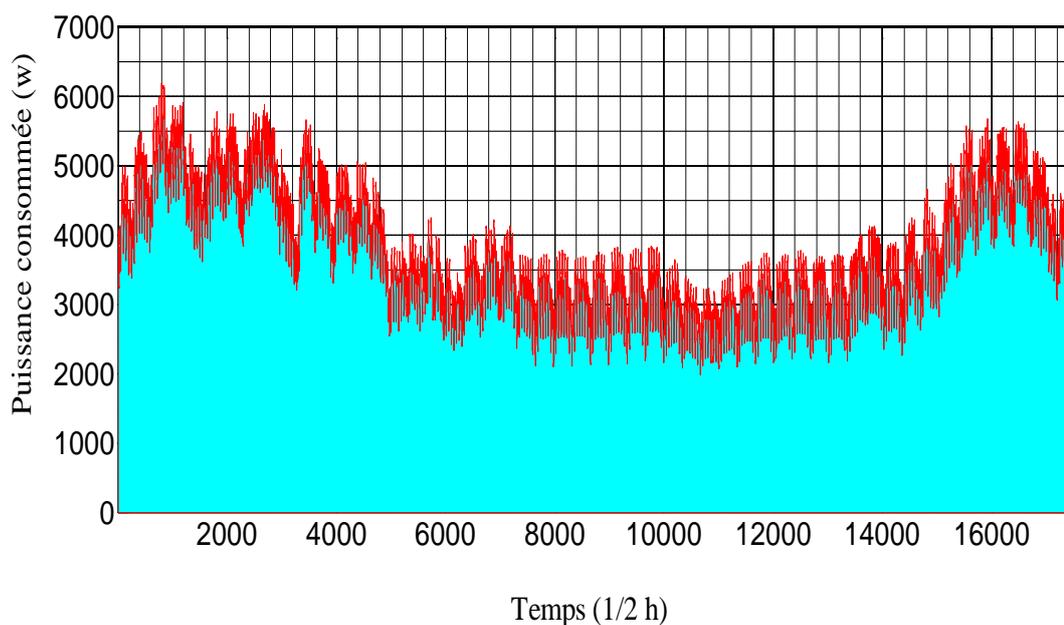


Figure 2.4 : Profil de charge pour un habitat résidentiel.

Sur le profil de charge présenté à la **Figure 2.4**, la puissance consommée par l'habitat varie en fonction des saisons. On observe que, la consommation est importante pendant la saison d'hiver et d'automne où les systèmes de chauffage sont nécessaires. Afin d'exploiter ces données de consommation pour dimensionner le système multi-sources, nous allons adapter ce vecteur de consommation avec les autres vecteurs correspondants aux données météorologiques (irradiation, température ambiante et vitesse du vent) du site étudié. Donc, les tailles de tous les vecteurs utilisés pour le dimensionnement du système hybride doivent être identiques. L'intervalle de prélèvement des données pour chaque vecteur correspond à un pas égal à une demie heure (30 minutes). L'énergie globale annuelle consommée par l'habitat choisie correspond à la valeur de 32840 kWh (environ 10 maisons).

Présentation des données météorologiques du site

Les données météorologiques représentent les données qui sont en relation avec le site pour lequel le système multi-sources sera dimensionné et installé. Les données météorologiques nécessaires pour le dimensionnement du système multi-sources sont : La température ambiante T_a , l'irradiation I_r , la vitesse du vent w_s , l'altitude et la longitude du site. Pour réaliser le dimensionnement du système, nous allons organiser toutes les grandeurs des données sous forme de vecteurs. Pour cela, un site Tunisien [STu04] a été utilisé pour valider le fonctionnement du simulateur dynamique.

La longueur de chaque vecteur de données est égale à un an avec un pas de mesure égal à trente minutes. La taille de ces vecteurs est identique à celle de profil de charge.

Définition du site tunisien

Ce site isolé se trouve à Sidi Daoud et localisé par les coordonnées suivantes : Latitude de 37° et longitude de 10.93. Sur ce site une ferme éolienne d'une capacité de 53.6 MW a été installée de 2000 à 2009 pour l'électrification. Les données météorologiques utilisées dans notre étude sont prélevées en 2004 comme l'illustrent les Figures suivantes.

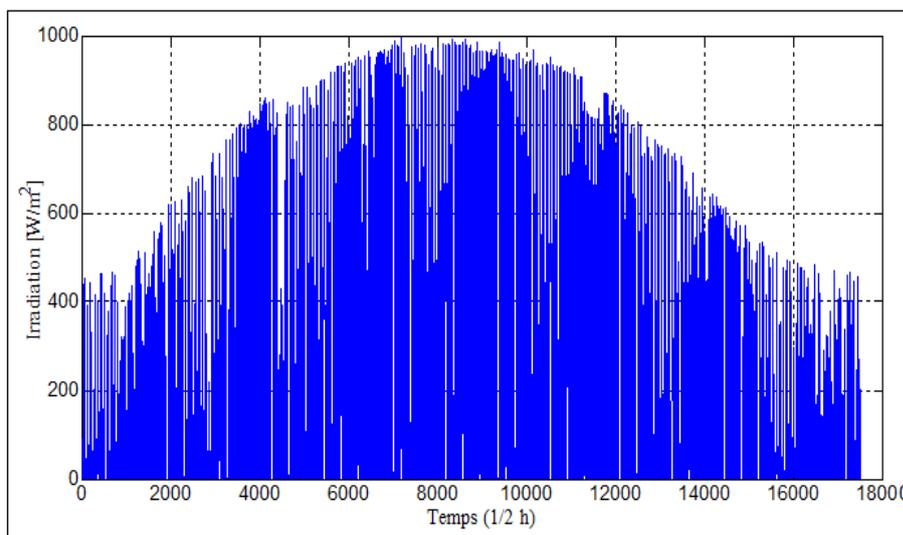


Figure 2.5 : Irradiation pour un an de mesure.

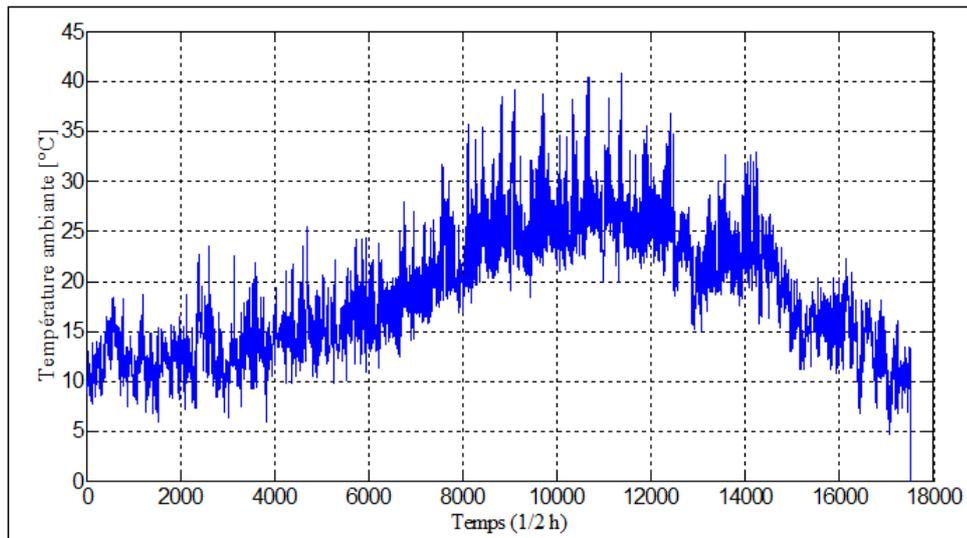


Figure 2. 6 : Température ambiante du site pour un an de mesure.

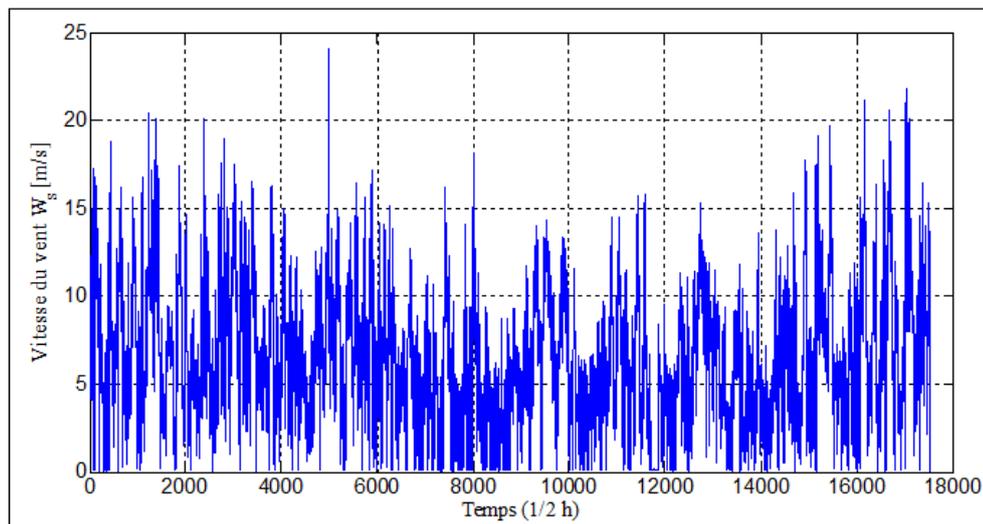


Figure 2. 7 : vitesse du vent pendant un an de mesure.

2.2.2 Partie 2 : Modèles en énergie grise et analyse du cycle de vie du SMS

Dans cette étape de modélisation, nous allons définir les démarches et les outils nécessaires à la détermination des modèles qui représentent les coûts des différentes sources exprimés en énergie primaire consommée. Pour cela, il est important d'introduire une nouvelle notion pour la modélisation qui est l'analyse du cycle de vie. Ainsi, nous allons commencer par la définition de l'analyse du cycle de vie et son principe puis l'application de la méthode proposée sur les sources de puissance qui composent le système multi-sources. Les modèles que nous voudrions déterminer en utilisant l'approche de l'analyse du cycle de vie jouent un rôle très important pour la résolution de notre problématique. Les modèles obtenus permettent d'évaluer le coût énergétique primaire (CEP : Embodied Energy Cost) du système multi-sources qui est mesuré

en Mégajoule (MJ), de quantifier son influence ou impact environnemental généré qui est mesuré par les émissions du gaz à Effet de Serre (**GES** : Greenhouse Gas Emissions).

2.2.2.1 Principe de l'analyse du cycle de vie (Life Cycle Assessment)

L'analyse du cycle de vie (ACV) est un outil pour évaluer l'impact environnemental d'un processus ou d'un système au long de sa durée de vie ou de service. Cet outil d'analyse permet de suivre l'évolution d'un produit à partir de la première utilisation jusqu'à la fin de sa durée de service. Dans le cas de notre travail, nous allons nous baser sur cet outil d'analyse pour déterminer les modèles qui mesurent **l'énergie intrinsèque** du système multi-sources. La démarche à suivre dans notre étude est basée sur l'obtention de l'énergie intrinsèque en MJ propre pour chaque source d'énergie. Pour cela, quatre modèles sont nécessaires, un modèle pour le générateur solaire, un modèle pour le générateur éolien, un modèle pour le générateur diesel et un modèle pour le banc de stockage (batteries Pb-A). Avant de déterminer ces modèles en utilisant l'outil d'analyse du cycle de vie il est indispensable d'expliquer le principe de l'ACV. Suivant la norme d'organisation internationale de normalisation (**International Standard Organisation**), l'analyse du cycle de vie est fondée sur quatre phases principales [**LDB08**]: la phase de définition du système et des objectifs, la phase d'analyse de l'inventaire, la phase d'analyse de l'impact environnemental et la phase d'interprétation [**LDB08**] [**OJM10**]. La **Figure 2.8** montre le processus du cycle de vie des systèmes en général.

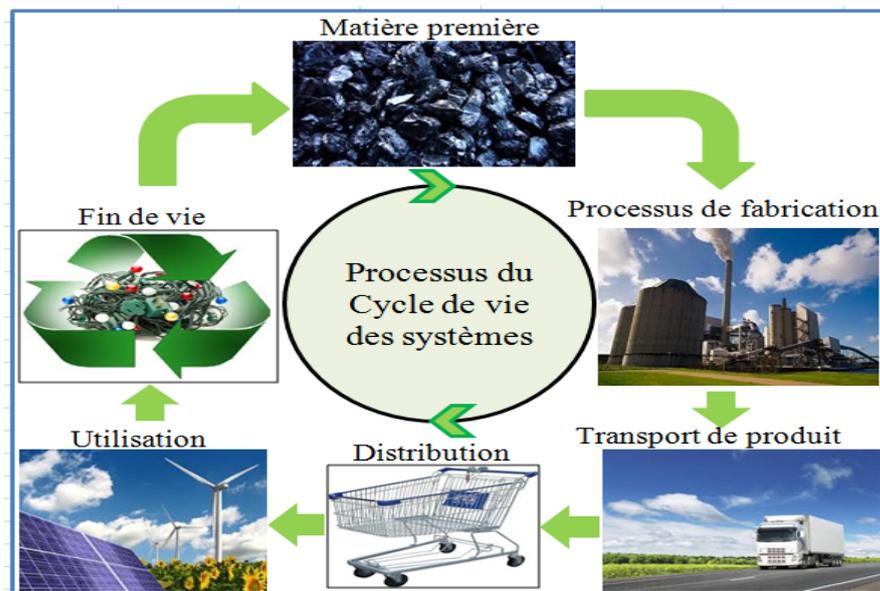


Figure 2.8 : Processus du cycle de vie des systèmes en générale

- **Définition des objectifs et du champ de l'étude**: cette phase est réservée à la définition ou la connaissance du système à analyser et l'identification de l'ensemble des objectifs souhaités.

Dans cette phase nous travaillons sur la détermination des limites de l'étude en traçant le champ de l'analyse, et on fixe tous les objectifs désirés de façon exacte et précise.

- **Analyse de l'inventaire** : l'objectif essentiel de cette phase est de quantifier les matières premières et les énergies par rapport à l'entrée et la sortie du système puis évaluer les émissions polluantes dans l'environnement global (l'eau, l'air, sol,...).
- **Analyse de l'impact environnemental** : dans cette troisième phase une évaluation de l'impact sur l'environnement des émissions quantifiées. Cette phase est composée de quatre étapes qui sont : *la classification, la caractérisation, la normalisation et la pondération*.

La classification signifie la détermination de l'émission qui engendre un impact environnemental (effet de serre, toxicité humaine, écotoxicité,... etc.), c'est-à-dire l'origine de l'impact par rapport à l'émission.

La caractérisation travaille sur l'affectation relative de chaque entrée et sortie à la catégorie de l'impact choisi.

La normalisation permet de calculer l'ampleur ou l'amplitude de l'indicateur de catégorie obtenu par rapport aux valeurs de référence où les différents impacts potentiels et la consommation de ressources sont exprimés sur la même échelle. Ainsi l'objectif de la normalisation est de mettre une référence commune permettant de comparer les différents impacts environnementaux.

La pondération permet de classer et éventuellement de définir l'importance relative de ces différents résultats.

- **Interprétation** : cette dernière phase permet d'interpréter et d'évaluer les résultats obtenus par toutes les phases précédemment réalisées.

2.2.2.2 Analyse du Cycle de Vie du générateur solaire

Dans plusieurs travaux de recherche, l'analyse du cycle de vie des générateurs solaires a été utilisée pour des objectifs différents. Ces objectifs peuvent être résumés dans deux points principaux :

- L'évaluation du coût de fabrication global d'un système photovoltaïque solaire et ce depuis la phase d'extraction de la matière première jusqu'à la fin du cycle de vie;
- La possibilité de quantifier la quantité de pollution dégagée par les effets de serre au long de la phase de fabrication et la phase d'utilisation. Pendant la phase d'utilisation du système d'énergie il y a aussi des pollutions qui peuvent être dégagées par les convertisseurs de puissance. Cependant dans tous les cas, l'énergie intrinsèque ou grise $EE_{PV} [MJ/m^2]$ d'un mètre carré de panneau solaire varie en fonction de plusieurs paramètres qui sont : Les technologies des

panneaux solaires (technologie monocristallin, technologie poly cristallin, multi cristallin, etc.,...), les technologies de fabrication et les sources d'énergies utilisées (renouvelable ou non renouvelable). Le cadre de l'ACV varie en fonction de l'objectif désiré par exemple dans [RGV09], les auteurs ont appliqué l'ACV dans le but d'installer un système d'électrification autonome qui comporte un panneau photovoltaïque solaire de 4.2 kWc connecté à un banc de batteries de type plomb acide. Ainsi le coût énergétique obtenu représente le coût du système complet. La Figure 2.9 représente le cadre de l'analyse du cycle de vie d'un panneau solaire en général.

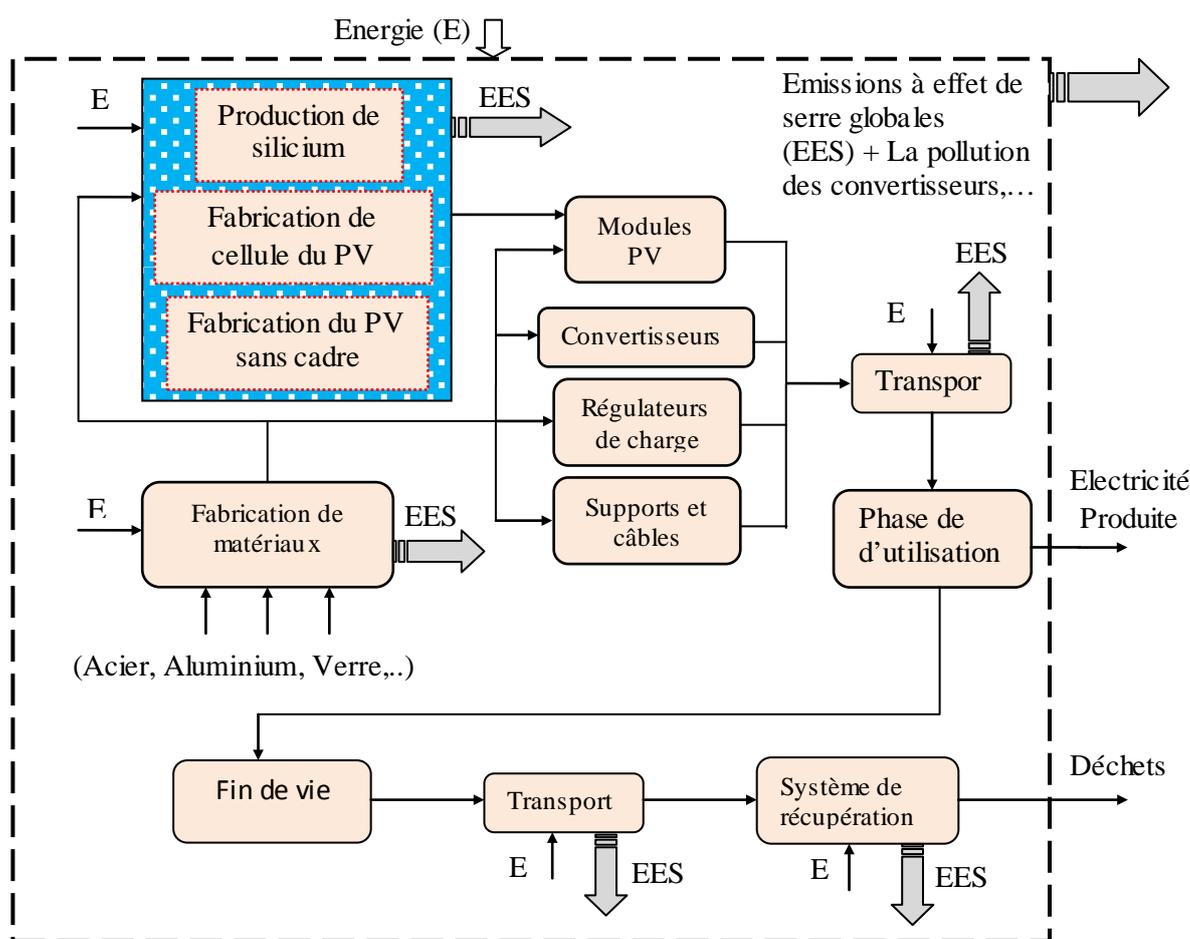


Figure 2.9 : Cadre d'analyse de cycle de vie d'un panneau solaire.

Pour différentes technologies de panneaux solaires, plusieurs travaux de recherche se sont basés sur l'utilisation d'une base de données pour estimer la valeur du coût énergétique. Ce coût énergétique représente l'énergie primaire (Embodied Energy) nécessaire pour la fabrication d'un panneau solaire selon une technologie précise.

La base de données utilisée est composée de plusieurs types de panneau solaires de la même technologie, chaque type est caractérisé par son énergie primaire de fabrication propre. Ainsi, la valeur énergétique primaire approchée à une technologie sera obtenue par une approche

d'interpolation. La **Table 2.5** illustre le coût énergétique primaire pour différents types de technologies de panneaux solaires [ADh12] [CHa14].

Table 2.5 : Energie primaire de fabrication pour des technologies de panneaux différents.

Technologie de panneau	Energie Primaire [MJ/m ²]	Référence
Mono cristallin silicium (MC-Si)	4779.41	[CHa14]
poly cristallin silicium (Polc-Si)	3379	[ADh12]
Multi cristallin silicium (MuC-Si)	3815.74	[CHa14]
Amorphe silicium (A-Si)	2462.021	[CHa14]

Dans [PZE10], les auteurs ont présenté une étude comparative du cycle de vie d'un panneau photovoltaïque solaire de type silicium multi cristallin. Les résultats de l'ACV de plusieurs années ont été présentés. La **Table 2.6** montre l'énergie grise consommée pour la fabrication du PV à chaque année, et les énergies primaires totales sont illustrées par la **Figure 2.10**.

Table 2.6 : variation de l'énergie grise pour la fabrication du PV type multi-Si cristallin à des années différentes.

Phase de fabrication	Années de fabrication			
	Energie grise [MJ/m ²] en 2001	Energie grise [MJ/m ²] en 2004	Energie grise [MJ/m ²] en 2007	Energie grise [MJ/m ²] en 2011
Production de poly silicium ($EE_{pv,1}$)	2200 48.88%	1700 50.74%	1260 46.15%	950 43.77%
Découpage en wafers ($EE_{pv,2}$)	1000 22.22%	600 17.91%	420 15.38%	320 14.74
Traitement de cellules ($EE_{pv,3}$)	550 12.22%	550 16.41%	550 20.14%	550 25.34
Assemblage de modules ($EE_{pv,4}$)	350 7.77%	350 10.44%	350 12.82%	350 16.12%
Supports de fixation et autres ($EE_{pv,5}$)	400 8.88%	150 4.47%	150 5.49%	00 00.00%
Energie totale ($EE_{pv,T}$)	4500 100%	3350 100%	2730 100%	2170 100%

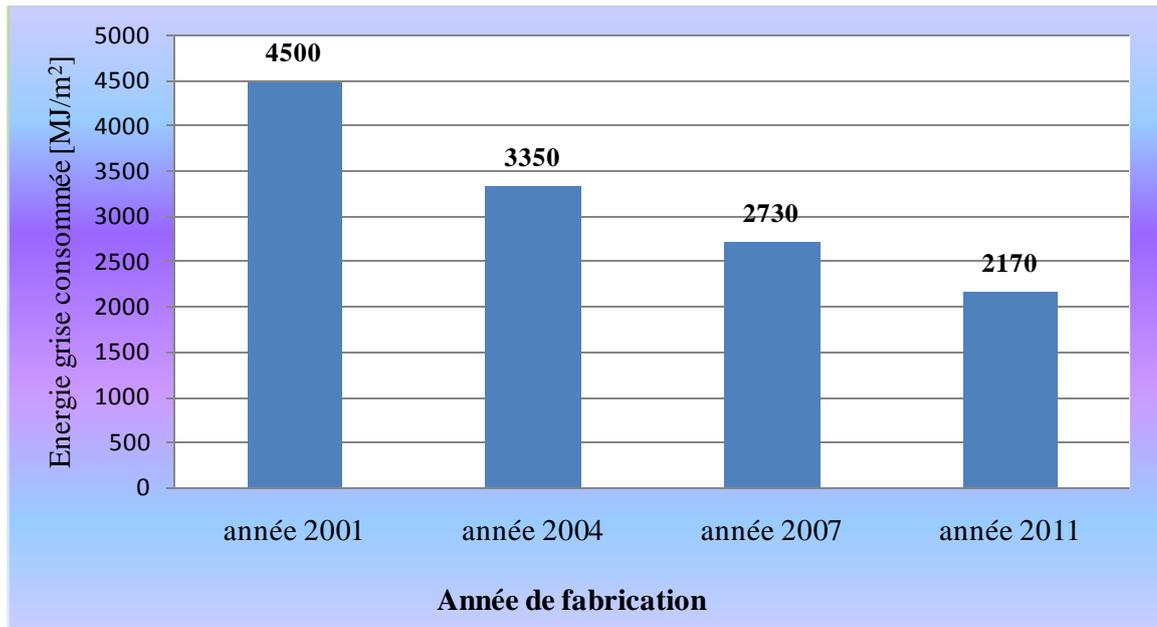


Figure 2.10 : Energie grise totale consommée à la fabrication du PV de type Multi Cristallin Silicium relative à quatre années différentes.

La **Figure 2.10** montre la variation de l'énergie primaire nécessaire pour la fabrication des panneaux PV par rapport aux années de production. Ceci signifie que les technologies utilisées pour la conception des panneaux PV jouent un rôle très important en vue de la minimisation des coûts énergétiques en termes d'énergie grise consommée d'une part, et de la réduction des impacts environnementaux d'autre part. Ainsi, grâce à l'automatisation des chaînes de production industrielles, la qualité des panneaux PV devient meilleure avec un coût d'achat minimum.

D'après la **Table 2.6** illustrant la distribution de l'énergie primaire consommée pour la fabrication d'un générateur photovoltaïque solaire, nous pouvons donner le pourcentage de l'énergie consommé à chaque phase de fabrication. La **Figure 2.11** montre cette distribution pour l'année 2007.

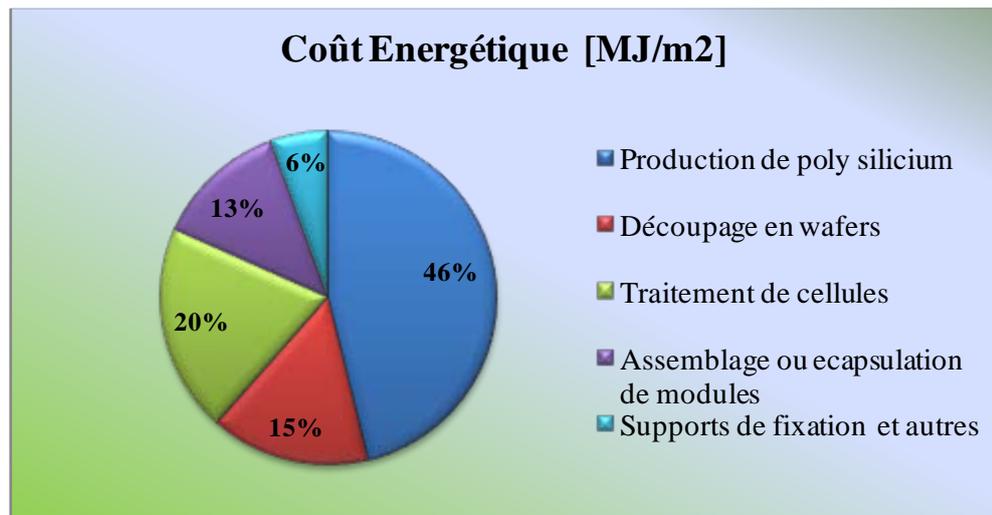


Figure 2. 11 : Distribution de l'énergie primaire d'un PV type Multi cristallin Silicium (MuC-Si) pour l'année 2007.

Sur l'exemple type donné à la **Figure 2.11**, nous présentons le pourcentage ou le taux d'appartenance de l'énergie primaire consommée pendant chaque phase de fabrication. Alors, on constate que la phase la plus prépondérante est celle de la production ou purification du silicium. En fin, pour les panneaux PV solaires de type Multi Cristallin silicium, on estime l'énergie primaire de fabrication par la valeur **2170MJ/m²** qui est déterminée à partir de l'expression suivante :

$$EP_{PV,T,MuC-Si} = EE_{pv,1} + EE_{pv,2} + EE_{pv,3} + EE_{pv,4} + EE_{pv,5} \quad (2.14)$$

Ainsi, à partir de l'ensemble des études présentées par les travaux de recherche précédents, il est apparu que l'énergie primaire de fabrication des panneaux solaires varie en fonction des technologies des panneaux, et en fonction de la technologie de fabrication utilisée.

2.2.2.3 Analyse du Cycle de Vie du générateur éolien

Par rapport aux sources d'énergies solaires, Les turbines éoliennes sont des systèmes de puissance caractérisés par une dynamique de fonctionnement différente. En effet, le comportement de la turbine éolienne est une hybridation entre la mécanique et l'électrique. Ceci signifie que la conception d'un système de puissance éolien homogène et performant exige une base d'expérience importante.

Dans le champ de fonctionnement, les systèmes de puissance éoliens sont considérés parmi les sources renouvelables qui fonctionnent sous des conditions trop critiques. Car dans un site défini par un potentiel énergétique de vent important, le risque d'endommagement d'un système éolien

augmente. Ainsi, comparés aux générateurs solaires, les générateurs éoliens nécessitent un coût de sécurité et de maintenance plus élevé.

Dans le cas général, pour un générateur éolien les points qui nous intéressent sont : la puissance nominale délivrée par le générateur, les performances, les caractéristiques, les milieux d'utilisation et la durée de vie. Cependant, la connaissance de ces points reste toujours relative puisque les phénomènes naturels externes peuvent dégrader les paramètres de performances du générateur. L'analyse du cycle de vie des turbines éoliennes représente un atout très important pour évaluer le coût énergétique primaire de fabrication d'un côté, et de quantifier les impacts environnementaux de l'autre côté. Dans ce cadre d'étude, plusieurs travaux de recherche ont présenté l'intervalle de variation du coût énergétique primaire pour un type de turbine éolienne donnée. La détermination de l'énergie primaire (coût énergétique) contenue d'une turbine éolienne EP_{wt} représente la somme des énergies primaires de l'ensemble des composants principaux de la turbine. La **Figure 2.12** présente la limite de l'Analyse du Cycle de vie d'un générateur éolien [MRK12].

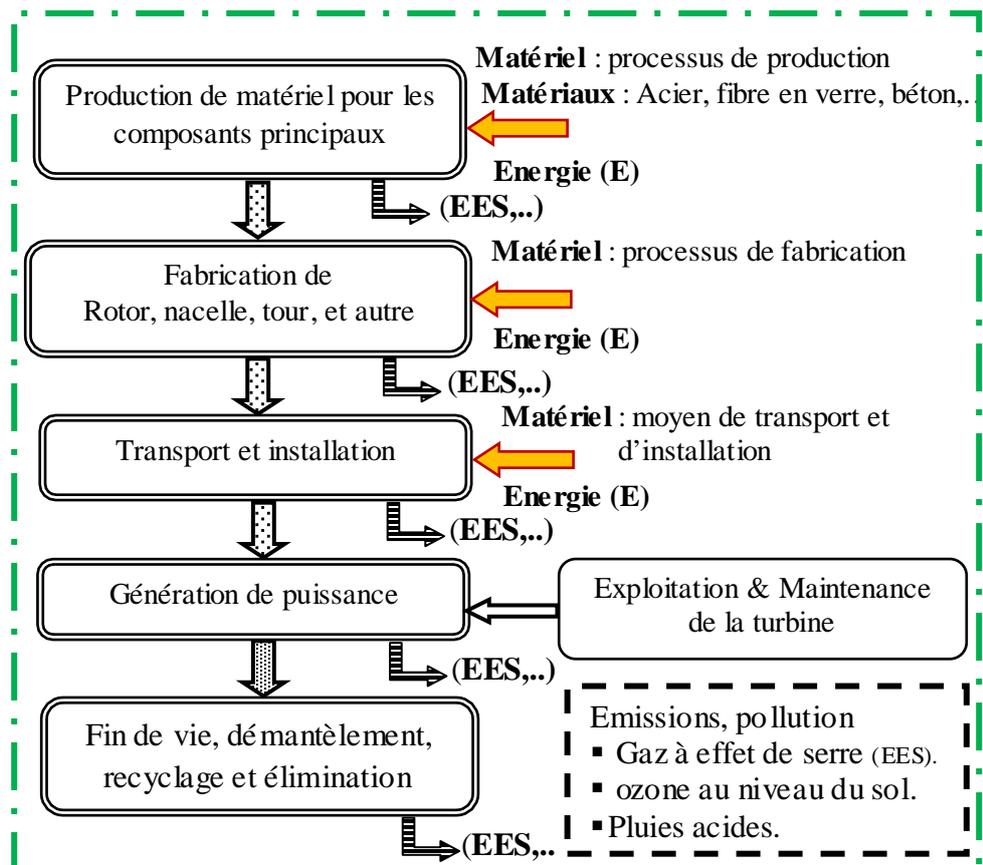


Figure 2. 12 : Cadre de l'ACV d'une turbine éolienne

Selon les travaux de recherche que nous avons consultés, on a conclu que l'énergie primaire intrinsèque des turbines éoliennes est trop variable. En effet, la conception d'une turbine éolienne est effectuée par rapport à des visions bien définies telles que la robustesse du générateur vis-à-vis des perturbations externes, la plage ou la gamme de puissance et les performances propres. Dans [ADh12] et [CHa14], les auteurs ont présenté des modèles qui mesurent la variation de l'énergie primaire des turbines en fonction de la surface balayée par le rotor de la turbine, les modèles obtenus sont donnés par la **Table 2.7**.

Table 2.7 : Modèles de coût énergétique pour des turbines éoliennes

Modèle de l'Énergie primaire $EP_{wt} [MJ/m^2]$	Surface de modélisation $A_{wt} [m^2]$	Source
$28.343A_{wt}^2 + 2361.3A_{wt}$	0-25	[ADh12]
$2361.3A_{wt} + 1875$	0-80	[CHa14]

A partir des deux modèles données précédemment on constate que, le premier montre que la variation de l'énergie primaire est soumise à une loi non linéaire par contre, dans le deuxième modèle la variation est linéaire. La différence de linéarité entre les modèles a une influence directe sur le coût énergétique total du système multi-sources.

Selon les modèles présentés et pour une gamme de turbines éoliennes de petite échelle taille, qui sont caractérisées par une surface de rotor inférieure ou égale à un mètre carré, le coût énergétique primaire EP_{wt} varie entre la valeur 2390 et 4235 $[MJ/m^2]$. Dans le cadre de notre travail, le modèle choisi pour l'optimisation du dimensionnement par rapport au coût énergétique primaire est le modèle linéaire.

2.2.2.4 *Analyse du Cycle de Vie des systèmes de stockage*

L'évaluation du coût énergétique consommé pendant la fabrication des batteries de stockage est un point très important dans notre étude. En effet, ce coût de fabrication représente une partie du coût non négligeable dans la fonction de coût globale du SMS. Suivant des travaux de recherche actuels, plusieurs auteurs ont montré que le coût énergétique (en MJ) de fabrication des batteries varie en fonction de la technologie de la batterie d'un côté et en fonction des matériaux de fabrication d'un autre côté. Cependant, dans le cadre de notre travail de thèse, la technologie des batteries choisie pour le développement du SMS sera limitée sur les batteries de type plomb-acide.

Selon [YTh10] [CSe11], pour les batteries de type plomb-acide (à plaques tubulaires ou plates), le coût énergétique primaire de fabrication EE_{Bat} équivaut à une valeur de 1.2 MJ/Wh. Cette valeur est obtenue sous des hypothèses bien définies [YTh10]. Dans le travail présenté par [ADh12], l'auteur a estimé le coût énergétique primaire de fabrication des batteries plomb-acide pour une durée de vie égale à 20 ans par 60 MJ/Ah (12V). Cependant, ces valeurs numériques données par l'ensemble des auteurs ne représentent pas la valeur absolue du coût de fabrication des batteries plomb-acide, car le coût énergétique de fabrication ne varie pas seulement en fonction de la technologie des batteries mais aussi en fonction du type d'application (application stationnaires, application de transmission ou système embarqués) dans laquelle la batterie est utilisée et la technologie utilisée pour la fabrication. Dans le cas de notre travail nous allons baser sur l'utilisation de la valeur de 60MJ/Ah pour l'étude de dimensionnement du système.

2.2.2.5 Analyse du Cycle de Vie des groupes électrogènes

L'étude de l'analyse du cycle de vie « ACV » des générateurs diesel dans le contexte de notre travail représente un point très important. En effet, par l'ACV nous pouvons évaluer les performances d'un groupe électrogène par rapport à l'environnement d'utilisation et par rapport aux autres sources du système multi-sources.

Parmi les configurations des systèmes d'électrification multi-sources les plus utilisées, nous citons les configurations qui intègrent les groupes électrogènes. Ces configurations ne sont pas choisies de façon aléatoire mais sont choisies en fonction des conditions d'électrification exigées par le site isolé d'une part, et en fonction des caractéristiques météorologiques du site d'autre part. Alors, tout système multi-source (SMS) installé doit être bien adapté à l'ensemble des contraintes souhaitées.

Dans la plupart des sites isolés, les groupes électrogènes sont largement utilisés pour l'électrification soit avec ou sans systèmes de stockage. Cependant, notre objectif principal est de construire un SMS caractérisé par un coût économiquement et écologiquement optimal.

Et c'est pour cette raison que nous allons nous baser sur l'analyse du cycle de vie afin d'évaluer au préalable le coût de développement d'un SMS hybride à base de sources renouvelables avec un générateur diesel, et d'estimer ses impacts sur le milieu environnemental [TLZ13]. Alors, l'évaluation globale du SMS par rapport aux coûts de conception et environnemental en utilisant l'analyse du cycle de vie sera effectuée d'une manière séparée sur chaque source d'énergie.

Par rapport au générateur diesel, l'objectif de l'analyse du cycle de vie est nécessaire pour la détermination des paramètres et des données que nous allons utiliser pour l'optimisation du SMS obtenu après la phase de dimensionnement. Et selon le comportement du générateur diesel vis-à-

vis des générateurs renouvelables, le générateur diesel appartient à la famille des sources non renouvelables (ou fossiles). Donc la production de l'énergie électrique par ce type de générateur utilise le carburant diesel comme une alimentation principale. En fin, l'analyse du cycle de vie du GD sera appliquée simultanément sur le générateur diesel et sur le carburant d'alimentation. Dans les paragraphes qui suivent nous allons détailler un ensemble de travaux qui expliquent le principe de l'analyse du cycle de vie des générateurs diesel.

Dans [SAP06], les auteurs ont fait une étude comparative du cycle de vie d'un système hybride composé de deux générateurs de puissance différents, le premier générateur représente une pile à combustible à base de carbonate fondu (MCFC, Molten Carbon Fuel Cells). Le deuxième générateur est un générateur diesel qui est utilisé comme une source secondaire. Le système de puissance hybride a été utilisé pour une application de marine. Cependant, dans notre étude on s'intéresse seulement au générateur diesel GD qui est composé d'un moteur diesel et une génératrice électrique. L'étude du cycle de vie du générateur diesel a été appliquée sur une durée de 20 ans de fonctionnement.

Dans ce travail, deux aspects sont abordés l'aspect énergétique et l'aspect environnemental. Ces deux aspects prennent en considération respectivement, le coût de fabrication des générateurs d'énergie en mégajoule [*MJouKwh*] et le coût des émissions des gaz à effet de serre générées par les processus de fabrication et de fonctionnement.

Les résultats obtenus par l'analyse du cycle de vie (ACV) des systèmes sont fortement liés à la base de données qui caractérise le système sous test. Donc, le nombre et le type des données utilisées pour l'analyse du cycle de vie est parmi les facteurs les plus importants pour atteindre l'objectif souhaité. Selon [SAP06], le générateur diesel utilisé comme une source d'alimentation secondaire doit fonctionner 6000h par an et une durée de vie (Life Time Period) égale à 20 ans (120000h). L'énergie intrinsèque, obtenue par l'application de l'analyse du cycle de vie, nécessaire pour la fabrication de ce type de générateur diesel est égale à **33.63kWh/kW(6961.1 MJ/kW)**. La quantité des gaz à effet de serre dégagée par ce processus de fabrication est égale à : $CO_2 = 535.9kg$. La détermination de l'énergie requise pour la conception du générateur diesel pendant sa durée de vie globale peut inclure le coût de remplacement des composants avant la fin de la durée de vie.

Le modèle de cycle de vie utilisé dans l'étude précédente est présenté par le schéma bloc suivant :

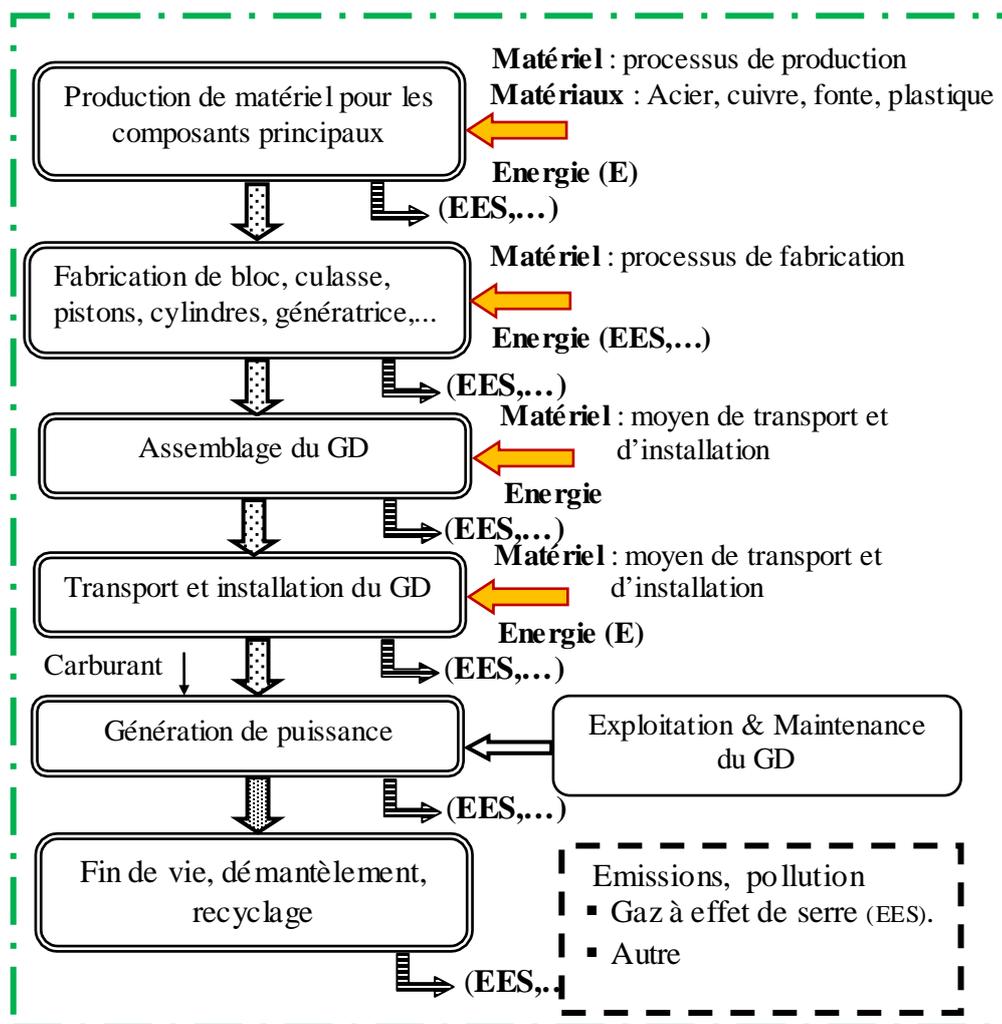


Figure 2. 13 : Schéma bloc de l'ACV du Générateur Diesel

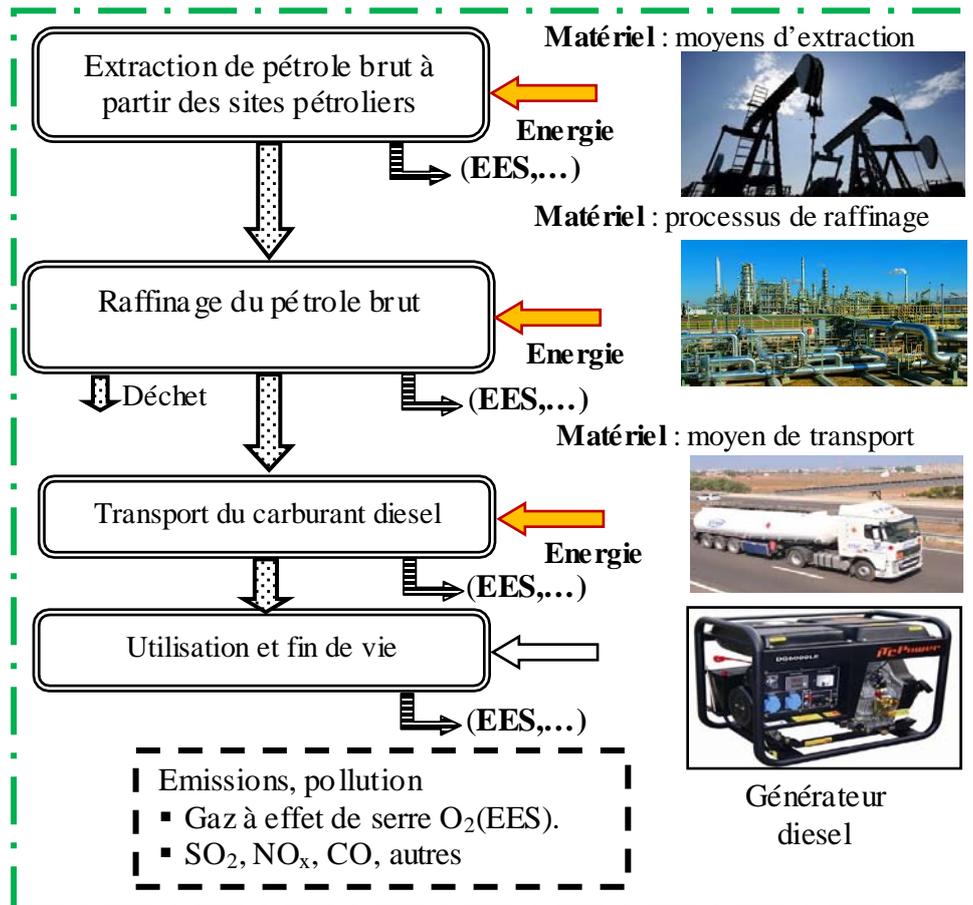


Figure 2. 14 : Schéma bloc de l'ACV du carburant Diesel.

Dans l'étude présentée par [SAP06], les composants principaux du générateur diesel à fabriquer ne sont pas détaillés, et dans ce cas le poids propre de chaque pièce principale du générateur diesel n'est pas connu. Ainsi, l'énergie consommée par chaque composant pendant la phase de fabrication reste toujours indéfinie

Une étude comparative du cycle de vie a été appliquée sur un mini système d'électrification d'un habitat résidentiel [BFM09]. Dans cette étude, l'analyse du cycle de vie est utilisée pour évaluer les performances et le coût d'une turbine éolienne par rapport au générateur diesel. La méthodologie de l'analyse du cycle de vie du générateur diesel est basée sur le principe de décomposition des processus. La figure suivante montre la relation entre les différents processus.

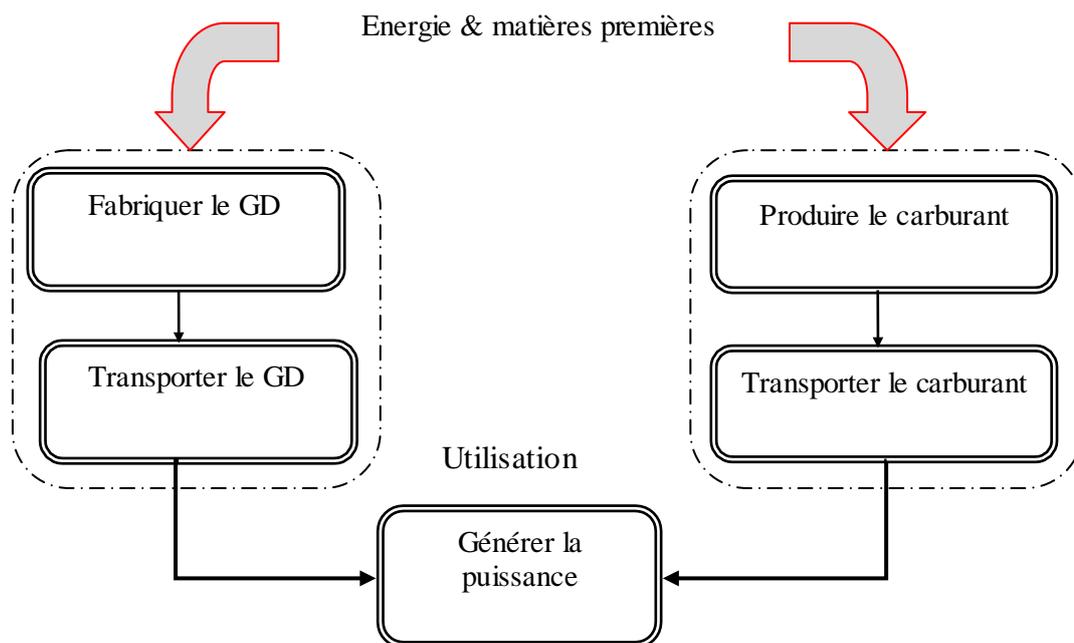


Figure 2. 15 Détermination de l'énergie grise en MJ pour la fabrication et l'utilisation d'un GD

La détermination de l'énergie grise du générateur diesel est subdivisée en deux parties principales. La première partie est obtenue directement à partir de la fabrication du générateur diesel et la deuxième partie sera calculée en fonction de l'utilisation du générateur diesel. Les processus d'extraction de l'énergie totale sont définis comme suit :

Processus de fabrication du générateur diesel : la fabrication du générateur diesel c'est une phase plus complexe et varie en fonction du type du générateur. En effet, chaque type de générateur a une architecture et constitution propre. Dans le cas général, on peut distinguer deux types de technologies de fabrication différentes, la technologie classique et la technologie moderne. Alors, l'énergie intrinsèque consommée pour toute fabrication a une relation directe avec la technologie utilisée. Pour déterminer l'énergie grise ou intrinsèque (Embodied Energy) de fabrication d'un générateur diesel, il est indispensable de connaître les matériaux principaux utilisés à la conception.

Dans la gamme des générateurs diesels à faible puissance, présentés dans la **Table 2.8**, un modèle moyen a été choisi comme exemple de démonstration. Le générateur diesel choisi (puissance de 4 kW) est composé de 60% d'acier, 35% d'aluminium et 5% de cuivre avec un poids total égale à 90kg (ou 80kg dans la **Table 2.8**). La **Table 2.9** illustre l'énergie grise et la quantité d'énergie dégagée sous forme de gaz à effet de serre propre à chaque matériau. Ainsi, par l'utilisation du générateur diesel choisi à partir de la **Table 2.9** et les énergies en mégajoule des matériaux de production données dans la **Table 2.8**, l'énergie intrinsèque de fabrication du

générateur diesel sur une durée de vie de 20 ans est estimée par la valeur de : $505kWh/kW = (1818 MJ/kW)$.

Processus de production du carburant : dans ce processus un ensemble de données sont collectées pour la production du carburant diesel et l'évaluation de la quantité du fuel consommé par les unités de fabrication.

Processus de transport du générateur diesel : Une fois les générateurs diesels fabriqués, ils sont transportés à l'aide de moyens de transports. L'énergie consommée pendant le transport est calculée à partir de la quantité du carburant consommée et la distance entre la zone de fabrication et le site d'utilisation.

Transporter le carburant : représente le processus ou l'unité du transport du carburant diesel en utilisant des moyens de transport (camion-citerne).

Processus de production du carburant : Dans ce processus, on s'intéresse à l'énergie nécessaire à la fabrication du carburant.

Processus de génération de la puissance : dans cette unité, nous utilisons le générateur diesel conçu et le carburant diesel produit pour générer la puissance désirée. Le modèle du générateur diesel utilisé est sélectionné à partir d'un ensemble de générateurs diesel de puissances différentes. La **Table 2.8** montre une liste non exhaustive de ces générateurs. La quantité d'énergie grise consommée pendant la phase de l'utilisation du générateur diesel pour l'électrification sera déterminée en fonction des points suivants :

- L'énergie totale générée par le générateur diesel pendant sa durée de vie exprimée en kWh par nombre d'heures, pour alimenter le site isolé ;
- Paramètre de performances du générateur diesel [L/kWh] qui représente le rendement d'un litre de carburant diesel par rapport à la puissance fournie par le générateur diesel. La **Table 2.9** montre les différents rendements du carburant diesel pour chaque générateur et dans ce cas une valeur moyenne de $0.53 L/kWh$ a été utilisée.
- L'énergie intrinsèque d'un litre de carburant diesel consommée pendant la phase de combustion [kWh/L]. Ce rapport s'appelle le « *Pouvoir Calorifique Interne* » (PCI) qui varie en fonction du type de carburant utilisé, et dans le cas du carburant diesel conventionnel le PCI est égale à $38.6MJ/L = 10.72kWh/L$ [**TBT02**]. On peut définir aussi le PCI comme l'énergie interne contenue dans un litre de carburant.

Table 2. 8 : caractéristiques de quelques générateurs diesel à petite puissance

<i>Type du GD</i>	<i>Puissance nominale [kW]</i>	<i>Rendement du carburant pour une charge de 50% [L/kWh]</i>	<i>Rendement du carburant pour une charge de 100% [L/kWh]</i>	<i>Poids [kg]</i>
<i>Duopower</i>	<i>4.00</i>	<i>0.71</i>	<i>0.53</i>	<i>80</i>
<i>Duopower</i>	<i>6.5</i>	<i>0.45</i>	<i>0.38</i>	<i>108</i>
<i>Duopower</i>	<i>7.5</i>	<i>0.31</i>	<i>0.32</i>	<i>108</i>
<i>Hardy diesel</i>	<i>5.5</i>	<i>0.91</i>	<i>-</i>	<i>42</i>

Table 2. 9 : Energie intrinsèque de production des matériaux et les émissions associées

<i>Matériau</i>	<i>Energie grise [kWh/kg]</i>	<i>Emissions à effet de serre (kgCO₂/kg)</i>
<i>Acier inoxydable</i>	<i>17.92</i>	<i>6.45</i>
<i>Aluminium</i>	<i>34.75</i>	<i>13.06</i>
<i>Cuivre</i>	<i>14.85</i>	<i>4.56</i>
<i>Acier</i>	<i>5.98</i>	<i>1.98</i>
<i>acier galvanisé</i>	<i>11.11</i>	<i>3.9</i>
<i>Plastique</i>	<i>12.69</i>	<i>4.29</i>

Les émissions de CO₂ sont liées à la source d'énergie utilisée pour fabriquer ces matériaux (pétrole, gaz, nucléaire,...). Ainsi, l'énergie grise de fabrication et de transport a été calculée pour un générateur diesel pendant un cycle de 20 ans (avec deux générateurs ayant une durée de vie de 10 ans, et le carburant diesel utilisé). La distribution d'énergie consommée pour chaque processus et les émissions à effet de serre sont présentées respectivement par la **Figure 2.16** et la **Figure 2.17**. Le processus de génération de puissance du générateur diesel (la puissance générée pour l'électrification) n'est pas présenté dans ces figures. En effet, l'énergie grise correspond à la phase de génération de puissance varie en fonction de la période d'exploitation du générateur dans le site.

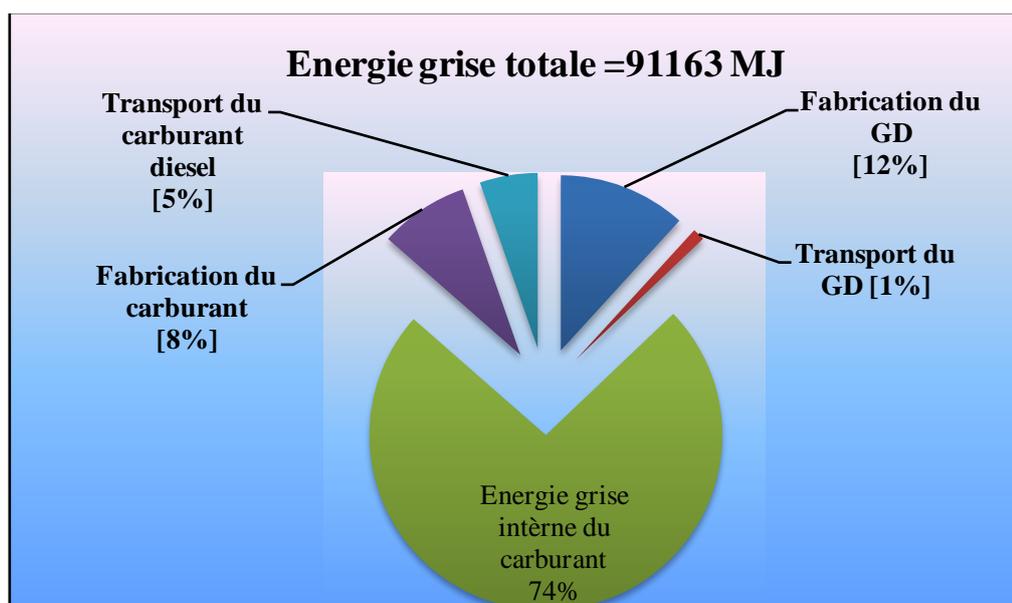


Figure 2. 16 : Energie grise associée aux processus liés à la fabrication du générateur diesel de 4 kW et le carburant utilisé sur une durée de vie égale à 20 ans dans l’application visée.

L’énergie grise interne du carburant est égale à 10.72 kWh/L (émission en kg CO₂/L=2.86). L’énergie grise liée à la production (ou fabrication) est égal à 1.01 kWh/L (émission en kg CO₂/L=0.29). On observe que le coût énergétique de fabrication d’un litre de carburant diesel représente 10% de la valeur énergétique interne pour un litre de carburant.

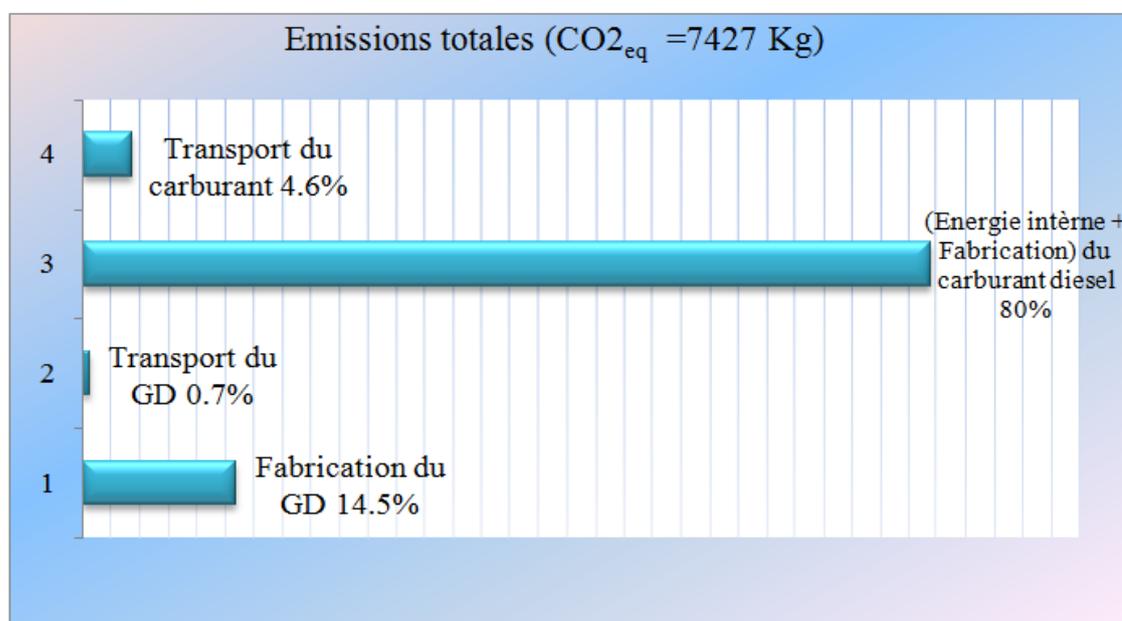


Figure 2. 17 : Distribution des émissions à effet de serre sur une durée de vie du générateur diesel égale à 20 ans.

D'après la **Figure 2.16** on constate que l'énergie grise interne du carburant diesel a atteint une valeur de 74 %. A partir de l'ensemble de travaux que nous avons cités précédemment, l'aspect du vieillissement du générateur diesel n'est pas pris en compte. Cependant, dans notre travail de thèse l'aspect du vieillissement du générateur diesel représente un objectif essentiel pour l'optimisation du dimensionnement du système multi-sources. Par l'intégration du critère de vieillissement du générateur diesel dans la boucle d'optimisation, le coût du GD utilisé dans le SMS sera minimal. Ceci va minimiser le coût global de la configuration hybride du système multi-sources. Alors, à partir de l'ensemble des travaux que nous avons cité précédemment, l'énergie grise totale du générateur diesel déterminée par l'analyse de cycle de vie est donnée par la somme des différentes énergies produites à chaque phase.

$$EE_{DG0} = EE_{FDG} + EE_{TDG} \quad (2.15)$$

$$EE_{FuelDG} = EE_{PFuelDG} + EE_{TFuelDG} \quad (2.16)$$

$$EE_{ConsFuelDG} = NL_{DG/Lifetime} * PCI_{FuelDG} \quad (2.17)$$

Où

$EE_{DG0} [MJ]$: Energies grises liées à la mise à disposition du générateur diesel sans carburant ;

$EE_{FuelDG} [MJ]$: Energies grises liées au carburant diesel (Fuel) consommé par le générateur diesel ;

$EE_{FDG} [MJ]$: Energie grise pour la fabrication du générateur diesel ;

$EE_{TDG} [MJ]$: Energie grise du transport du générateur diesel ;

$EE_{PFuelDG} [MJ]$: Energie grise pour la production (ou la fabrication) du carburant;

$EE_{TFuelDG} [MJ]$: Energie grise de transport du carburant ;

$EE_{ConsFuelDG} [MJ]$: Energie grise consommée par le générateur diesel pendant son fonctionnement ;

$NL_{DG/Lifetime}$: Nombre de litres consommés par le générateur diesel pendant sa durée de fonctionnement ;

$PCI_{FuelDG} [kwh/L]$: représente le Pouvoir Calorifique Interne de combustion du carburant diesel (ou l'énergie interne du carburant diesel) ;

$EE_{MDG} [MJ]$: Représente le coût de maintenance du GD qui varie en fonction de nombre d'heures de fonctionnement et le milieu d'utilisation. Ainsi, ce coût englobe l'opération de changement d'huile moteur et changement des filtres (filtres d'huile, filtres de gasoil et filtres d'air).

$Lifetime [h]$: est la durée de vie du générateur diesel donnée en heure.

Ainsi, l'énergie grise totale du générateur diesel s'écrit par l'expression suivante :

$$EE_{GD} [MJ] = \{EE_{FDG} + EE_{TDG}\} + \{EE_{PFuelDG} + EE_{TFuelDG}\} + \{NL_{DG/Lifetime} * PCI_{FuelDG}\} + \{EE_{MDG}\} \quad (2.18)$$

Cette dernière expression représente le coût en méga joule du générateur diesel pendant toute sa durée de vie. Dans le cadre de notre étude cette expression sera utilisée comme une fonction *objectif* à optimiser.

2.2.3 Partie 3 : Modèles de vieillissement des sources d'énergie du SMS

Dans le cas général, tout système est caractérisé par une durée de vie ou de service propre. Pendant cette durée de fonctionnement, le système nécessite une opération de maintenance. Pour estimer la durée de fonctionnement d'un système, nous nous basons sur l'analyse de vieillissement. Dans notre travail, l'étude de vieillissement est limitée aux systèmes de production d'énergie, utilisés pour l'électrification.

Les concepteurs des systèmes énergétiques (générateurs solaires, générateurs éoliens, générateurs diesel et autres) utilisent une base de connaissances pour déterminer la durée de vie de chaque système dans des conditions de fonctionnement bien définies. Cette base de connaissances rassemble des informations sur la qualité des matériaux de fabrication, les technologies utilisées pour la conception et la compatibilité entre les composants du système. Cependant, les contraintes d'utilisation (ou d'exploitation) du système et l'opération de maintenance restent aussi des paramètres influents sur sa durée de vie. Ainsi, le temps de fonctionnement associé à un système de production avant toute utilisation, est donné généralement, sous des conditions fonctionnelles étudiées. Dans le cas de notre travail, l'aspect de vieillissement va jouer un rôle très important pour le dimensionnement et l'optimisation du système multi-sources (PV/WT/DG + Bat). En effet, la durée de vie du système d'électrification hybride est en relation directe avec la durée de vie de l'ensemble des sources constituant le SMS.

Pour cela, nous allons présenter, dans les sous sections qui suivent et d'une manière non approfondie, le phénomène de vieillissement des générateurs solaires, des générateurs éoliens et des générateurs diesel. Cependant, l'étude de vieillissement du banc de stockage sera traitée de façon plus détaillée en utilisant l'algorithme de comptage des cycles Rainflow et le simulateur dynamique du SMS.

2.3.1 *Vieillessement des panneaux photovoltaïques*

Les panneaux solaires sont des générateurs de puissance développés à base de cellules de natures différentes. Suivant la littérature, la technologie des cellules utilisées pour la fabrication des panneaux photovoltaïques représente un paramètre essentiel afin d'améliorer les caractéristiques du panneau. En effet, la cellule est le composant fondamental pour améliorer les caractéristiques électriques du panneau (qualité de l'énergie produite) d'un côté, et les caractéristiques de service ou de vie d'un autre côté. Suivant [AFZ12], la durée de vie minimale des PV peut varier entre 20 et 30 ans. Parmi les facteurs (ou les paramètres) qui accélèrent le phénomène de vieillissement des panneaux photovoltaïques, nous citons les facteurs de dégradation climatiques et les facteurs de dégradation externes [AFZ12] et [EKa12].

Les facteurs climatiques sont : l'irradiation Ultra Violet (UV), la température ambiante élevée, la corrosion, les gaz atmosphériques pollués, cycles thermiques journaliers et annuels, irradiation solaire à haute intensité et l'humidité relative. Les facteurs externes qui peuvent dégrader un panneau PV pendant sa durée de vie sont : la pluie, le vent, la condensation et l'évaporation de l'eau et de la poussière, les végétations et les obstacles proches [AWC].

Ainsi, l'architecture chimique et organique des matériaux de fabrication des cellules solaires sera modifiée en fonction des contraintes (ou facteurs) climatiques, et en fonction des facteurs externes. Donc, l'étude de vieillissement des panneaux photovoltaïques devant un nombre important de facteurs de dégradation devient une tâche très complexe et difficile à réaliser. En plus, l'étude de vieillissement des générateurs PV de façon détaillée ne représente pas l'objectif de notre travail. Alors, pour implémenter un générateur PV comme une source renouvelable dans un système d'électrification multi-sources, nous nous baserons sur l'utilisation d'un générateur PV caractérisé par une durée de vie égale à 25 ans.

2.3.2 *Vieillessement des générateurs éoliens*

Le générateur éolien est un système dynamique qui travaille sur la production de l'énergie électrique à partir du potentiel éolien. La dynamique du système caractérise la principale différence entre un générateur solaire et un générateur éolien. En effet, la constitution de la turbine éolienne est basée sur l'assemblage d'une partie fixe avec une partie mobile. Cette dernière partie représente le comportement dynamique de la turbine éolienne qui est en relation avec la dynamique de la vitesse du vent. Ainsi, la constitution globale de la turbine éolienne est une hybridation entre un système aérodynamique, un système mécanique et un système électrique. L'utilisation des turbines éoliennes pour l'électrification dans des sites isolés nécessite des études vraiment sérieuses. Ces études concernent les variations climatiques du site

(vitesse du vent et sens du mouvement, température, humidité, milieu d'utilisation,..) et les emplacements géographiques. Puisque la durée de vie de la turbine éolienne est strictement liée aux conditions climatiques externes du site.

La turbine éolienne est composée de plusieurs sous-systèmes, chaque composant ou sous système possède une durée de vie propre car sa tâche est spécifique. En plus, les contraintes qui génèrent la dégradation ou le vieillissement ne sont pas identiques pour tous les composants de la turbine.

Suivant [AAS14], les composants de la turbine éolienne les plus importants sont : la boîte à vitesse et les pales. En effet, ces composants représentent les composants les plus coûteux par rapport au reste des composants et nécessitent une opération de maintenance et une supervision permanentes.

Ainsi, l'étude du vieillissement de ces composants exige la connaissance de l'ensemble de contraintes externes ou internes qui peuvent perturber le bon fonctionnement pendant le cycle de vie global de la turbine.

2.3.2.1 Vieillessement de la boîte à vitesse de la turbine éolienne

Le fonctionnement de la turbine éolienne sous des températures élevées fait apparaître des points chauds dans la boîte à vitesse, ce qui entraîne une diminution de la durée de vie de l'huile de graissage ou de lubrification. La dégradation de ce dernier représente une cause pour la dégradation rapide du système interne de la boîte à vitesse de la turbine. Le vent est un autre paramètre très important qui peut dégrader la vie de la boîte à vitesse. Lorsque le vent frappe les pâles du rotor de la turbine par une rafale, un désalignement temporaire entre les arbres connectés à la boîte à vitesse sera créé. Ce phénomène de désalignement peut endommager les supports de boîte à vitesse et réduire la durée de vie de l'éolienne.

2.3.2.2 Vieillessement des pâles de la turbine éolienne

Les pâles de la turbine éolienne représentent la surface qui absorbe l'énergie cinétique éolienne qui sera convertie en énergie mécanique. Donc, l'énergie produite par une turbine éolienne varie proportionnellement par rapport à la surface du rotor de la turbine. C'est pour cette raison que, l'endommagement ou le taux de dégradation des pâles de la turbine augmente lorsque la taille de la turbine augmente. Parmi les paramètres ou les facteurs qui peuvent dégrader les pâles d'une turbine éolienne, nous citons les structures longues et flexibles, les vibrations dues au mode de résonance, les variations aléatoires de la charge dues à la nature

aléatoire de la vitesse du vent, le fonctionnement continu dans des conditions différentes et l'absence de maintenance pendant la durée de vie [MMS06].

2.3.3 Vieillessement des générateurs diesel

Les groupes électrogènes (ou générateurs diesel) sont généralement utilisés pour l'électrification des habitats résidentiels dans des sites isolés. Cependant, dans les systèmes hybrides autonomes multi-sources, le générateur diesel est utilisé comme une source de compensation par rapport aux sources renouvelables et bancs de stockage. Alors, le vieillissement d'un générateur diesel a une relation directe avec la taille des sources connectées au GD sur le même bus pour alimenter la charge ainsi que la gestion du GD.

En effet, le dimensionnement d'un SMS (PV/WT/DG + batteries) doit être réalisé selon des objectifs et des contraintes différentes. Parmi ces objectifs et contraintes nous citons :

- ❖ Minimisation du coût de l'installation hybride ou SMS par la détermination de la dimension optimale ;
- ❖ Satisfaction complète du profil de charge pendant une durée de fonctionnement définie ;
- ❖ Pourcentage de participation (ou pénétration) de chaque source de puissance pour la satisfaction des besoins en énergie ;
- ❖ Configuration de la connexion choisie pour le système multi-sources.

En fin, la durée de vie d'un GD va dépendre de plusieurs paramètres et parmi ces paramètres :

- ❖ Le milieu d'exploitation du générateur (type de site) ;
- ❖ La durée de fonctionnement du générateur ;
- ❖ L'intervalle de puissance utilisé pour le générateur ;
- ❖ La gestion du générateur (nombre de démarrage) par rapport à la charge.
- ❖ La période de maintenance du générateur ;

Pour étudier le vieillissement du GD, deux parties doivent être prises en considération, le vieillissement du moteur thermique diesel et le vieillissement de la génératrice connectée au moteur. Le vieillissement du moteur thermique diesel est dû à plusieurs facteurs ou paramètres :

Intervalle de fonctionnement : L'intervalle de fonctionnement du GD représente l'intervalle dans lequel le générateur peut fournir des puissances avec des rendements acceptables. Le rendement de fonctionnement a une influence importante sur la durée de vie du générateur. Selon [ASa06], le fonctionnement du générateur diesel avec une charge inférieure à 40% de sa puissance nominale peut conduire à une augmentation de l'usure corrosive à cause de la présence de soufre dans le carburant diesel ce qui entraîne une durée de vie limitée avec une dégradation dans les performances du générateur.

Contrôle du GD : Le fonctionnement du GD pour l'électrification nécessite un système de contrôle qui permet de changer l'état du générateur. Généralement, un générateur possède deux états, un état d'arrêt (off) et état de marche (on).

Pour atteindre les deux états, deux seuils de contrôle sont nécessaires, un seuil pour démarrer le générateur et un seuil pour l'arrêt. La bande entre les deux seuils du générateur sera définie par rapport aux objectifs d'utilisation. Le nombre de démarrage (ou marche-arrêt) du GD est parmi les paramètres qui peuvent diminuer sa durée de vie. En effet, le démarrage du GD représente un régime oscillatoire pendant lequel le générateur absorbe des chocs et des vibrations distribués sur ses composants.

Maintenance du GD : La maintenance représente l'ensemble des opérations qui assurent le bon fonctionnement du GD. Le cycle de vie du GD a une forte relation avec l'opération de maintenance. Parmi les opérations de maintenance nécessaires pour le générateur diesel on distingue :

- *huile de lubrification* : le changement régulier de l'huile de lubrification pour le générateur est un facteur essentiel pour réduire les effets de dégradation du générateur. En effet, la dégradation des caractéristiques de l'huile de lubrification sous l'effet de température de fonctionnement va dégrader le vilebrequin, les supports du vilebrequin et la pompe de graissage.

- système de filtrage : pour un GD, le remplacement du filtre à huile, du filtre à gasoil et du filtre à air est nécessaire afin d'améliorer les performances du générateur et augmenter sa durée de vie.

La distribution des taux de vieillissement en fonction de causes de défaillances est donnée par la figure suivante :

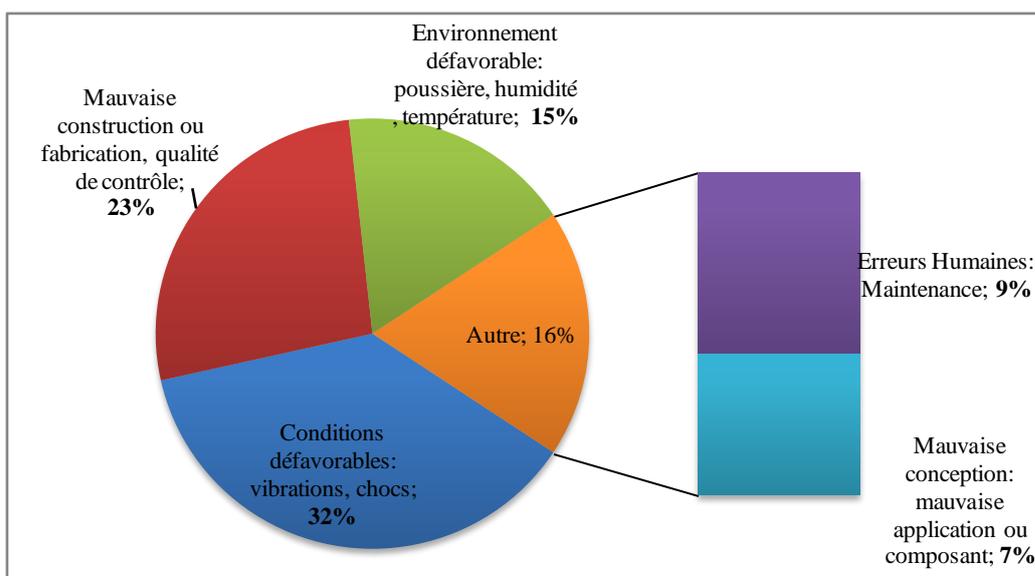


Figure 2. 18 : Distribution des causes de vieillissement du GD [KRH90]

A partir de la figure précédente on observe que les causes de vieillissement du GD sont différentes. Cependant, dans l'optique de notre travail, nous considérons que le GD est de bonne qualité et fonctionne dans des conditions très favorables. Par conséquent, l'étude du vieillissement du GD dans notre cas est limitée au nombre de démarrage du générateur. En effet, ce paramètre a une pondération de vieillissement très élevée. D'ailleurs, nous présenterons dans le chapitre 4 un modèle de vieillissement du GD par rapport au nombre de démarrage.

2.3.4 Vieillessement des systèmes de stockage

Depuis une centaine d'années, les batteries de stockage d'énergie ont connu une utilisation très large. Cette utilisation a été partagée entre les secteurs industriels productifs, les moyens de communication (Satellites), les systèmes de transport (Trains, TGV, etc.), les systèmes embarqués (véhicules hybrides) et les systèmes d'électrification décentralisés. Cependant, le type d'application exige le choix de la technologie de la batterie. Le choix de la technologie joue un rôle très important pour avoir de meilleures performances tels que, le poids, le rendement de la batterie, l'autonomie de la batterie, la qualité de la puissance délivrée et sa durée de vie. Dans le cas de notre étude l'application visée appartient aux systèmes d'alimentation sans coupure (Uninterruptible Power Supply) [BBM14][BoA14]. Ainsi, le système d'électrification multi-sources (PV/WT/DG + batterie) développé dans notre travail utilise un banc de batterie comme un sous-système pour le stockage et l'électrification. Avant de présenter la méthodologie proposée pour l'étude du vieillissement du banc de stockage qui est basé sur des batteries de type plomb-acide, il est important d'aborder les approches les plus utilisées dans la littérature pour l'étude du vieillissement des batteries en général.

2.3.4.1 *Présentation des méthodes d'estimation de vieillissement des batteries*

Le fonctionnement des systèmes de stockage électrochimiques varie en fonction du type d'applications dans laquelle ces systèmes sont installés. Ainsi, l'évolution de leurs durées de vie est strictement dépendante de la sollicitation effectuée pendant son fonctionnement, des grandeurs physique et chimiques internes et des grandeurs environnementaux externes. Devant ces contraintes opérationnelles, l'estimation de la durée de vie des batteries avec une grande précision représente une tâche complexe et difficile. Selon différents travaux de recherche [QBa12] [MMo09], plusieurs approches pour l'estimation de la durée vie des batteries de stockage ont été présentées. Chaque approche est basée sur une méthodologie d'estimation propre.

Parmi les approches les plus couramment utilisées pour l'estimation de la durée de vie des batteries, nous citons les *approches à base des propriétés physiques*, les *approches basées sur l'intelligence artificielle* et les *approches par la fatigue*.

1. Approches à base des propriétés physiques : le principe de ces approches est fondé sur des propriétés physico-chimiques de la batterie. Pour cela, le modèle estimant le vieillissement de la batterie utilise les grandeurs physiques et chimiques de la batterie comme des entrées nécessaires pour l'estimation de la durée de vie.

Dans la famille de ces approches d'étude on distingue : les modèles de vieillissement électrochimiques, les modèles de vieillissement empiriques et les modèles de vieillissement empiriques avec un modèle de vieillissement modélisé par un circuit équivalent.

2. Approches basées sur l'intelligence artificielle : L'étude de vieillissement par cette famille est basé sur le développement d'une base de connaissance à partir de l'évolution du système. La détermination d'un modèle de vieillissement par l'approche artificielle se baser sur le principe d'apprentissage. Les réseaux de neurones artificiels sont parmi les méthodes qui nécessitent le mécanisme d'apprentissage. Alors, un modèle neuronal permet de construire un modèle de vieillissement mesurant la dégradation d'un système.

3. Approches de fatigue : Ces approches permettent d'évaluer le taux de dégradation des systèmes par rapport à leur utilisation. Dans cette famille on distingue la méthode de durée de vie pondérée (*weighted Ah-throughput*) et la méthode de Wöhler. L'étude de vieillissement des batteries par la méthode de *Ah* pondérée est basée sur la mesure de la capacité de batterie C_n avant l'utilisation puis la mesure de sa capacité à la fin de vie de la batterie. Pour appliquer cette méthode, on suppose que la fin de vie de batterie équivalente à une capacité finale C_f . Le

principe de la méthode de Wöhler est fondé sur la courbe définie par le constructeur de la batterie. Cependant, cette méthode est utilisée pour estimer la durée de vie de batterie pour une profondeur de fonctionnement DOD constante. A partir de l'ensemble des approches présentées précédemment nous allons proposer une méthodologie pour l'étude de vieillissement des batteries. Dans le cadre de notre étude, l'objectif principal de l'étude de vieillissement des batteries est pour évaluer la durée de vie de la batterie dans un système d'électrification autonome (PV/WT/DG+Batterie).

2.3.4.2 Description de la méthodologie de vieillissement proposée

Le système de stockage intégré dans le système d'électrification multi-sources (SMS) est un banc de batteries de type plomb-acide. Ce banc de batteries est composé de quatre batteries de la même capacité connectées en série.

L'évaluation de la durée de vie de la batterie (banc de batterie) au sein du système multi-sources nécessite le développement d'un outil qui permet de prédire la dégradation de la batterie en fonction de la phase de charge-décharge dans le système. Ainsi, Le choix de l'approche utilisée pour l'étude de vieillissement va dépendre à plusieurs points. Parmi ces points, les paramètres ou les grandeurs caractérisant la batterie (tension, courants, SOC, DOD, température,...) qui nous permettent de trouver un modèle de vieillissement plus satisfait, le paramètre de temps de fonctionnement du système multi-sources complet (simulateur dynamique) comportant la batterie par rapport au temps consommé par l'algorithme de vieillissement. En effet, le dimensionnement du système multi-sources prenant en compte le modèle de vieillissement de la batterie exige l'évaluation de temps de fonctionnement du système global vis-à-vis du temps consommé par l'algorithme de vieillissement. Le modèle de vieillissement développé dans le cadre de notre étude pour l'estimation de la période de vie du banc de batteries est fondé sur l'hybridation entre les approches de fatigue de Wöhler et l'algorithme de comptage des cyclique **Rainflow**.

Pour cela, dans un premier temps à base des données réelles pour des batteries stationnaires de plomb-acide nous nous allons présenter la variation de nombre de cycles (N_c) par rapport aux profondeurs de décharge (DOD). La présentation des ces courbes (courbes de Wöhler) doit être fondée sur les données réelle des batteries et à l'aide des techniques d'interpolation bien adaptées. Ensuite, une fois les modèles de Wöhler sont obtenus nous allons travailler sur l'extraction des modèles mathématique équivalents à leurs courbes. Un modèle mathématique permet d'établir la relation entre le nombre de cycles de la batterie et sa profondeur de décharge.

Les grandeurs utilisées pour l'évaluation de la dégradation de la batterie sont mesurées à partir des sorties du simulateur dynamique. Le modèle global de vieillissement de la batterie prenant en compte la température de fonctionnement est donné par la **Figure 2.19** suivante :

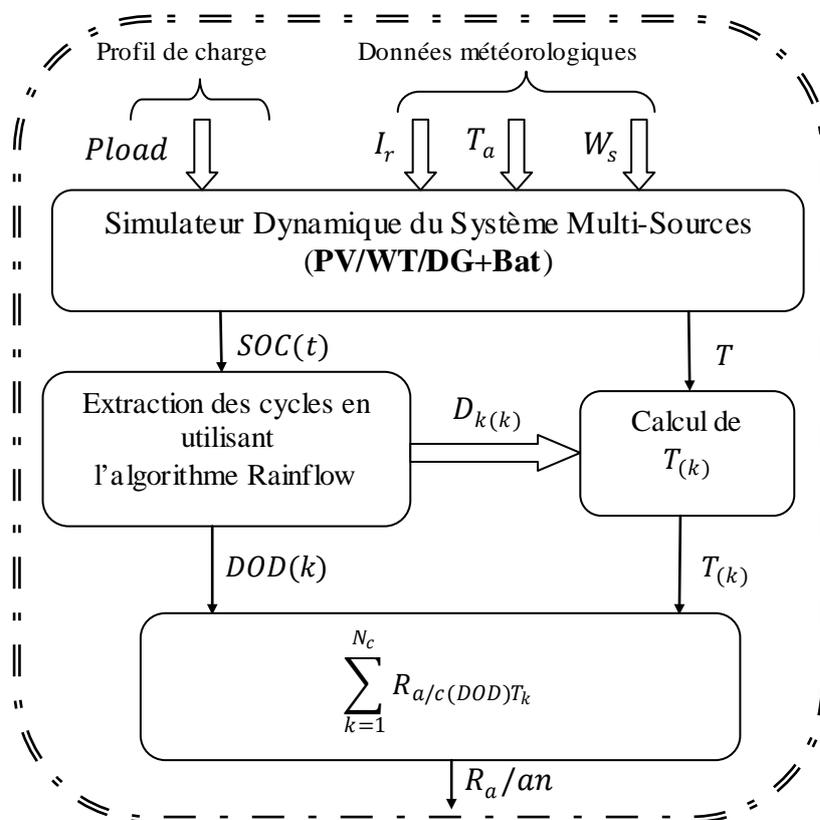


Figure 2.19 : Modèle pour l'étude de vieillissement de la batterie.

Utilisation du simulateur dynamique

Le simulateur dynamique (SD) développé traduisant le comportement dynamique du SMS sera présenté en détail dans le chapitre trois. Dans ce SD le banc de batteries et son modèle thermiques ont été développés. Le fonctionnement du SD nécessite les données climatiques du site (Irradiation, Vitesse du vent, Température ambiante, et profil de charge) sur un an afin de fournir l'état de charge de la batterie (SOC) ou la profondeur de décharge (DOD) de la batterie. La simulation a été effectuée sur un an avec un pas d'échantillonnage de trente minutes. Suivant l'algorithme présenté à la **Figure 2.19**, l'algorithme d'extraction ou de comptage **Rainflow** permet de déterminer l'intervalle des cycles ($D_k(k)$) et la profondeur de décharge (DOD_k or $DOD(k)$) de chaque cycle de fonctionnement (k) basant sur le temps de simulation et l'état de charge de la batterie. Le calcul de la température absolue $T(k)$ pour chaque cycle k est basé sur l'évaluation de la température moyenne pour un cycle k en connaissant la température absolue T et l'intervalle de cycles $D_k(k)$. Dans cette partie d'étude le détail du SD n'est pas

nécessaire. Alors, avant d'utiliser le simulateur dynamique pour la simulation du système multi-source et le modèle de la batterie comportant son modèle thermique, il est important de trouver les courbes de vieillissement de la batterie étudiée.

Détermination des courbes de vieillissement ($N_c = F(DOD)$) pour les batteries de type plomb-acide

La détermination des courbes de vieillissement pour les batteries s'effectue à base des données du fabricant qui caractérisent la durée de vie de la batterie par le nombre de cycle en fonction d'une même profondeur de décharge DOD. Deux classes principales de batteries stationnaires ont été étudiées : les batteries plomb-acide Ventilées et les batteries plomb-acide GEL (Electrolyte Gélifié) avec valve de régulation (Valve Regulated Lead-Acid batteries) [HG V03] et [CHS12]. Dans chaque classe, deux architectures internes différentes sont utilisées : les batteries à plaques plates et les batteries à plaques tubulaires. Le type de la classe n'a pas une grande influence sur la durée de vie de la batterie. Cependant, la technologie plate est plus affectée. Les batteries tubulaires ont une durée de vie plus longue par rapport à la technologie plate, mais sont plus limitées en courant de charge-décharge. Dans cette étude nous allons présenter les variations de nombre de cycles N_c en fonction des profondeurs de décharge DOD pour les deux types de batteries.

Table 2. 10 : Nombre de cycles des batteries en fonction de la profondeur de décharge DOD .

DOD%		20	30	40	50	60	80	90	100
Nombre des cycles	VRLAB1	4250	2750	2125	-	1375	1000	-	800
	VRLAB2	6250	4200	3200	-	2080	1500	-	1250
	VRLAB3	-	5800	4300	3500	2800	-	1800	1650
	VEB1	4500	3000	2250	-	1500	-	1000	900
	VEB2	8400	5500	4250	-	2800	-	1800	1700
	VEB3	6000	4000	3000	-	2000	1500	-	1200

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;

VEB1: Batterie Ventilée avec plaques positives tubulaires et séparation spécifique (OPzS);

VEB2: Batterie Ventilée avec plaques positives tubulaires et séparation spécifique (OPzS Solar-Cells);

VEB3: Batterie Ventilée avec plaques positives tubulaires et séparation spécifique (OPzS Solar-Blocks).

On note que les batteries stationnaires avec plaques positives tubulaires sont (OPzS Solar-Cells and OPzS Solar-Blocks) capables de fournir des performances à haut niveau et bonne fiabilité dans toutes les applications stationnaires (solar, wind, micro-grid). À partir de la table précédente et par l'utilisation de la technique d'interpolation les modèles développés pour les batteries sont donnés respectivement par les équations suivantes:

$$N_{c(DOD)} = 12850e^{-(9.738 * DOD)} + 3210e^{-(1.4299 * DOD)} \quad (2.19)$$

$$N_{c(DOD)} = 138200e^{-(7.246 * DOD)} + 3763e^{-(1.139 * DOD)} \quad (2.20)$$

$$N_{c(DOD)} = 14690e^{-(8.087 * DOD)} + 2863e^{-(1.17 * DOD)} \quad (2.21)$$

$$N_{c(DOD)} = 11250e^{-(8.087 * DOD)} + 2863e^{-(1.17 * DOD)} \quad (2.22)$$

$$N_{c(DOD)} = 24090e^{-(9.346 * DOD)} + 6085e^{-(1.319 * DOD)} \quad (2.23)$$

$$N_{c(DOD)} = 14850e^{-(7.98 * DOD)} + 3766e^{-(1.158 * DOD)} \quad (2.24)$$

Où N_c est le nombre maximum des cycles pour les batteries.

Ainsi, le nombre maximum des cycles en fonction de la profondeur DOD est donné par la **Figure 2.20**. Il caractérise la durée de vie pour les différentes batteries stationnaires de types plomb-acide.

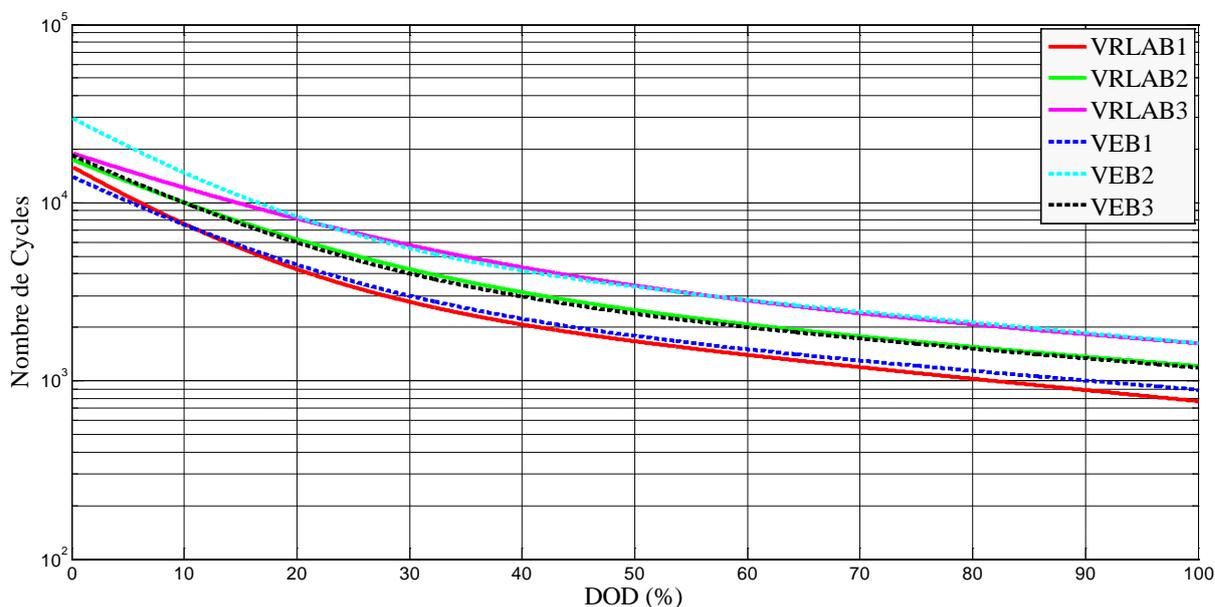


Figure 2.20 : Nombre de cycles en fonction de profondeur de décharge DOD.

Les modèles des batteries développés dans la **Figure 2.20** représentent la variation de nombre de cycles d'une manière continue en fonction de la profondeur de décharge DOD. La variation de nombre de cycle ne prend pas en considération l'influence de la température sur la batterie. Donc, pour étudier le vieillissement de la batterie sous l'influence de la température, il nécessaire

d'obtenir le modèle qui tient en compte l'effet de température de fonctionnement sur la batterie.

Influence de température sur le vieillissement de batterie

Selon les concepteurs des batteries, le fonctionnement d'une batterie hors de la plage de température spécifique peut dégrader ou endommager son comportement de façons rapide. En effet, l'augmentation de la température de fonctionnement ou ambiante accélère les réactions chimiques ce qui entraîne le phénomène de gazage ou autre. Ainsi, le nombre de cycles de batteries varie en fonction de la profondeur et aussi en fonction de la température de fonctionnement. Dans l'intervalle [20°C – 50°C], le nombre de cycle diminue lorsque la température augmente [HGV03] et [CHS12]. Par exemple, selon la loi d'Arrhenius, pour les batteries type GEL SOLAR VRLA, l'augmentation de la température par 10°C en dessus de 20°C va diminuer la durée de vie de batterie par un taux de 50%. Cependant, ce pourcentage de réduction n'est pas valable pour tous les types de batteries plomb-acide. Pour comparer la durée de vie entre la technologie tubulaire et plate on prend les batteries plomb-acide type Gel VRLA avec des plaques tubulaires (A600 SOLAR); le degré d'influence de la température est de 20% de moins que les batteries GEL-VRLA avec la technologie de plaque plates (SOLAR and SOLAR BLOCK). Ainsi, pour déterminer le nombre de cycles par rapport à la température de fonctionnement, les points suivants sont considérés pour l'interpolation du modèle mathématique:

$$T[^\circ\text{C}]=[20\ 25\ 30\ 40\ 50] \quad N_c[\%]=[100\ 71\ 50\ 25\ 12.5]$$

Avec

T: Température de fonctionnement de la batterie en degré de Celsius.

N_c%: le pourcentage de nombre de cycles de la batterie par rapport au nombre de référence mesuré à 20°C est donné par l'équation (25).

$$N_c \% = \frac{N_{c(DOD)T}}{N_{c(DOD)20^\circ}} \tag{2.25}$$

Avec

N_{c(DOD)T}: Nombre maximal de cycles à la température *T*.

N_{c(DOD)20}: Nombre maximal de cycles à la température 20°C.

Alors, le modèle mathématique qui montre la variation de nombre de cycles en fonction de la température est donné par l'expression (26).

$$N_{c(T)} \% = \begin{cases} 100 & 0 < T \leq 20^\circ\text{C} \\ 37.68 T^{-1.101} - 0.3897 & T > 20^\circ\text{C} \end{cases} \tag{2.26}$$

La représentation graphique de ce modèle est illustrée par la **Figure 2.21**.

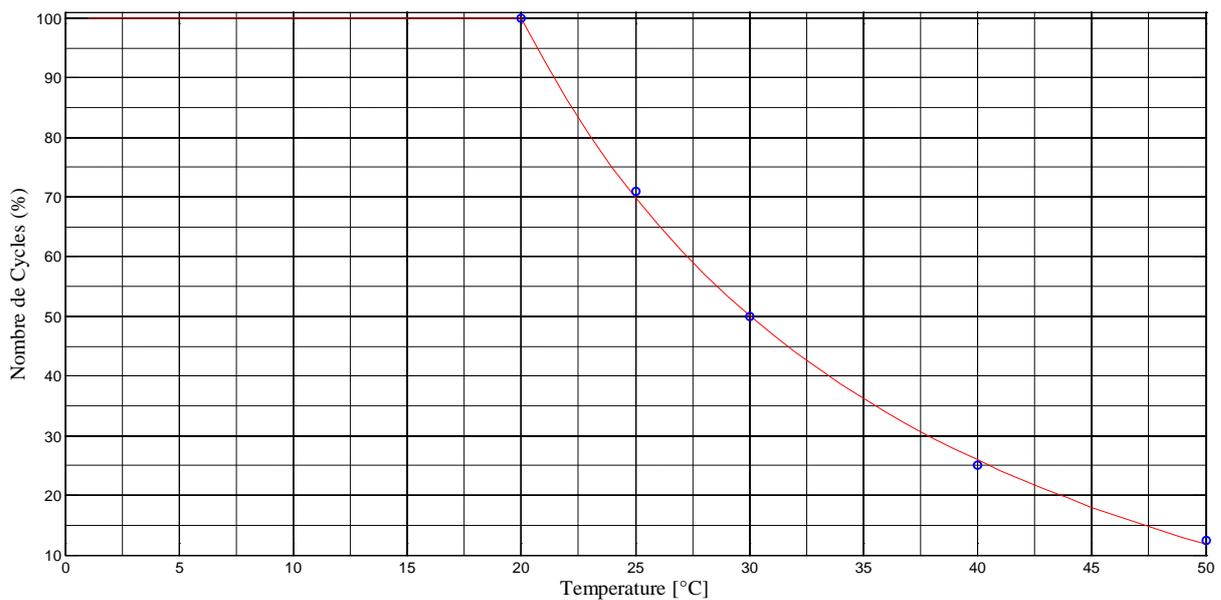


Figure 2.21 : Influence de température sur le nombre maximal de nombre de cycles.

Pour connaître la température de fonctionnement de la batterie nous utilisons l'expression suivante :

$$T = T_a + \Delta T \quad (2.27)$$

Avec

T_a : Température ambiante.

ΔT : Variations de température liées aux pertes thermiques internes P_{Th} .

Afin d'obtenir la relation entre les variations de température ΔT et les pertes thermiques il est essentiel de définir le modèle thermique utilisé pour la batterie.

Généralement, le modèle thermique du banc de batteries permet l'évaluation des pertes thermiques générées par les effets internes et externes [MDA06]. Pour les batteries plomb-acide utilisées dans les systèmes multi-sources, les pertes de chaleur externes sont liées à la température ambiante qui affecte la batterie durant son fonctionnement [JAH09]. Les pertes de chaleur externes produites par la batterie de stockage sont liées à l'effet électrique (Ohmique) et à l'effet de gazage (chimique). L'effet de gazage apparaît lorsque la batterie est surchargée sous de température considérable.

Ainsi, le modèle thermique proposé donnée à la **Figure 2.22** est présenté par un circuit électrique équivalent qui comporte une capacité thermique C_{Th} , une résistance thermique de la batterie R_{Th} et un courant de source qui représente les pertes thermiques.

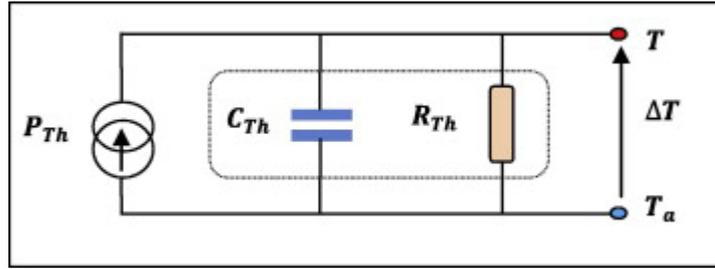


Figure 2. 22 : Modèle thermique de la batterie.

Les pertes thermiques sont calculées à partir du courant I dans la batterie et la résistance R_{int} interne comme suit :

$$P_{th} = R_{int} * I^2 \quad (2.28)$$

La résistance interne en fonction du courant de charge-décharge, la quantité de charge et la température est donnée par l'expression mathématique suivante [CJB94]:

$$R_{int}(T) = (R_1 + R_2 + R_3)(1 - \alpha_T \Delta T) = \left(\frac{k_1}{1 + I^{k_2}} + \frac{k_3}{(1 - Q/C_T)^{k_4 + k_5}} \right) (1 - \alpha_T \Delta T) \quad (2.29)$$

Avec

C_T : Capacité maximale de la batterie; Q : quantité de charge délivrée ou fournie pendant un temps t ;

k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 et α_T sont des constants; R_1 et R_2 termes représentent l'influence du courant de charge-décharge I et la quantité de charge Q sur l'état chimique de la batterie ; $R_3 = k_5$ représente l'effet Ohmique.

À partir du modèle thermique représenté à la Figure 2.22, l'expression de variation de température ΔT est donnée par :

$$\Delta T = Z_{th} P_{th} = Z_{th} R_{int} I^2 \quad (2.30)$$

Z_{th} est l'impédance thermique composée d'une capacité thermique C_{Th} en parallèle avec une résistance thermique R_{Th} . Le modèle thermique est intégré dans le modèle du vieillissement et l'ensemble intégré dans le simulateur dynamique du système. Ainsi, l'impédance thermique Z_{th} est utilisée pour évaluer le transfert de chaleur par conduction et convection, et due à la complexité du simulateur dynamique cette impédance est considérée constante durant le cycle de recharge et de décharge.

Modèle de vieillissement global de la batterie

Le modèle de vieillissement global de la batterie permet de lier les variations de nombre de cycles en fonction de deux grandeurs simultanément, la profondeur de décharge DOD et la température absolue des cycles T_k . Ainsi, En combinant l'équation (2.19), (2.26) et (2.27), le nombre maximal de cycles est donné par l'expression suivante :

$$N_{C(DOD)T} = \begin{cases} (12850 e^{-(9.738 * DOD)} + 3210 e^{-(1.429 * DOD)}) & \text{si } 0 < T \leq 20^\circ\text{C} \\ (12850 e^{-(9.738 * DOD)} + 3210 e^{-(1.429 * DOD)}) \cdot (37.68 T^{-1.101} - 0.3897) & \text{si } T > 20^\circ\text{C} \end{cases} \quad (2.31)$$

Dans l'intervalle [0°C 20°C], une influence de température négligeable sur le vieillissement de la batterie a été identifiée. En plus, le modèle de vieillissement de batterie correspond seulement l'équation (2.19). Pour $T > 20^\circ\text{C}$, l'influence de température n'est pas négligeable et l'équation (2.19) est multipliée par l'équation (2.26).

Ensuite, on prend l'inverse de nombre de cycles obtenu, nous obtenons le taux de vieillissement pour chaque cycle k. L'expression est donnée par la suivante équation :

$$R_{a/C(DOD_k)T_k} = \frac{1}{N_{(DOD_k)T_k}} \quad (2.32)$$

Ainsi, la **Figure 2.23** représente le taux de vieillissement dépend de la profondeur DOD et la température. Dans de nombreuses applications, la batterie est soumise à des cycles à différentes amplitudes et différentes températures. Dans ces conditions, afin de définir une durée de vie de la batterie, dans notre travail on propose de cumuler le taux de vieillissement de chaque cycle.

L'équation (2.33) donne la formule pour calculer le taux de vieillissement R_a pour N_c cycles. Lorsque le taux de cumule est proche de l'unité ce-ci signifie que la batterie est à la fin de sa durée de vie.

$$R_a = \sum_{k=1}^{N_c} C(DOD_k)T_k \quad (2.33)$$

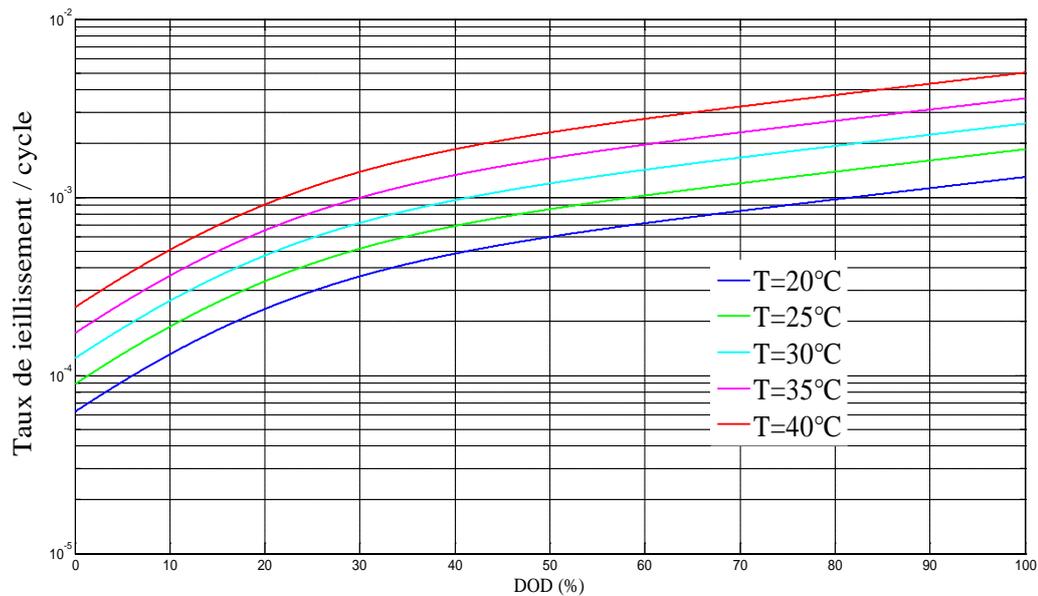


Figure 2.23 : Evolution de taux de vieillissement par cycle $R_{a/c}(DOD,T)$ en fonction de DOD pour des températures différentes.

2.3.4.3 Principe d'extraction des cycles de fonctionnement en utilisant l'ARF

L'extraction des cycles de fonctionnement de batterie est réalisée à l'aide d'un algorithme d'extraction qui s'appelle Rainflow. Cet algorithme permet d'identifier les cycles effectués par la batterie au cours de l'opération de charge-décharge. Ainsi, par l'application de l'algorithme Rainflow (**ARF**) nous pouvons déterminer le nombre de cycles k et leurs profondeurs DOD_k en utilisant l'état de charge de la batterie à partir du simulateur dynamique. Le principe de l'algorithme Rainflow est basé sur l'extraction des cycles à partir du signal qui représente l'évolution de dégradation d'un système. Par cette approche de comptage, l'extraction des cycles consiste à localiser les extrema (points max et points min) du signal.

La **Figure 2.24** illustre le principe d'extraction des cycles en utilisant l'ARF [DSD82] [MAT13]. Pour cet exemple, les demi-cycles sont présentés comme suit : Demi-cycles (A-B, B-C, C-D, D-E, E-F, F-G, G-H et H-I), un cycle est défini par deux demi-cycles.

Ainsi, la profondeur d'un cycle k est notée $DOD(k)$ et représente la profondeur moyenne de deux demi-cycles successifs.

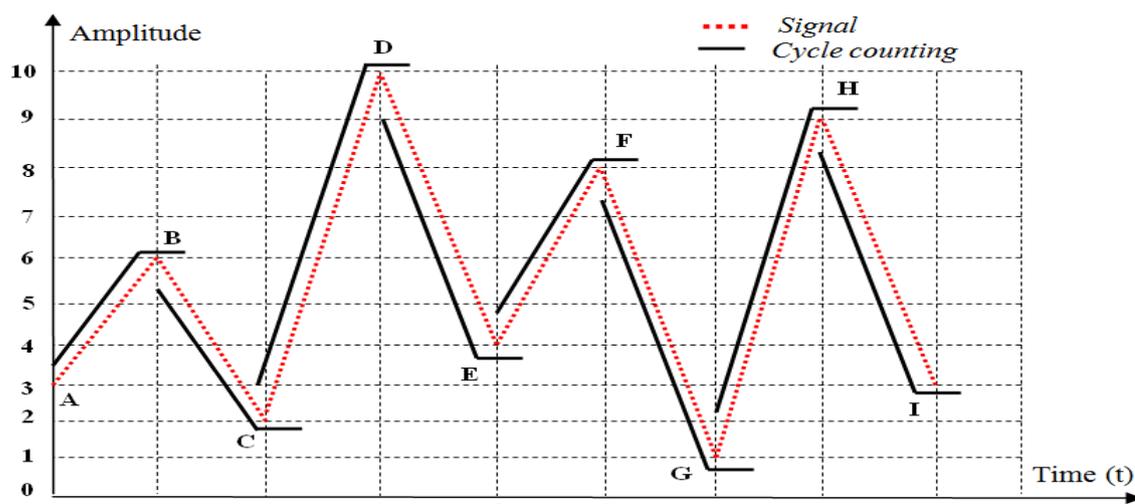


Figure 2. 24 : Principe d'extraction des cycles en utilisant l'algorithme Rainflow.

Chaque cycle de fonctionnement représente une dégradation partielle par rapport au vieillissement global. Pour les systèmes électrochimiques tels que les batteries de stockage, le processus de fonctionnement est cyclique due à l'opération de charge-décharge. Pour cette raison, on trouve que, il est très intéressant d'adopter l'algorithme Rainflow pour l'étude de vieillissement des batteries. On estime que par l'application de ce genre d'algorithme sur signal qui mesure l'état de charge de la batterie (SOC) doit donner des meilleurs résultats.

2.3.4.4 Application de la méthodologie proposée pour l'estimation de vieillissement des batteries plomb-acide dans un SMS

Avant l'application de cet algorithme pour l'étude de vieillissement du banc de stockage il est nécessaire de présenter les données et les paramètres du simulateur dynamique utilisés pour la simulation et l'évaluation du taux de vieillissement de banc de stockage. Ainsi, les données météorologiques utilisées sont les données du site tunisien [STu04]. Les entrées du simulateur dynamique qui représentent les paramètres de dimensionnement pour le système multi-source sont résumés dans la table suivante :

Table 2. 11 : Données d'entrée du simulateur dynamique.

Paramètres	A_{pv} [m ²]	A_{wt} [m ²]	Fuel _{DG} [L/h]	C_{bat} [Ah]	SOC_{min} [%]	SOC_{dmin} [%]	SOC_{dmax} [%]	P_{Load} [Kwh/yr]
Valeur	13	2.2	0.16	220	30	35	70	2193

Avec

A_{pv} : Surface du générateur photovoltaïque ;

A_{wt} : Surface balayée par le rotor de la turbine éolienne ;

$Fuel_{DG}$: Fuel consommé par le GD ;

C_{bat} : capacité de la batterie ; et P_{Load} : Puissance consommée par la charge.

Le fonctionnement du générateur diesel est strictement lié à l'état de charge de la batterie (SOC). Le GD démarre pour délivrer une puissance lorsque l'état de charge de la batterie atteint une valeur minimale correspond au seuil noté SOC_{dmin} et change son état de fonctionnement si l'état de charge atteint un seuil maximal égale à SOC_{dmax} . Les deux seuils de fonctionnement (SOC_{dmin} , SOC_{dmax}) sont choisis de telle sorte que l'excès d'énergie est faible que possible et le nombre de démarrage et réduit.

SOC_{min} Représente le seuil minimal de la batterie qui est utilisé pour protéger la batterie afin de ne pas atteindre une profondeur maximale pendant la décharge.

Les rendements des différents convertisseurs sont donnés dans la table suivante [TML14] [TML13][TML15b][KEK06][ADh12]:

Table 2. 12 : Rapports des rendements des convertisseurs

Rendement	$\eta_{dc/dc}$	$\eta_{dc/ac}$	$\eta_{ac/dc}$	η_{batd}	η_{batc}
Valeur [%]	95	95	95	100	85

$\eta_{dc/dc}$: Rendement du convertisseur DC/DC; $\eta_{dc/ac}$, $\eta_{ac/dc}$: Rendement du convertisseur DC/AC et AC/DC respectivement; η_{batc} , η_{batd} : Rendements de charge et de décharge de la batterie.

La **Figure 2.25** représente l'évolution du courant de charge-décharge de la batterie et son état de charge (SOC) sur une période d'un an de simulation (17520 points). Il est intéressant d'observer l'intermittence de la batterie avec plusieurs profondeurs de décharge (DOD). Ceci est dû aux fluctuations des sources renouvelables et de la variation aléatoire de la charge. La variation de l'état de charge (SOC) de la batterie est observée par un seuil bas (SOC_{min}) et un seuil haut (SOC_{max}) comme montre l'équation d'inégalité suivante [TML15b], [TML13], [TML14], [TML15a]:

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \tag{2.34}$$

La relation entre les seuils de fonctionnement du banc de batterie par rapport à la profondeur de décharge est donnée par l'expression suivante :

$$DOD_{Max} = SOC_{max} - SOC_{min} \tag{2.35}$$

Pour évaluer le vieillissement de la batterie par rapport à la profondeur de décharge on simule la batterie par des valeurs de DOD_{Max} différentes.

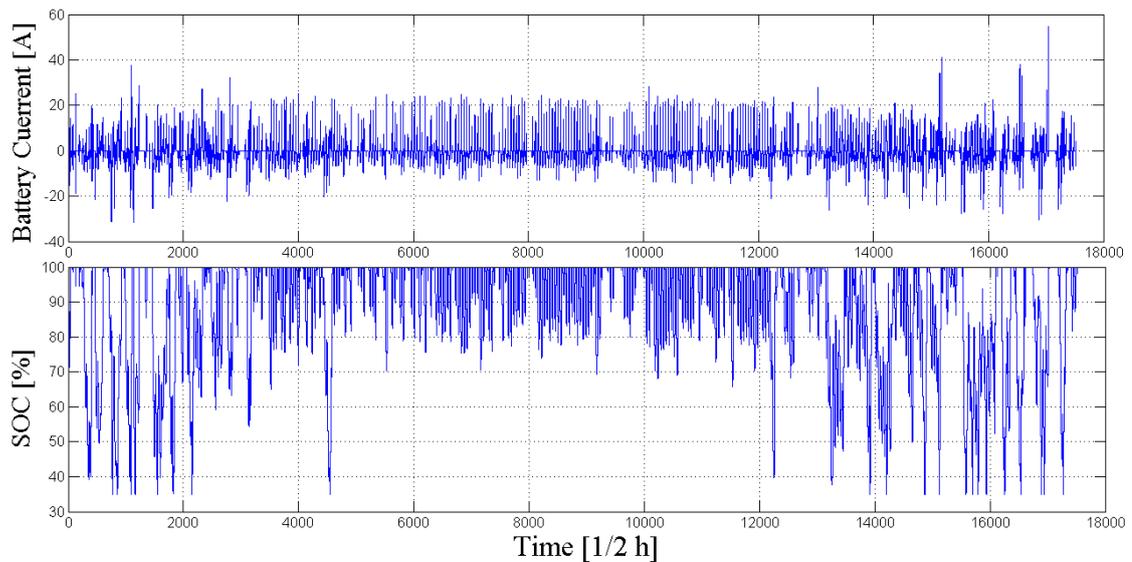


Figure 2.25 : Courant de batterie et SOC en fonction du temps
($DOD_{Max} = 70\%$ and $SOC_{max} = 100\%$)

Dans le cas d'une profondeur de décharge DOD_{Max} égale à 30%, les variations de l'état de charge de la batterie sont illustrées à la **Figure 2.26**. Pour cette profondeur de décharge, les deux seuils de fonctionnement du générateur diesel sont respectivement $SOC_{dmin} = 72\%$ and $SOC_{dmax} = 87\%$.

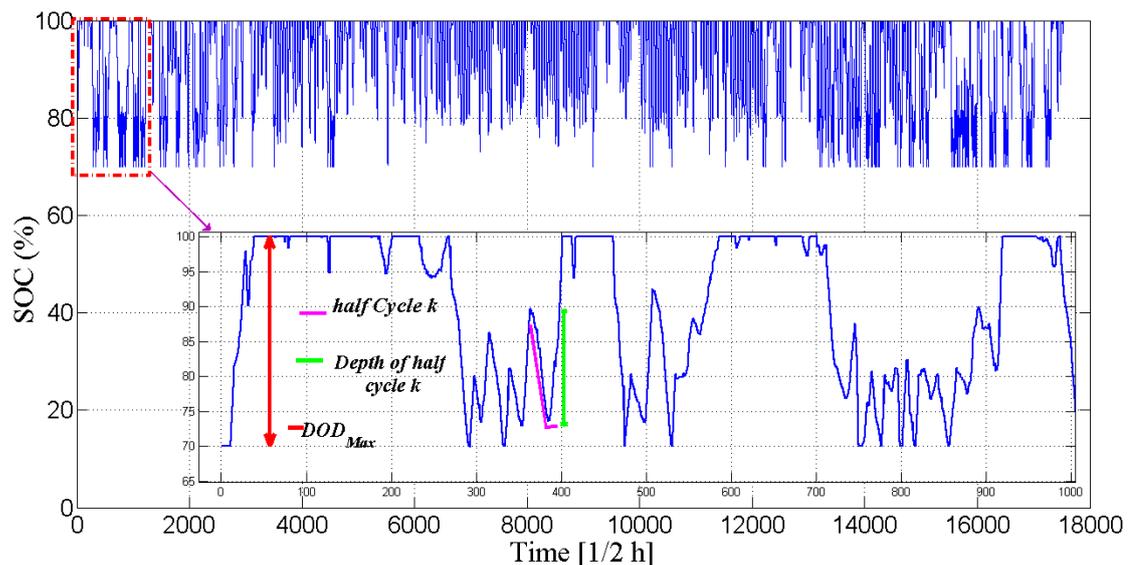


Figure 2.26 : Etat de charge de la batterie pour $DOD_{Max} = 30\%$ and $SOC_{max} = 100\%$.

L'évaluation de taux de vieillissement de la batterie exige la connaissance de nombre de cycles de fonctionnement. Par conséquent, l'extraction des cycles de batterie sera effectuée par l'application de l'algorithme Rainflow sur le signal de l'état de charge de la batterie pendant un an de fonctionnement [TML15b]. La sortie de l'algorithme Rainflow est donnée à la **Figure 2.27**. Chaque cycle est caractérisé par une amplitude et une durée ou intervalle.

La multiplicité des profondeurs des cycles est due à la gestion de l'énergie entre les sources intermittentes du système hybride, stockage et charge.

En effet, il est noté que la profondeur $DOD(k)$ est maximum lorsque les générateurs renouvelables fournissent moins d'énergie (dans le mois d'automne). Dans ce moment, le générateur diesel fonctionne.

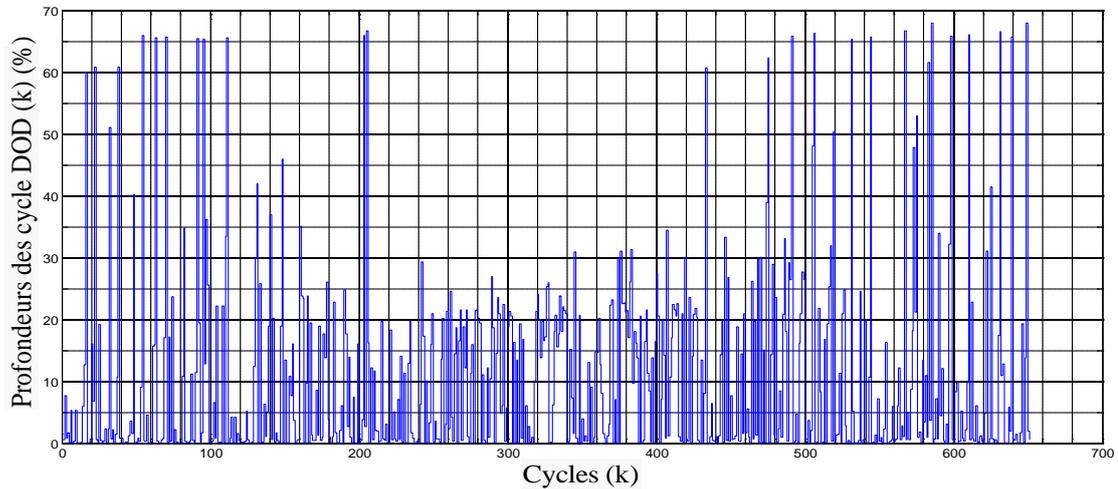


Figure 2.27 : profondeurs de décharge $DOD(k)$ en fonction de nombre des cycles de la batterie.

Le nombre de cycles Durant un an de charge-décharge est égal à 651 cycles. La majorité des cycles ont des amplitudes faibles et représentent des microcycles.

Détermination de la température pour chaque cycle

Le second paramètre le plus important de vieillissement de la batterie est la température. Il dépend de la température ambiante, donnée à la **Figure 2.28**, et l'élévation DT présentée à la **Figure 2.29**.

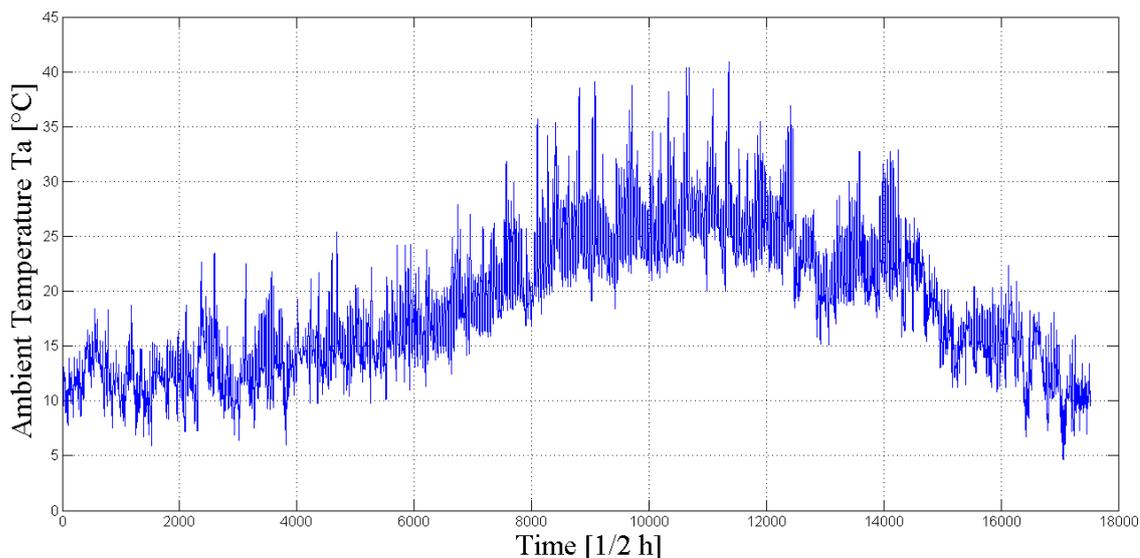


Figure 2.28 : Température ambiante T_a mesurée à partir du site.

À partir du modèle thermique présenté et en utilisant les paramètres définies dans la Table 2.13 [CJB94] [CMa00], la température de fonctionnement de la batterie a été calculée comme montre la Figure 2.30.

Table 2.13 : Resistance interne et paramètres du modèle thermique.

Paramètres	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	α_T	$R_{Th} [^{\circ}C/w]$	$C_{Th} [wh/^{\circ}C]$
Valeur durant la charge	0.041	0.88	0.003	1.2	0.0003	0.02	0.2	15
Valeur durant la décharge	0.022	0.78	0.002	1.25	0.0002	0.007	0.2	15

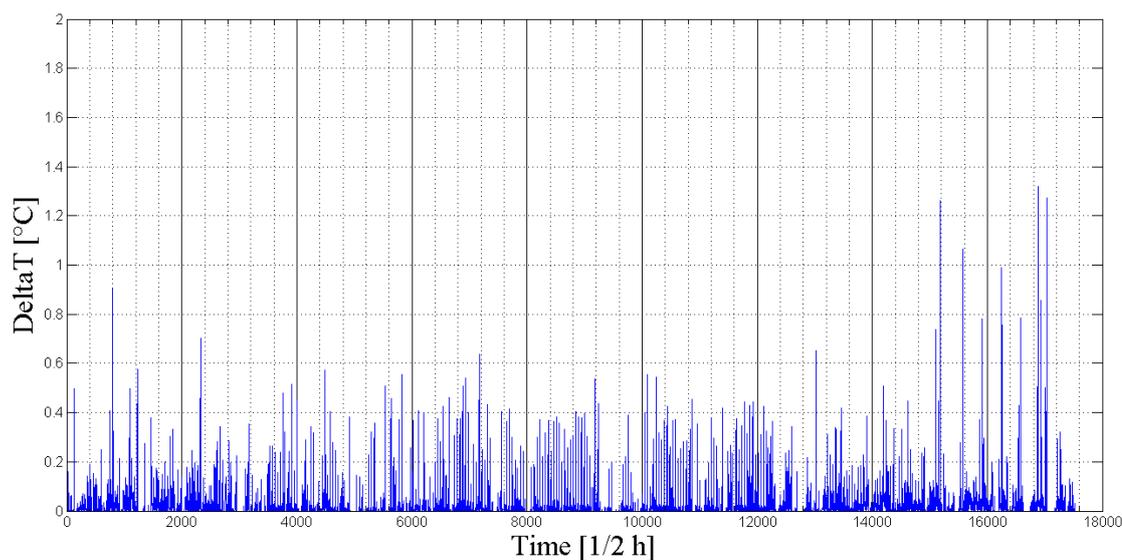


Figure 2.29 : Variations de la température interne ΔT de la batterie.

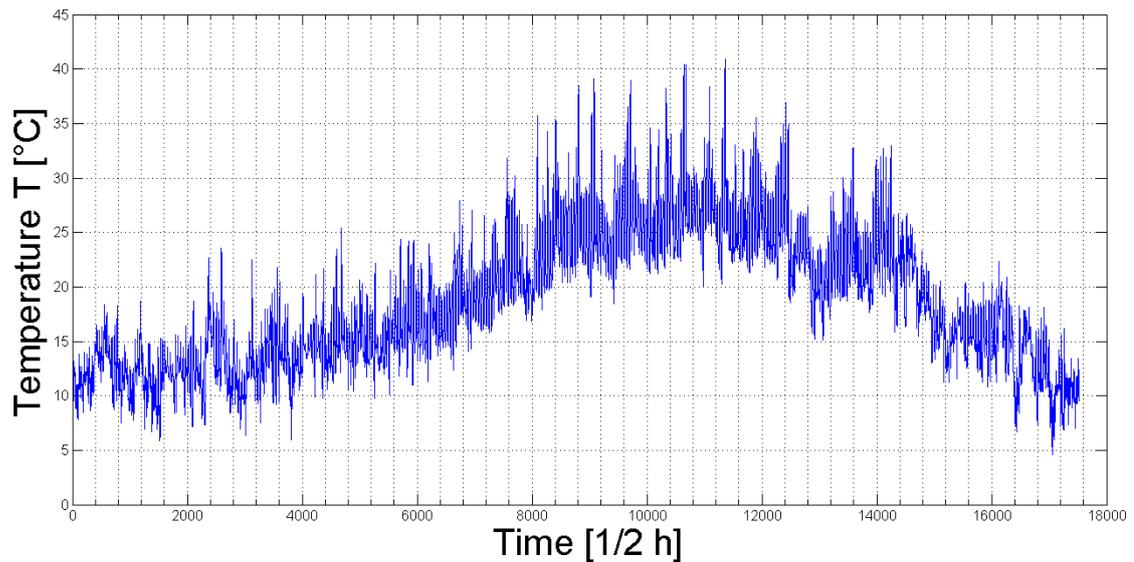


Figure 2.30 : Variations de la température absolue T de la batterie durant un an.

Pour le vieillissement de batterie, il est nécessaire de représenter l'évolution de la température absolue T pour chaque cycle k ($k=1,2,\dots,N_c$). Elle correspond à la température moyenne mesurée sur l'intervalle du cycle. La **Figure 2.31** représente l'évolution de la température absolue en fonction des cycles.

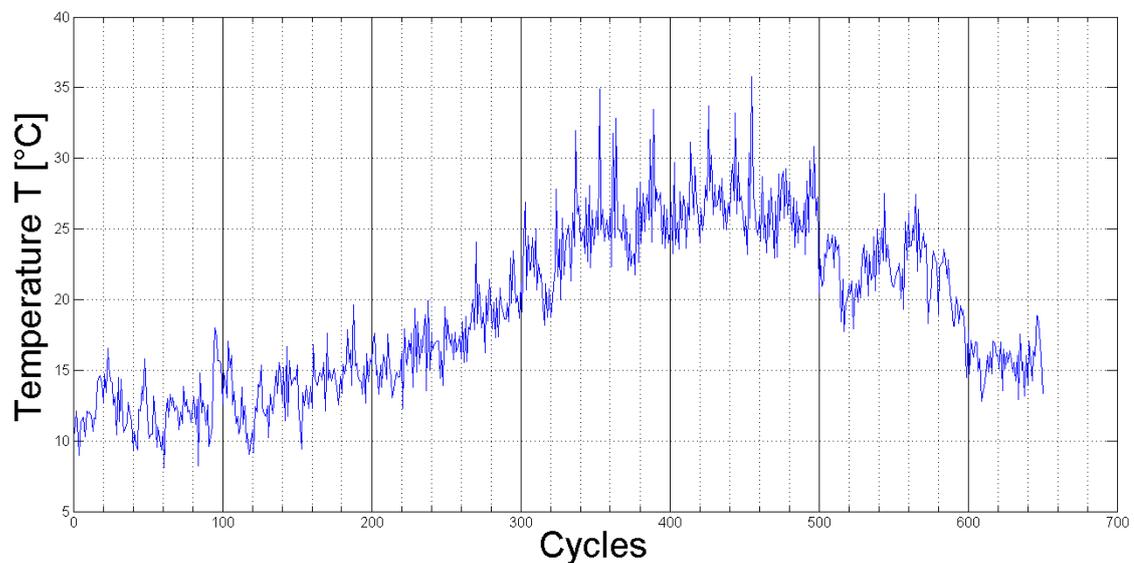


Figure 2.31 : Température moyenne $T(k)$ pour chaque cycle.

2.3.4.5 Discussion des résultats sur l'étude de vieillissement

Afin d'illustrer l'impact sur la durée de vie de banc de stockage (batterie) intégré dans le système multi-sources, la discussion sera basée sur le réglage de la profondeur de décharge maximale DOD_{Max} par le contrôle du générateur diesel par rapport aux seuils de contrôle et sur la capacité de la batterie. La **Table 2.14** montre l'évolution de la durée de vie de la batterie pour des profondeurs de décharge DOD différentes entre 20 et 70%.

On conclure que une petite influence a été détectée puisque la majorité des cycles sont des microcycles à faible ampleur. La durée de vie maximale obtenue correspond à une profondeur DOD_{Max} égale à 30%. Assi, il est apparu que la profondeur de décharge affecte sur le nombre de démarrage du générateur diesel qui va influencer sur sa durée de vie.

Table 2.14 : Taux de vieillissement pour des profondeurs de décharge différentes et $C_{bat} = 250 \text{ Ah}$.

DOD_{Max} (%)	20	30	45	60	70	75
$R_{a(DOD, T)}/\text{year}$ (%)	11.23	11.20	11.47	11.69	12.07	12.39
Durée de vie (year)	8.9	8.93	8.7	8.5	8.3	8.1
Nombre de démarrage du GD	195	79	40	26	21	18
Nombre de cycles	785	691	668	656	651	655

Le taux de vieillissement de batterie pour chaque cycle est illustré par la **Figure 2.32**. Ces taux partiels du vieillissement correspondent à une profondeur de décharge égale à 70% et une capacité nominale $C_{bat}=250 \text{ Ah}$.

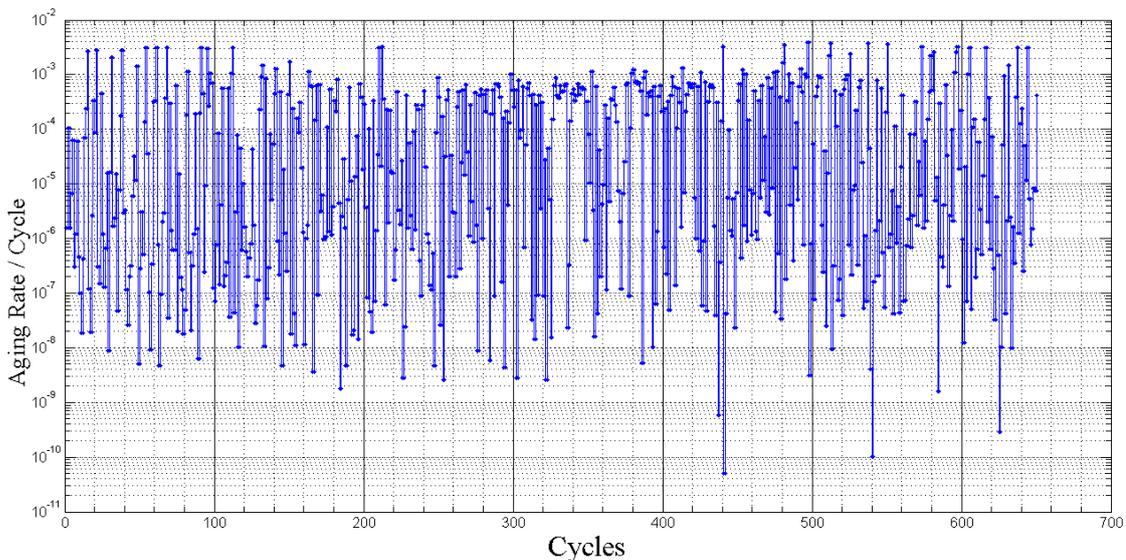


Figure 2.32 : Evolution du taux de vieillissement $R_{a(k)}$ en fonction de cycle k ($DOD_{Max} = 70\%$).

La **Table 2.15**, montre la variation de la durée de vie de batterie avec une capacité nominale varie entre 150 et 250 Ah. Il est noté que le nombre de cycles reste constatant. Cependant, **Figure 2.33** explique une modification significative de la distribution de nombre de cycles en fonction de la profondeur de décharge. En plus, lorsque la capacité est minimisée, la durée de vie de la batterie diminue. La même chose appliquée pour le générateur diesel. Lorsque la capacité

de la batterie est réduit, le nombre de démarrage du générateur augmente et la durée de vie du GD sera diminuée beaucoup.

Table 2. 15 : Taux de vieillissement pour des valeurs de capacités différentes et $DOD_{Max} = 70\%$.

C_{bat} (Ah)	150	180	200	220	250
$R_a(DOD,T)_{/year}$ (%)	15.55	13.97	13.00	12.07	11.23
Durée de vie (year)	6.4	7.2	7.7	8.3	8.9
Nombre de démarrage du GD	39	29	25	21	18
Nombre de cycles	665	663	663	651	654

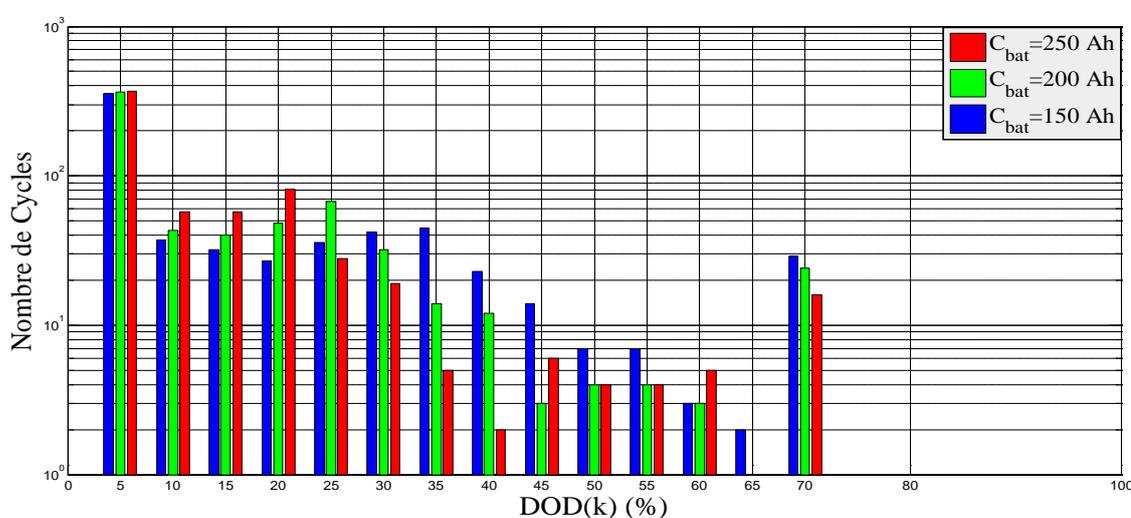


Figure 2. 33 : Histogramme de nombre de cycles en fonction de DOD(k) pour trois valeurs de capacité.

2.3.4.6 Discussion

Dans notre travail de thèse, une méthodologie pour l'évaluation de la durée de vie de batterie plomb-acide a été développée. L'approche proposée représente un outil très performant qui nous permet d'investir l'influence de la batterie sur stratégie de conception et de gestion du système de puissance. Cet outil a été appliqué avec succès sur le système multi-sources comprenant des générateurs renouvelable, du générateur diesel et une batterie plomb-acide. D'après les résultats obtenus plusieurs points sont tirés :

1. La réduction de la profondeur de décharge augmente le nombre de cycle dans la batterie et plus de nombre de démarrage pour le générateur diesel, ce qui diminue la longévité de la batterie et le générateur diesel.
2. Les batteries plomb-acide de technologie tubulaire ont une durée de vie longue. Une moyenne de vie égale à huit ans est détectée

3. Un sur dimensionnement raisonnable peut favoriser longévité de la batterie.

En outre, ce travail est prometteur. Une première perspective est de développer, avec un principe similaire, un modèle de vieillissement adapté au générateur diesel. Une autre est d'inclure les deux modèles de vieillissement (batterie et générateur diesel) dans le simulateur dynamique.

Enfin, afin de maximiser la vie entière du système, le prochain objectif est de considérer la composante de durée de vie comme critère pour le dimensionnement, la gestion et l'optimisation des systèmes d'électrification hybrides.

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre deux types de modélisation ont été abordés, le premier type concerne la présentation des modèles de puissance pour les différentes sources d'énergie du système multi-sources (générateurs renouvelable, générateur diesel et batteries de stockage). Le deuxième type concerne la modélisation des sources d'énergie en termes d'énergie grise (Embodied Energy). Les deux types de modèles sont nécessaires pour le développement du simulateur dynamique et l'optimisation du dimensionnement du SMS. En effet, dans le simulateur dynamique que nous allons développer, les modèles de puissance sont importants pour le dimensionnement du SMS par rapport au profil de charge, et les modèles gris sont utilisés afin d'optimiser le coût de l'installation hybride globale. En plus, une étude de vieillissement des sources d'énergie du SMS a été présentée. Cependant, dans cette étude de vieillissement nous avons traité de manière approfondie le phénomène de dégradation ou de vieillissement des batteries de stockage de type plomb-acide (VRLA) intégré dans le SMS.

Dans le suivant chapitre, moyennant l'utilisation des différents modèles et à l'aide de l'environnement de programmation Matlab/Simulink, nous allons travailler sur la concrétisation du simulateur dynamique qui nous permet d'évaluer le comportement dynamique du système multi-sources (PV/WT/GD + Batterie).

Chapitre 3

SIMULATION DYNAMIQUE DES SYSTEMES MULTI-SOURCES POUR LE DIMENSIONNEMENT

3.1 Introduction

Les systèmes multi-sources autonomes utilisés pour l'électrification dans des sites isolés, sont des systèmes conçus à base de sources renouvelables tels que les générateurs photovoltaïques (*PV*) et les générateurs éoliens (*WT*) avec des systèmes de stockage, ou à base de sources fossiles tels que les générateurs diesels (*GD*) et les turbines à gaz (*TG*). Ou bien la combinaison des deux (renouvelable et fossile). Le dimensionnement d'un système multi-sources est la détermination de la taille de tous les éléments qui le composent dans le respect de la fourniture d'énergie à un profil de consommation bien défini. L'interconnexions des sources et des consommateurs se fait à travers un bus de puissance en tension continue ou en tensions alternatives.

L'hybridation entre les sources renouvelables et les sources fossiles constitue une des solutions les plus adaptées pour améliorer les critères de performances des systèmes multi-sources tout en assurant une autonomie suffisante et une meilleure fiabilité de satisfaction des consommateurs.

En effet, les paramètres d'évaluation des performances d'un système multi-sources restent toujours liés au dimensionnement et aux types de sources d'énergie utilisées. Pour cela, le choix de l'approche de dimensionnement représente un point très important afin de concevoir un système d'électrification hybride rentable.

Lors de notre étude nous nous baserons sur le dimensionnement d'un système multi-sources (*PV/WT/DG + Batterie*) en utilisant la simulation dynamique comme une plateforme d'essai. Donc, il est important d'aborder en premier lieu la problématique de la simulation.

La « **simulation** » est une technique permettant la représentation des systèmes dynamiques du monde réel par imitation de leurs comportements. La mise en œuvre de la simulation exige l'utilisation de la modélisation numérique (ordinateur ou calculateur). Ce qui nous permet de définir la simulation comme une technique numérique pour la résolution des problèmes liés aux systèmes. Ainsi, la simulation et la modélisation des systèmes sont des outils qui sont complètement indissociables. En effet, l'obtention du comportement fonctionnel représentatif d'un système doit être fondée sur le passage par un modèle de représentation propre. L'utilisation de la simulation dans des différents secteurs devient parmi les moyens les plus nécessaires et indispensables pour l'analyse et le développement des systèmes.

Selon la variété et/ou la multiplicité de la nature des problèmes rencontrés traités par la simulation, il est important de présenter d'une manière claire les différents modèles utilisés par la simulation et les méthodes de simulation adaptées à la résolution des problèmes liés aux différents systèmes.

Le dimensionnement des systèmes multi-sources est primordial pour obtenir un système d'électrification hybride bien adapté à un site donné. Il dépend de plusieurs paramètres dont nous citons les variables météorologiques du site (ensoleillement, température ambiante, vitesse du vent, altitude...), le type des générateurs d'énergie utilisés (générateurs renouvelables ou générateurs fossiles) et le profil de charge.

Dans ce chapitre, nous introduisons dans un premier temps les différents types de modèles existants dans la littérature, ainsi que la définition de la simulation des systèmes et les méthodes de simulation. La notion de simulations statique et dynamique en vue du dimensionnement des systèmes hybrides multi-sources sera détaillée. Ensuite, un ensemble d'outils logiciels utilisés pour la simulation et/ou le dimensionnement des SMS sera abordée. Ainsi, le simulateur dynamique proposé pour la simulation et le dimensionnement du SMS (PV/WT/DG + Batterie) étudié sera détaillé. A la fin de ce chapitre, le fonctionnement du simulateur dynamique sera validé par plusieurs essais de simulation en utilisant des données météorologiques réelles de différents sites avec plusieurs paramètres de conception pour les générateurs du SMS.

3.2 Classification des méthodes de simulation

Le choix de la méthode de simulation utilisée pour simuler le comportement fonctionnel d'un système ou d'un phénomène est effectué en fonction de la nature des modèles. En effet, le modèle décrivant l'évolution du système simulé peut prendre une nature de variation ou de présentation bien définie. Donc, les types de simulation les plus couramment connus peuvent être classifiés en trois catégories principales :

- Simulation dynamique ou statique ;
- Simulation à événements discrets ou continue ;
- Simulation déterministe ou stochastique.

Cette classification nous permettra de cibler le type de simulation utilisée pour simuler le comportement fonctionnel du système multi-sources et de concevoir notre propre simulateur.

3.2.1 Simulations statique et dynamique

Le choix du type de simulation dépend du type du modèle ou du phénomène étudié. Pour un système quelconque on peut envisager une évolution d'état statique ou dynamique. A chaque type de modèles il existe des caractéristiques de fonctionnement propres. La Figure 3.1 représente la classification des modèles en général [VPS09]:

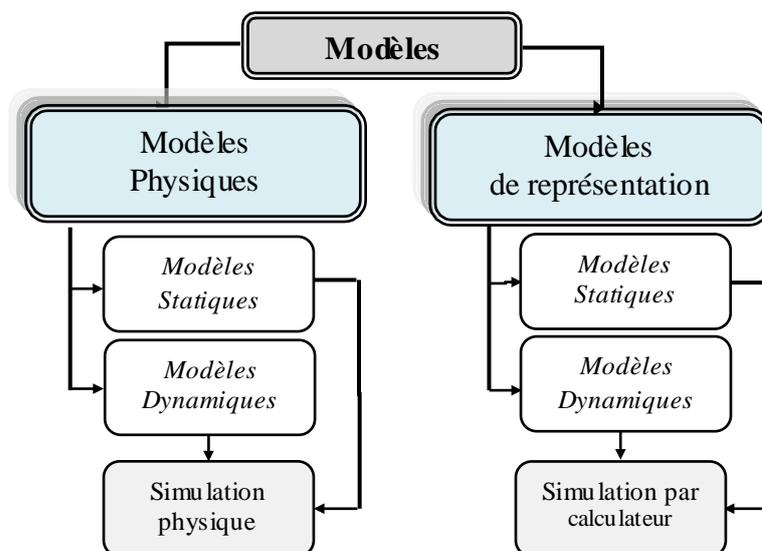


Figure 3. 1 : classification des types de modèles.

Modèles physiques : Les modèles physiques sont généralement développés à base des prototypes ou des maquettes. Ces prototypes permettent l'émulation ou la simulation des comportements fonctionnels des systèmes réels. Le développement d'un modèle physique nécessite un noyau matériel et logiciel bien adapté au système réel. Ce type de modèle est parmi les modèles les plus réalistes ou représentatifs aux évolutions des systèmes réels (naturels ou artificiels). Cependant, le développement des modèles physiques est plus cher.

Modèles de représentation : Les modèles de représentation simulant le comportement des systèmes peuvent être divisés en trois types: *modèle de « connaissance »*, *modèle « boîte noire »* et *modèles « boîte grise »*. Un modèle de représentation est obtenu généralement en utilisant l'outil de modélisation et en appliquant des lois mathématiques sur un système. Ce type de modèles peut être présenté par des équations différentielles, par des équations aux différences, sous forme des modèles d'état. Les équations mathématiques obtenus sont utilisées pour définir les relations existantes entre les entrées et les sorties du système. *Un modèle de connaissance généré par un ordinateur en utilisant les entrées et les sorties du système.*

Modèles statique et dynamique : On définit un modèle statique comme un modèle qui ne varie pas en fonction du temps [VPS09]. Donc le modèle statique a la capacité de copier le comportement d'un système par rapport à un point bien défini dans le temps. Pour un modèle statique l'unité de temps n'a d'une importance ou de signification. Dans le cas contraire si le modèle varie en fonction du paramètre temps le modèle s'appelle un modèle dynamique.

Simulation par ordinateur ou simulation informatique : La simulation par ordinateur permet d'implémenter les modèles mathématiques des systèmes en utilisant les outils de numérisation logiciels et matériels. Le principe de numérisation des systèmes est basé sur la résolution des problèmes en utilisant des méthodes d'intégration numériques (méthode de Runge-Kutta, Euler,...) bien adaptées. Les problèmes résolus numériquement, peuvent être initialement des modèles purement mathématiques ou des modèles obtenus à partir d'une base d'expériences ou de mesure. La simulation suit le modèle qui est statique quand le modèle est statique et elle est dynamique si le modèle est dynamique.

3.2.1.1 Notion de simulation statique

Une simulation statique signifie la simulation d'un système à point précis ou une simulation dans laquelle l'aspect du temps n'a pas une importance. Parmi les simulations statiques connues nous citons la simulation de Monte Carlo et la simulation en régime permanent (*Monte Carlo & steady-state simulations*) [JKu15].

3.2.1.2 Notion de simulation dynamique

Dans les modèles dynamiques l'aspect du temps joue un rôle très important pour traduire l'évolution du système. Ainsi, la simulation dynamique est utilisée pour décrire le comportement dynamique d'un système au fil du temps [JKu15]. La simulation dynamique représente un outil d'aide pour la conception et le dimensionnement des systèmes. La plupart des secteurs utilisent la simulation dynamique comme un moyen d'expériences avant la concrétisation de leurs projets. Dans le domaine d'automobiles par exemple, la simulation dynamique est la phase primordiale pour toute opération d'évaluation ou de conception. A base de cet outil de simulation, le spécialiste peut être capable d'estimer les performances de fonctionnement du processus de façon proche de la réalité. En effet, les points forts de la simulation dynamique est qu'elle permet d'introduire l'aspect de temps pour établir les relations existantes entre plusieurs sous-systèmes ou plusieurs variables du processus.

Dans l'étude de conception des systèmes multi-sources (*PV/WT/DG + Batterie*) utilisés pour l'alimentation des sites non connectés au réseau, le dimensionnement nécessite la connaissance des données météorologiques des sites.

Donc, l'observation de la variation temporelle des variables météorologiques qui représentent des sources d'entrée pour un générateur renouvelable doit être fondée sur une approche de dimensionnement dynamique. Dans la sous-section suivante nous allons présenter quelques outils de simulation dynamique utilisés pour le dimensionnement des systèmes multi-sources autonomes. Le SMS étudié est de nature hybride ce qui nous impose l'utilisation de la simulation hybride : cette forme de simulation prend en considération l'aspect continu et discret du modèle.

3.2.2 Simulation hybride (continue et discrète)

Dans le cas général, le choix de la méthode de simulation s’effectue en fonction de la nature du modèle. Le modèle d’un système hybride est une hybridation entre un modèle continu et un modèle discret. Ainsi, la simulation hybride c’est une simulation qui est basée sur les caractéristiques des systèmes continus et à événements discrets simultanément.

3.2.3 Simulations déterministe et stochastique

La simulation stochastique est une simulation fondée sur des modèles à base des variables stochastiques ou des variables qui peuvent varier avec une certaine variabilité. Le mot stochastique signifie que certains facteurs (valeurs) sont variables ou aléatoires [SBo15]. Ainsi, les outils utilisés pour obtenir les modèles stochastiques sont basés sur des lois de variation stochastiques ou aléatoires. Pour un modèle stochastique, les effets d’entrées sont aléatoires et les réponses de sorties sont aussi aléatoires.

Dans la simulation déterministe les modèles sont construits de la même manière que les modèles stochastiques, sauf qu’ils ne contiennent pas de caractère aléatoire. En plus, dans la simulation déterministe, tous les états futurs sont déterminés une fois que les données d’entrée et l’état initial ont été définis. La **Figure 3.2** montre les types de modèles déterministes et probabilistes.

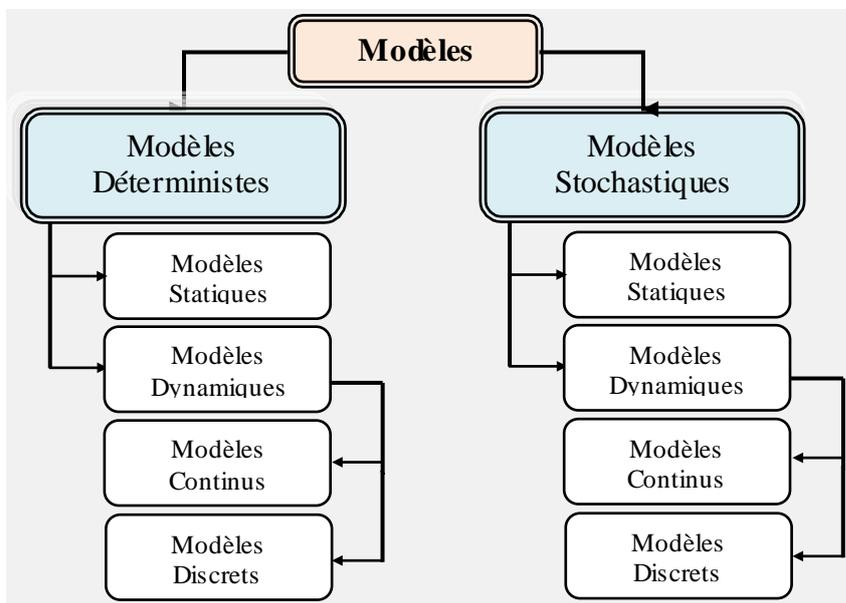


Figure 3.2 : Modèles déterministes et probabilistes.

Cette dernière figure montre que les modèles déterministes et probabilistes peuvent être des modèles statiques ou dynamiques. Dans le cadre de ce travail le SMS étudié utilise des entrées

aléatoires qui se restructurent dans le temps ce qui nous impose l'utilisation d'une simulation dynamique déterministe.

3.3 Choix de simulation en vue du dimensionnement et optimisation du SMS (PV/WT/DG+Batterie)

Suivant la problématique définie dans le premier chapitre, l'objectif principal de la thèse s'articule autour de l'étude de dimensionnement et d'optimisation des systèmes multi-sources utilisés dans les sites isolés. La détermination des dimensions pour les différentes sources d'énergie, constituant le système d'électrification, nécessite une simulation complète pour le SMS. Par cette simulation, nous pouvons chercher des solutions de dimensionnement qui respectent les contraintes proposées par le concepteur et les contraintes liées aux données météorologiques des sites.

Pour un système d'électrification à base de sources d'énergie renouvelables, l'aspect de temps est très important afin d'estimer la quantité d'énergie délivrée pour le système au long de la période de temps. Dans le cas d'un générateur solaire, la puissance instantanée du générateur varie en fonction des grandeurs météorologiques, ces dernières varient en fonction du temps. A chaque instant la connaissance des données météorologiques du site est nécessaire.

Avant d'appliquer la simulation dynamique sur le SMS, il est important de comprendre les types de modèles utilisés pour présenter le modèle global du SMS. Alors, on distingue plusieurs types de modèles : Pour un générateur solaire et un générateur éolien les modèles caractéristiques sont des modèles continus avec une variation aléatoire. Pour le générateur diesel le modèle utilisé est caractérisé par un modèle à événement discret. Pour le banc de stockage le modèle utilisé est un modèle continu déterministe.

3.4 Présentation de quelques outils de simulation des systèmes multi-sources

Parmi les outils les plus utilisés pour la simulation dynamique des systèmes énergétiques nous spécifions TRNSYS (TraNsient System Simulation), HYDROGEM (HYDROGen Energy ModelS), T*SOL, POLYSUN, HOMER, HYBRID2, iHOGA, PVsyst, Ipsys, energiePRO, PV DesignPro et HYBRIDES.

Par la suite nous allons présenter quelques outils de simulation et de dimensionnement des systèmes multi-sources.

3.4.1 L'outil de simulation HOMER

Le **HOMER** (Hybrid Optimisation Model for Electric Renewables) est un logiciel développé par le laboratoire national des énergies renouvelables (National Renewable Energy

Laboratory, NREL) depuis 1993. Le HOMER représente un outil d'aide pour la conception des microcentrales de puissance et facilite la comparaison des technologies de production d'énergie à travers une large gamme d'applications. Le HOMER a la possibilité de modéliser le comportement physique du système d'électrification et son coût sur son cycle de vie, qui représente le coût total de l'installation et de fonctionnement du système au cours de sa durée de vie [TLa06]. Les systèmes d'électrification (ou les micro-réseaux) dimensionnés et optimisés par le HOMER représentent des systèmes hybrides comportant des sources renouvelables et des sources conventionnelles (ou fossiles) avec des systèmes de stockage. L'outil HOMER permet de dimensionner et analyser le fonctionnement des systèmes hybrides autonomes et les systèmes hybrides connectés au réseau [BGu13] [TLa06]. Les sources d'énergie qui peuvent être combinés et modéliser par cet outil de dimensionnement nous citons : les modules solaires, les turbines éoliennes, des générateurs diesel, des batteries de stockage, des électrolyseurs, des réformateurs, des réservoirs d'hydrogène, des convertisseurs de puissance [CSe11].

3.4.2 L'outil de simulation iHOGA (Improved Hybrid Optimization by Genetic Algorithms)

Cet outil représente la version améliorée de la version HOGA qui a été développée par l'université de Zaragoza pour la simulation et l'optimisation des systèmes hybrides de puissance. Les systèmes hybrides optimisés sont capables de produire de l'électricité et de l'hydrogène. L'optimisation des systèmes hybrides est basée sur l'utilisation des algorithmes génétiques.

3.4.3 L'outil de simulation Hybrid2

Ce logiciel de conception a été développé par le laboratoire national des énergies renouvelables (NERL) et l'université de Massachusetts aux états unis. L'outil Hybrid2 permet de concevoir et d'analyser les micro-réseaux hybrides qui comportent des sources d'énergie différentes (PV, WT, DG, Batterie) avec des charges continues (DC), alternative (AC) et thermiques. En plus, un large éventail d'options stratégiques de gestion de l'énergie ainsi que une fonction d'analyse économique [LAr11].

3.4.4 L'outil de simulation PV DesignPro

Ce logiciel a été développé par Maui Solar Energy Software Corporation à Hawaï, Etats-Unis, ce programme de simulation temps-étape est conçu pour simuler les systèmes PV connectés et non connectés au réseau. En plus des calculs de bilan énergétique pour le dimensionnement, le programme intègre également une analyse économique, un outil d'optimisation, et un ensemble de sous-programmes qui peut être utilisé pour créer des courbes

de charge et de convertir des données climatiques de l'outil de simulation Meteonorm vers des données compatibles avec le format PV-DesignPro. Le modèle hybride simulé par PV DesignPro accepte les convertisseurs DC/DC et DC/AC [LAr11].

3.4.5 L'outil de simulation TRNSYS

TRNSYS est un environnement logiciel flexible basé sur une interface graphique pour la simulation. Cet outil logiciel a été développé initialement pour la modélisation des flux d'énergie thermique dans de multiples systèmes de zone puis pour simuler le comportement des systèmes transitoires. En plus, la grande majorité des simulations sont axées sur l'évaluation de la performance des systèmes d'énergie thermique et électrique, TRNSYS peut tout aussi bien être utilisé pour modéliser d'autres systèmes dynamiques tels que le débit de la circulation ou des processus biologiques. La bibliothèque de ce simulateur comporte des centaines des systèmes transitoires tels que les panneaux solaires, les régulateurs de charge et les générateurs de conditions météorologiques [LAr11].

3.4.6 L'outil de simulation PVsyst

L'outil PVsyst a été développé par l'Université de Genève-Suisse pour un but de simulation et de dimensionnement des systèmes. Les types de systèmes traités par cet outil sont des systèmes d'électrification connectés et non connectés au réseau qui comportent des panneaux photovoltaïques et des batteries de stockage. Il fournit des propositions sur les configurations de dimensionnement pour les installations autonomes (générateur PV et batterie), et informe l'utilisateur sur la faisabilité technique des composants choisis. Les propositions sur les configurations de dimensionnement sont faites sur la base des entrées de charge, l'indication du nombre de jours pour un fonctionnement autonome et une estimation de la probabilité de perte de la charge (LPSP), c.-à-d., à savoir la durée pendant laquelle la charge ne peut pas être servi par l'énergie délivrée par le générateur PV et la batterie de stockage [LAr11].

3.4.7 L'outil de simulation energyPRO

L'outil energyPRO est développé et maintenu par la société EMD International A / S au Danemark. c'est outil logiciel complet est utilisé pour la modélisation et l'analyse combinée entre le techno-économique et l'optimisation de ces deux projets de cogénération et trigénération, ainsi que d'autres types de projets énergétiques complexes avec une offre combinée d'électricité et d'énergie thermique (vapeur, eau chaude ou de refroidissement) à partir de différentes unités de production d'énergie (l'énergie éolienne et l'énergie solaires) [UGu14]. Ce logiciel peut

modéliser tous les types de production d'énergie thermique sauf le nucléaire, toute la production renouvelable, et toutes les unités de stockage d'énergie pour compléter l'analyse [RDT14].

3.4.8 *L'outil de simulation Ipsys*

Représente une plateforme de simulation puissante et flexible, développée par le laboratoire national de l'énergie durable du Danemark (Danish National Laboratory for Sustainable Energy), pour les systèmes d'énergie intégrés avec de multiples formes d'énergie et les structures de contrôle complexes. L'outil Ipsys capable de simuler et d'analyser des systèmes hybrides qui comportant des générateurs renouvelables (PV/WT) et non renouvelables (générateur diesel) avec des batteries de stockage [SSc11].

3.5 *Comparaison entre les outils de simulation présentés*

A partir de l'ensemble d'outils présentés précédemment on peut tirer leurs points de différence. Ces points de différence sont nécessaires pour évaluer les performances caractérisant chacun. Ainsi, il est important de citer les spécifications propres de ces outils de simulation et/ou de dimensionnement et leurs spécifications communes. Les outils définis dans cette étude sont utilisés pour la simulation et/ou pour le dimensionnement des SMS d'électrification.

La **Table 3.1** illustre quelques différences entre les outils de simulation présentés précédemment [CSe11], [BGu13], [TLa06].

Table 3. 1 : Quelques points forts et faibles pour différents outils de conception.

Outil de simulation	Caractéristiques	
HOMER	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Simulation des systèmes hybrides (PV,WT, DG, Batterie, électrolyseurs, réservoirs d'hydrogène, transformateurs et convertisseurs) ▪ Simulation des systèmes autonomes et connectés au réseau ▪ Analyser le cycle de vie des systèmes 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Un pas de simulation égal à 1h ▪ Longueur des données de simulation 1 an (fixe)
iHOGA	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Simulation des systèmes hybrides (PV,WT, DG, Batterie, électrolyseurs, réservoirs d'hydrogène,) ▪ Permet d'optimiser le dimensionnement et de fonctionnement 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Un pas de simulation égal 1h ▪ Longueur des données de simulation 1 an (fixe).
Hybrid2	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Simulation des systèmes hybrides (PV,WT, DG, Batterie) ▪ Alimentation de charge AC et DC ▪ Evaluation de la fonction économique du système ▪ Un pas de simulation varie entre 1s à 1h ▪ Permet l'optimisation du point de fonctionnement des générateurs diesel. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Longueur des données de simulation varie de quelques minutes à 1 an ▪ Ne permet pas l'optimisation et la gestion d'énergie
PV DesignPro	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Simulation des systèmes photovoltaïques connectés ou non connectés au réseau ▪ Aucun algorithme 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Un pas de simulation 1h ▪ Longueur des données de simulation 1 an (fixe)
PVsys	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Simulation le fonctionnement des systèmes photovoltaïques en sites isolés. ▪ Permet l'optimisation mono-objectif 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Un pas de simulation 1h ▪ Longueur des données de simulation 1 an (fixe)
energyPRO	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Simulation des systèmes hybrides (PV,WT, DG et systèmes de stockage) ▪ Simulation des systèmes thermiques, électriques. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Un pas de simulation varie entre 1h à 1j ▪ Longueur des données de simulation 1 an (fixe)
Ipsys	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Simulation des systèmes hybrides (PV,WT, DG et Batterie) ▪ Un pas de simulation varie entre 1s à 1h 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aucun algorithme d'optimisation intégré ▪ Aucun algorithme de gestion intégré
TRNSYS	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Simulation des systèmes thermiques, électriques ▪ Un pas de simulation varie entre 1ms à 1 jour ▪ Longueur des données de simulation illimitée 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aucun algorithme d'optimisation intégré ▪ Aucun algorithme de gestion intégré

Chaque outil est caractérisé par des spécifications propres. La **Figure 3.3** montre les spécifications essentielles des outils de dimensionnement.

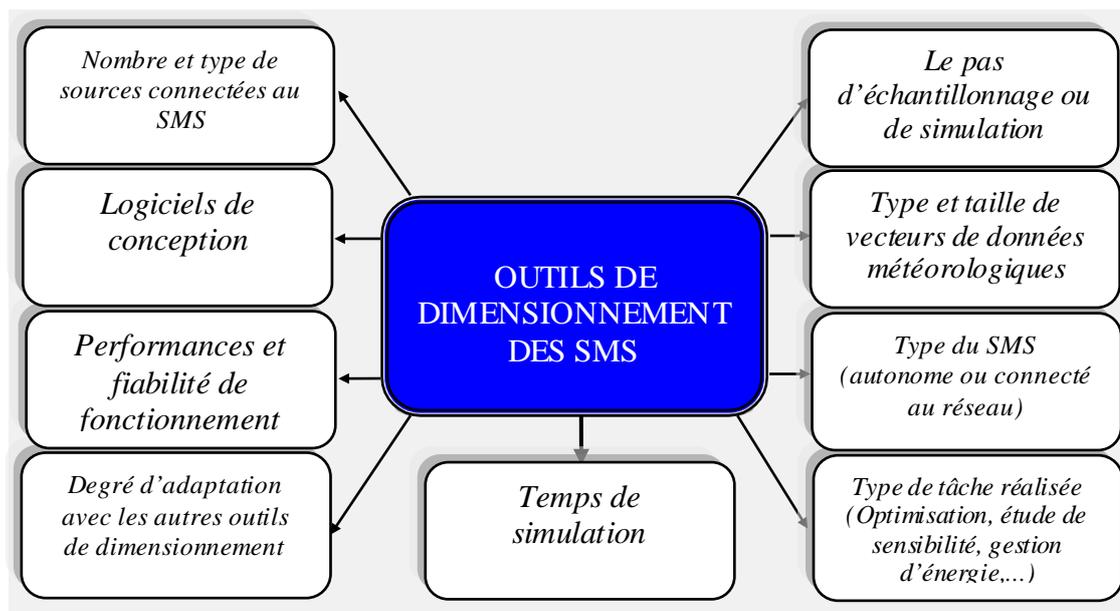


Figure 3.3 : Spécifications essentielles d'un outil de dimensionnement

Dans cette dernière figure, nous avons résumé les spécifications qui peuvent être associées aux moyens de simulation et/ou de dimensionnement. Afin de présenter d'une manière brève et claire les spécifications essentielles de ces logiciels de simulation nous allons limiter sur les spécifications dans les points suivants :

Fiabilité et performance des outils : la plupart des logiciels de simulation et/ou de dimensionnement sont développés sous forme d'interfaces graphiques (GUI) en utilisant des environnements de programmation différents tels que le C++, Java, C Builder, Fortran,..etc. L'objectif de l'interface graphique est de simplifier à l'utilisateur la maîtrise de l'outil logiciel, de faciliter la manipulation des données d'entrées (données climatiques, paramètres de dimensionnement et de simulation) du simulateur. Il permet également de lire en temps réel l'évolution des signaux de simulation et de mettre en œuvre une évaluation graphique des résultats de simulation et de dimensionnement obtenus.

Pas et durée de simulation : Dans les simulateurs des systèmes d'électrification, ces points jouent un rôle très important. En effet, la simulation d'un système par un pas de simulation petit (de l'ordre de seconde) augmente la précision des résultats de simulation et de dimensionnement. La durée de simulation représente le temps nécessaire pour l'exécution d'une série de données. Le simulateur est performant par rapport à l'unité de temps, lorsque la durée de simulation est courte par rapport à la taille des vecteurs de données et le pas de simulation minimal choisi.

Type du SMS conçu : les systèmes multi-sources d'électrification peuvent être utilisés dans des sites isolés (autonomes ou non connectés au réseau) ou dans des sites connectés au réseau. Dans tous les cas, le SMS est constitué de sources d'énergie différentes. Les sources d'énergie

proposées pour une configuration hybride dépendent de la nature de l'énergie disponible sur le site d'un côté, du coût et des contraintes de conception d'un autre côté. Alors, l'efficacité de l'outil de simulation et/ou de dimensionnement reste en relation directe avec le type du SMS, le type de profil de charge (DC ou AC ou hybride) et les objectifs souhaités.

Tâches réalisées par un outil d'analyse : Dans le cas général, tous les outils présentés auparavant sont utilisés pour réaliser des tâches bien définies. On appelle un outil de simulation pour un système d'électrification, tout outil capable de simuler le comportement fonctionnel du système. Dans ce cas, la configuration simulée est proposée par le concepteur. Ainsi, le choix de l'outil de simulation doit être bien adapté au nombre et types de sources d'énergie utilisées (renouvelable ou conventionnelles), type de site à alimenter (connecté ou non) et type de profil de charge (continu, alternatif ou hybride).

On appelle un outil de dimensionnement tout outil qui possède la capacité de simuler le fonctionnement du système d'électrification et de dimensionner les générateurs des SMS. Dans ce cas, le logiciel de dimensionnement permet de concevoir un système d'électrification à partir des données météorologiques du site et d'autres contraintes. Ces contraintes peuvent être définies par le profil de consommation, la méthodologie de gestion du système, le coût économique et écologique de l'installation et la durée de vie du système d'électrification. Pour optimiser les critères de dimensionnement il est nécessaire d'utiliser des outils de dimensionnement comportant des algorithmes d'optimisation (par exemple **iHOGA**). Par ce type d'outil le choix de la nature des générateurs et leurs nombre seront faits par l'outil logiciel.

Stratégie de gestion d'énergie : pour un système énergétique multi-sources, la gestion d'énergie entre les différentes sources représente un point très important. En effet, l'optimisation de la gestion d'énergie permet l'amélioration des performances dans le système à dimensionner. Parmi ces performances, nous citons l'optimisation de dimensionnement de l'installation, la minimisation des pertes dans le système, la satisfaction des besoins en énergie de façon permanente, la réduction dans le taux de vieillissement ou de dégradation des sources d'énergie non renouvelables (générateur diesel).

3.6 Présentation du simulateur dynamique développé

Le simulateur dynamique présenté à la **Figure 3.4** a été développé dans l'environnement de programmation Matlab/Simulink. Le fonctionnement dynamique du simulateur est lié par la dynamique des variables d'entrées.

Avec $P_{pv}(t)$: Puissance délivrée par le générateur solaire ;

$P_{wt}(t)$: Puissance délivrée par le générateur éolien ;

$P_b(t)$: Puissance délivrée par le banc de batterie ;

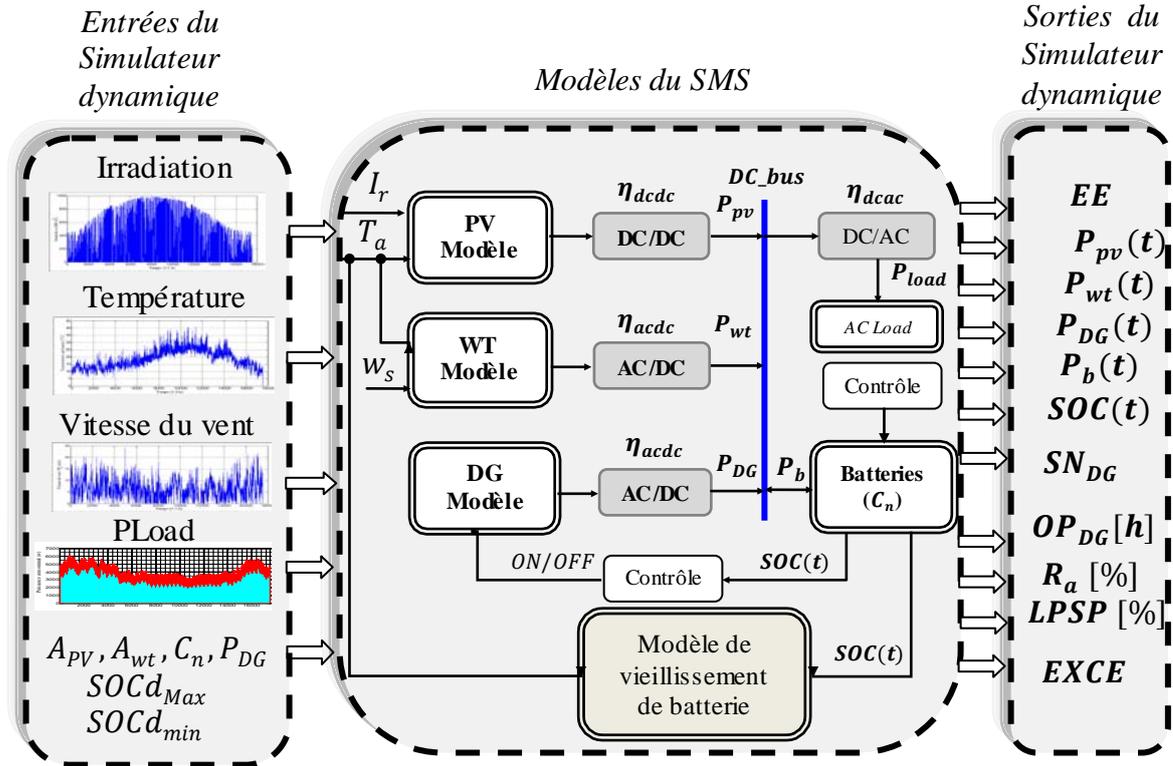


Figure 3. 4 : Schéma bloc du simulateur dynamique.

$P_{DG}(t)$: Puissance délivrée par le générateur diesel ;

$SOC(t)$: L'état de charge du banc de batterie;

SN_{DG} : Nombre de démarrage du GD;

OP_{DG} : Temps de fonctionnement du GD ;

R_a : Taux de vieillissement du banc de batterie ;

$LPSP$: (Loss Power Supply Probability) Probabilité de perte de l'alimentation électrique ou paramètre de satisfaction.

Le simulateur dynamique présenté à la **Figure 3.4**, est décomposé en trois sous blocs: l'entrée du simulateur dynamique, le SMS et la sortie du simulateur.

A) Sous bloc d'entrée du simulateur dynamique

Ce premier sous bloc est utilisé pour introduire au simulateur dynamique la base de données indispensables pour le fonctionnement (ensoleillement ou irradiation $I_r [w/m^2]$, Température ambiante T_a et vitesse du vent w_s), les paramètres de conception

(A_{pv}, A_{wt}, C_n et P_{DG}) et les paramètres de contrôle (SOC_{dMax} et SOC_{dmin}). Les données météorologiques sont organisées sous forme matricielle de taille $[N \times M]$.

Avec N est le nombre d'observation ou de mesure utilisée pour la simulation, et M le nombre de vecteurs ou de variables climatiques utilisés par les générateurs renouvelables.

Donc, un vecteur de données est un ensemble de mesures effectuées à chaque instant avec un pas de mesure fixe. Pour chaque pas de mesure le simulateur génère un vecteur de variable de sortie.

B) Système multi-sources (PV/WT/DG + Batterie)

Le système multi-sources à dimensionner est implanté dans le simulateur en utilisant des modèles physiques qui modélisent les sources d'énergie. Ainsi, le modèle dynamique complet comporte quatre modèles dynamiques, un premier modèle dynamique pour les générateur solaire (PV), un deuxième modèle pour le générateur éolien (WT), un troisième modèle pour le générateur diesel (GD) et un modèle pour le système de stockage. Dans ce bloc, un modèle de vieillissement du banc de batteries a été intégré dans le simulateur afin d'estimer le taux de vieillissement du banc de stockage pendant la période de fonctionnement. Pour minimiser la complexité du SMS, les rendements des convertisseurs de puissance utilisés sont considérés constants.

La **Figure 3.5** montre le schéma synoptique du système multi-sources (PV/WT/DG + batterie). La configuration de câblage choisie pour le SMS possède un seul bus continu.

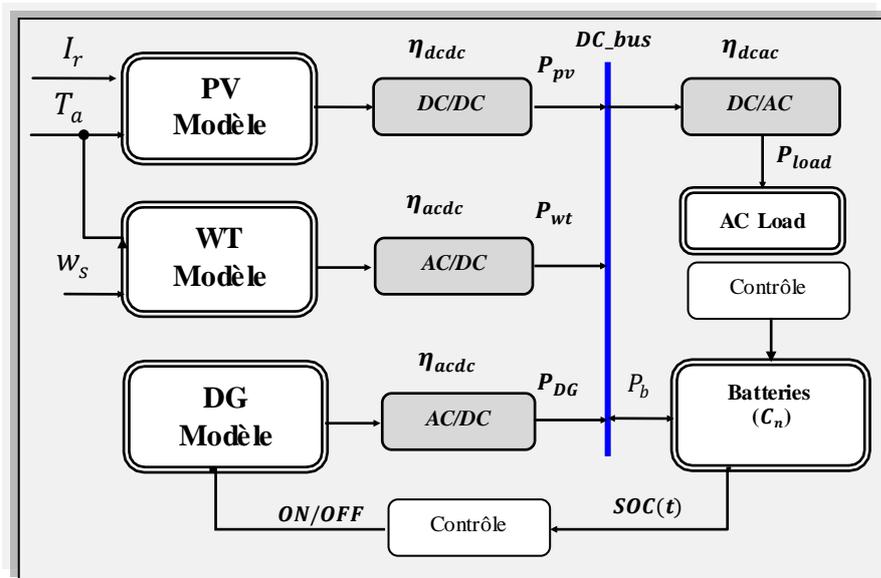


Figure 3.5 : Schéma bloc du système multi-sources (PV/DG/WT + batterie)

Le générateur solaire est développé à base d'un modèle physique en fonction des paramètres caractérisant le générateur et des grandeurs climatique. Dans notre cas, la puissance générée par ce générateur varie en fonction de la surface du générateur nommée A_{pv} , l'ensoleillement ou l'Irradiation (I_r) et la température ambiante (T_a).

Et également la puissance générée par le générateur éolien dépend strictement de la surface balayée par le rotor de la turbine éolienne notée (A_{wt}), le vecteur défini par la vitesse du vent (w_s) et le vecteur de la température ambiante (T_a).

Pour le générateur diesel, la puissance P_{DG} délivrée est directement liée à la quantité du carburant ou du fuel $Fuel_{DG}$ consommée par le générateur pendant une unité de temps.

Pour le système de stockage utilisé dans le système multi-sources, il s'agit d'un banc de batteries de type plomb-acide. Le nombre de batteries constituant le banc de stockage et la manière de connexion série ou parallèle représente un point très important par rapport à la configuration choisie pour le système hybride. Ainsi, le choix de la configuration d'un banc de stockage dépend fortement de la tension du bus DC connectant les autres générateurs de puissance et la charge.

Entre les générateurs de puissance et le bus DC du système multi-sources, des modules d'adaptation (DC/DC) et de conversion (DC/AC et AC/DC) sont utilisés. Dans notre étude, ces modules seront modélisés par des facteurs de rendement. Pour la première étude, on considère que les modules ont des rendements constants pendant toute la durée de la simulation dynamique, et lors d'une deuxième étude, les différents facteurs seront modélisés par des modèles de fonctionnement réels. Le détail de ces derniers modèles, sera présenté dans la partie de la simulation dynamique du système hybride.

Le profil de charge utilisé dans le système multi-sources représente un ensemble d'habitats résidentiels dans un site isolé.

C) sous bloc de sortie du simulateur dynamique

Le sous bloc de sortie du simulateur dynamique est le bloc d'observation et d'évaluation des grandeurs générées par le système dynamique global. Ainsi, ce bloc permettant de connaître l'évolution en fonction du temps des variables utilisées dans la phase de dimensionnement et d'optimisation du système multi-sources. Dans ce simulateur dynamique développé, nous avons défini cinq variables de sortie, ces variables sont données comme suit :

- La fonction coût en énergie grise (Embodied Energy) : dans notre étude, l'objectif désiré est l'optimisation du dimensionnement du système multi-sources autonome. Pour cela nous allons

nous baser sur l'utilisation de la fonction de coût $EE [MJ]$ mesurée en Mégajoule comme une première fonction objectif pour réaliser le dimensionnement.

- La variable $SN_{DG} = ND_{DG}$: cette variable représente le nombre de démarrage ou de Marche/Arrêt du générateur diesel. Cette grandeur est indispensable pour l'étude du vieillissement du générateur diesel, et pour l'évaluation des performances du système hybride par rapport à la configuration optimale obtenue.
- La variable $OP_{DG} = TF_{DG}$ permet d'estimer le temps de fonctionnement en heure du générateur diesel.
- La variable $R_a = T_v$ est utilisée pour évaluer le taux du vieillissement du banc de batteries. Le modèle du vieillissement des batteries est intégré dans le simulateur dynamique.
- la variable LPSP (Loss of Power Supply Probability) représente la probabilité des pertes d'alimentation de puissance dans le système ou le paramètre d'insatisfaction.

Les différentes variables présentées précédemment seront utilisées pour effectuer l'étude de dimensionnement d'une part et pour réaliser la tâche d'optimisation du système hybride d'autre part.

3.6.1 Principe de Fonctionnement du simulateur dynamique

Après la détermination de la configuration du système multi-sources et les différentes relations entre les sources d'énergie, il est important d'expliquer le fonctionnement du simulateur dynamique. Le simulateur dynamique qui gère le fonctionnement du système multi-sources autonome (PV/WT/DG + Bat) a été développé dans l'environnement de programmation Matlab/Simulink.

La méthode de développement du simulateur dynamique, par rapport à l'environnement de programmation, est fondée sur l'hybridation entre les blocs Simulink et la programmation structurée. Cette méthode de programmation hybride augmente la fiabilité de fonctionnement du système et facilite l'implémentation des modèles complexes dans le simulateur.

Les modèles de puissance des générateurs d'énergies (générateur photovoltaïque, générateur éolien, générateur diesel et banc de stockage) sont développés à base de Simulink. Par contre, le modèle de vieillissement des batteries est implémenté à base de la programmation structurée. Avant d'aborder l'aspect fonctionnement du simulateur dynamique, nous présenterons premièrement le principe de la gestion d'énergie dans le système hybride.

La configuration du système hybride que nous avons choisie est capable d'alimenter le profil de charge en utilisant tous les générateurs d'énergie. Cependant, la puissance délivrée par

chaque générateur est identifiée par la tâche de dimensionnement. En effet, à partir de l'étape de dimensionnement on peut connaître la taille de chaque générateur de puissance, et les instants dans lesquels le générateur doit fournir la puissance demandée.

Le système d'électrification multi-sources (PV/WT/DG + batterie) est dimensionné de façon à satisfaire les besoins de la charge avec un coût de conception optimal.

Dans ce simulateur dynamique, nous nous sommes basés sur l'hybridation entre des sources d'énergie renouvelables (générateur solaire et générateur éolien), et des sources d'énergie fossile (générateur diesel). Cette hybridation nous permettra d'atteindre les objectifs souhaités.

La puissance délivrée par les sources d'énergie sera conditionnée par plusieurs paramètres. Par rapport aux générateurs renouvelables, la puissance dépend des grandeurs météorologiques, la surface du panneau A_{pv} et la surface balayée par le rotor de la turbine éolienne A_{wt} . Par rapport au générateur diesel la puissance dépend de sa capacité et du fuel consommé par heure.

Le principe de fonctionnement du simulateur dynamique est donné par l'organigramme suivant:

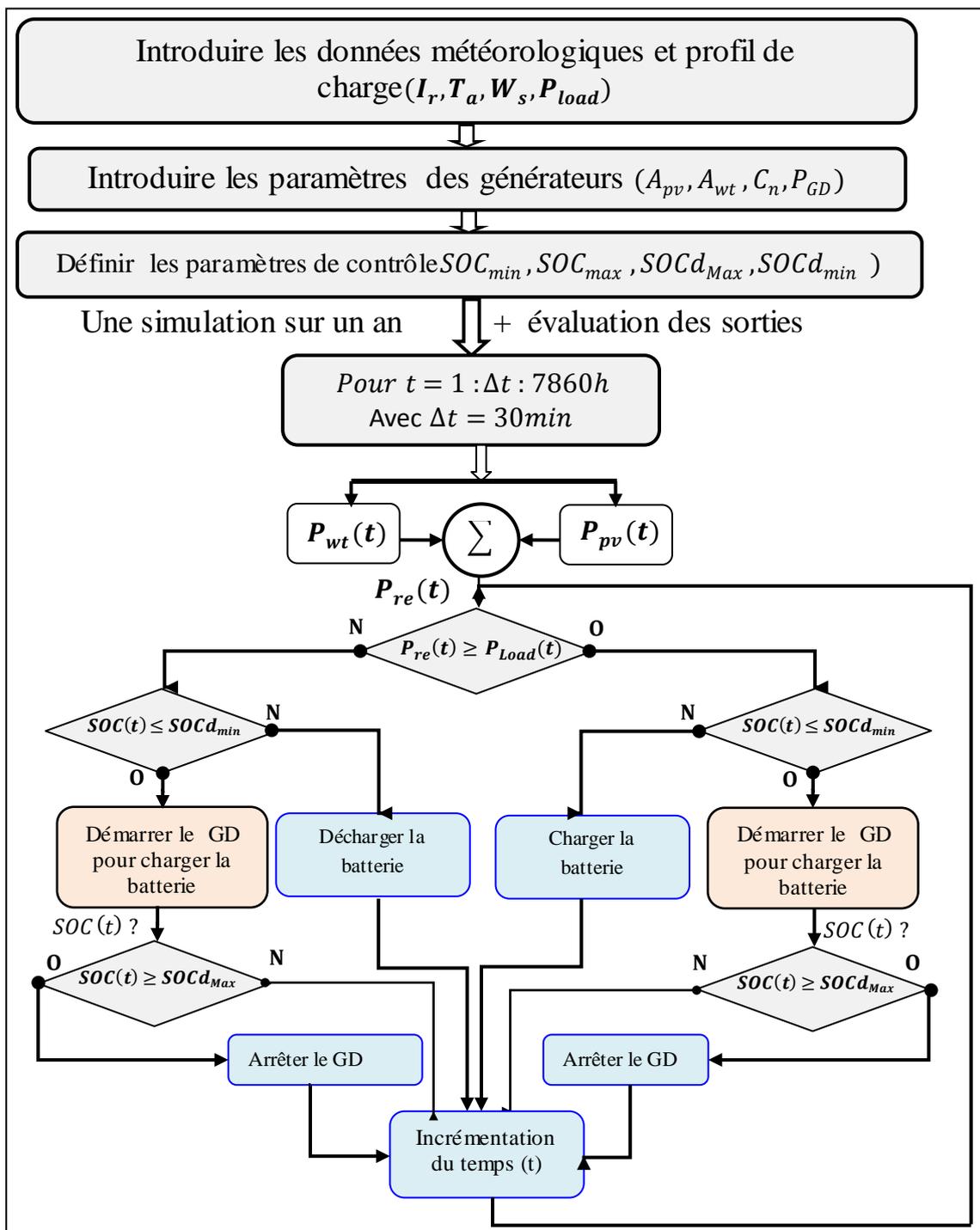


Figure 3. 6 : Organigramme de fonctionnement du simulateur dynamique.

Dans cet organigramme, nous avons présenté le principe de fonctionnement du simulateur dynamique. L'alimentation de la charge sera assurée par les générateurs renouvelables (générateur solaire ou générateur éolien), par le générateur diesel et à l'aide du banc de stockage.

Le principe de gestion de l'énergie dans le SMS est fondé sur l'évaluation de la puissance renouvelable P_{re} générée par les sources renouvelables par rapport à la puissance consommée par la charge.

Dans le cas où la puissance renouvelable P_{re} est suffisante pour satisfaire les besoins de la charge, la puissance restante sera délivrée au système de stockage si ce dernier n'est pas complètement chargé. Le démarrage et l'arrêt du générateur diesel est conditionné par les deux seuils définis en fonction de l'état de batterie (SOC_{dmin} et SOC_{dmax}).

L'optimisation des seuils de fonctionnement du GD permet d'augmenter la durée de vie du GD, de minimiser le coût de consommation lié au carburant et en même temps de réduire les émissions des gaz à effet de serre et de minimiser l'excès de l'énergie dans le système.

Pour tester le fonctionnement du simulateur dynamique nous allons nous baser sur l'utilisation des données météorologiques pour deux sites isolés avec des profils de charge différents. Le premier site choisi est un site tunisien qui se trouve à SIDI DAOUAD et le deuxième est celui de Colorado aux états unis.

Pendant les essais de simulation de ce chapitre, nous travaillons sur l'évaluation de fonctionnement du système multi-source sans prendre en considération l'optimisation du dimensionnement. En effet, L'optimisation de la configuration du SMS fait l'objectif du dernier chapitre.

3.7 Application du simulateur dynamique pour la simulation des SMS

Afin de tester le fonctionnement du simulateur dynamique développé, deux sites météorologiques sont utilisés [NWT12] [STu04] avec des profils de charge différents. Pour réaliser les essais de simulation nous allons associer des valeurs quelconques pour les paramètres de conception du SMS. Dans ces essais de fonctionnement, les paramètres choisis ne représentent pas obligatoirement la configuration optimale pour le SMS. Car notre objectif dans cette application est de valider le fonctionnement du simulateur en mesurant les grandeurs de sortie du simulateur en fonction des paramètres d'entrée et pour tester la stratégie de gestion d'énergie dans le système. Ainsi, dans les essais de simulation qui suivent, nous allons travailler sur la variation d'un paramètre de conception avec les autres paramètres restant constants. Par cette variation on peut évaluer l'influence de variables sur le dimensionnement du SMS.

3.7.1 Influence du GD et du banc de stockage sur le dimensionnement

Le premier site météorologique utilisé pour les essais est le site tunisien [STu04] avec un profil de charge inspiré de la France [Pch13]. Pour simuler le fonctionnement du simulateur dynamique il est nécessaire de définir les valeurs de tous les paramètres de conception. Cependant, l'objectif de ce chapitre est pour évaluer l'influence de quelques paramètres sur les sorties du simulateur. Les paramètres choisis comme des variables pour faire les tests sont :

- ❖ La puissance du générateur diesel (P_{DG});
- ❖ La capacité du banc de stockage (C_n).

Afin de connaître l'influence de la source fossile (générateur diesel) et la capacité du banc de stockage sur le dimensionnement ou les réponses de sortie du SMS, plusieurs essais de simulation sont réalisés. Pour cela, l'intervalle de variation de la puissance pour le générateur diesel compris entre 2.53kW et 5.53kW avec trois valeurs des capacités du banc de stockage 3000 Ah, 3500 Ah et 4000Ah. Pour chaque valeur de capacité on simule le fonctionnement pour plusieurs puissances du générateur diesel. Pour chaque essai de simulation les données météorologiques spécifiques du site sont mesurées sur un an avec pas de simulation égal à trente minutes et un profil de charge égale à 32840kWh/an.

Pour tous les essais de simulation, les valeurs des variables fixes sont résumées dans la Table suivante :

Table 3.2 : Les valeurs des variables fixes pour les essais de simulation.

Variables d'entrée	Valeur
Surface solaire : A_{pv} [m^2]	45
Surface éolienne : A_{wt} [m^2]	200
Seuil d'arrêt du GD : $SOCd_{Max}$	40
Seuil de marche du GD $SOCd_{min}$	35

Par l'utilisation de la **Table 3.2** et pour des valeurs de capacités différentes, les puissances générées par les sources du SMS sont présentées respectivement par la **Figure 3.7**, la **Figure 3.8** et la **Figure 3.9**.

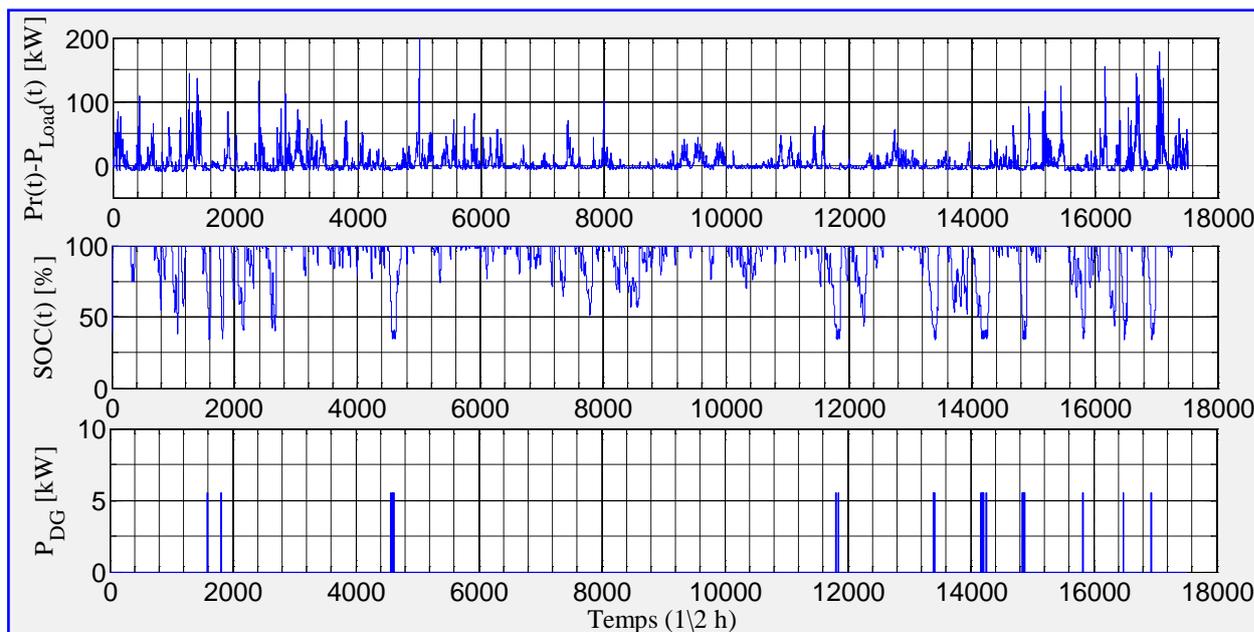


Figure 3. 7 : Variation temporelle de différence de puissance, l'état de charge et la puissance fournie par le GD sur un an ($C_n = 3500$, $P_{DG} = 5.53kW$)

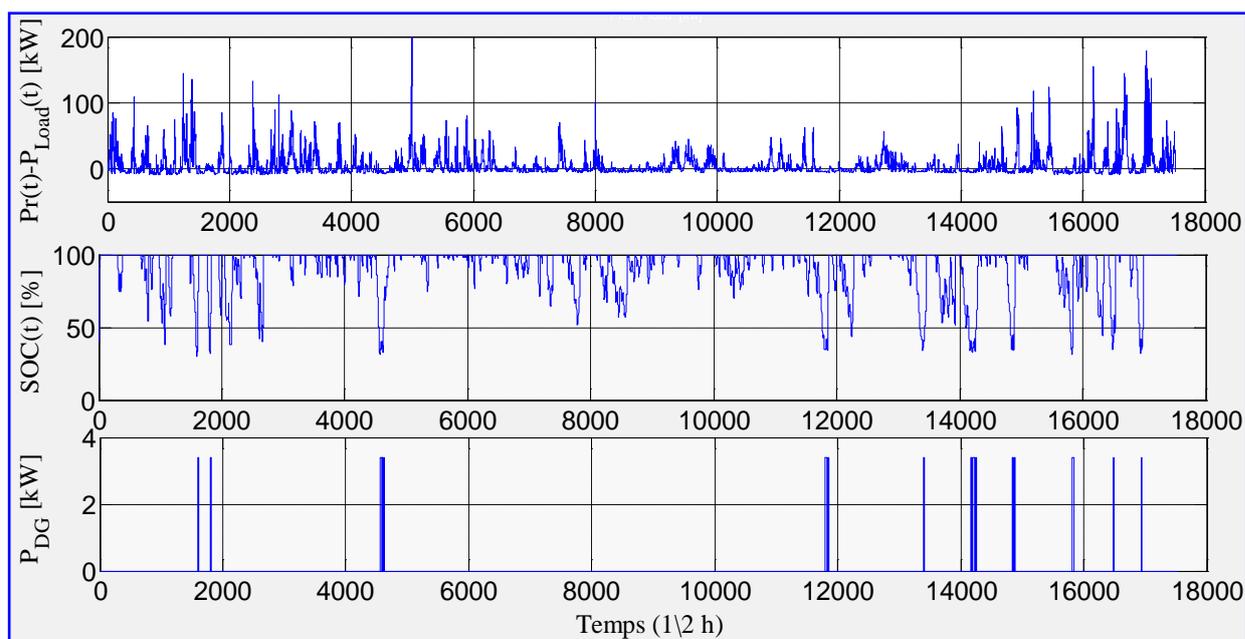


Figure 3. 8 : Variation temporelle des variables de sortie du simulateur sur un an ($C_n = 3500$, $P_{DG} = 3.38 kW$).

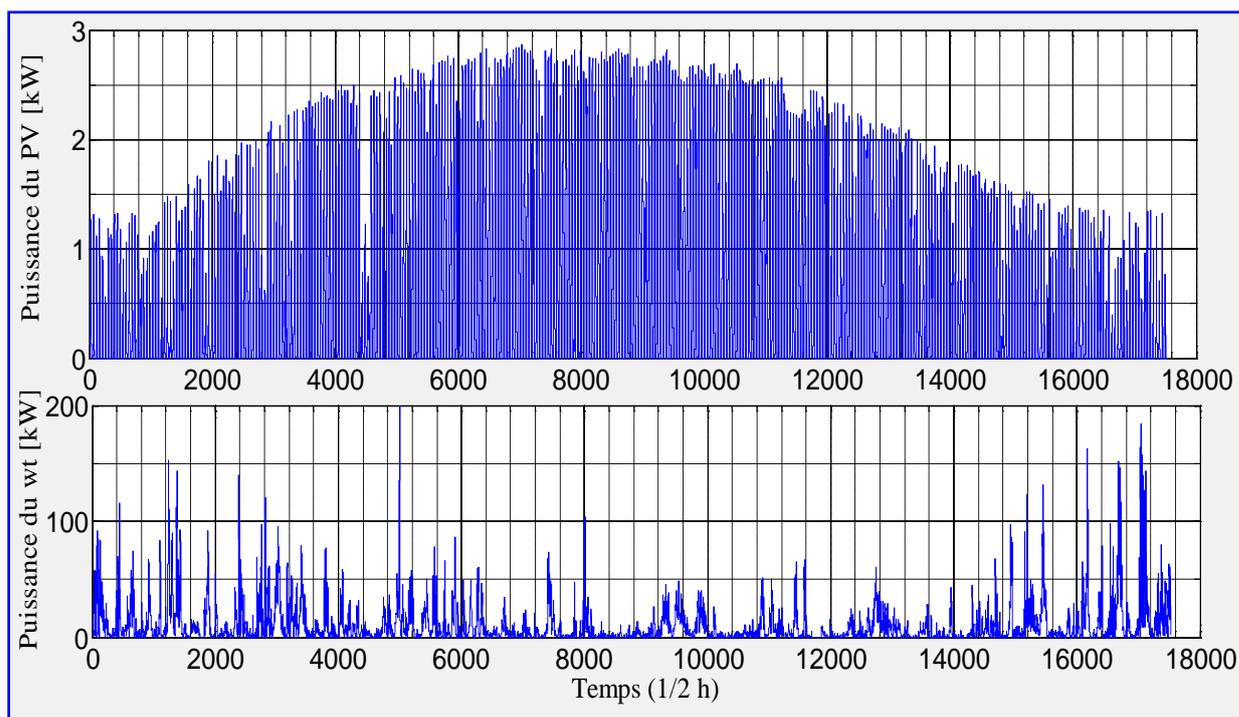


Figure 3.9 : Variations de la puissance délivrée par le générateur solaire et le générateur éolien pendant un an ($C_n = 4000$ $P_{DG} = 2.53$).

Les résultats de simulation en utilisant les valeurs fixes et en prenant les trois capacités sont donnés respectivement par la **Figure 3.10**, la **Figure 3.11**, la **Figure 3.12**, la **Figure 3.13** et la **Figure 3.14**.

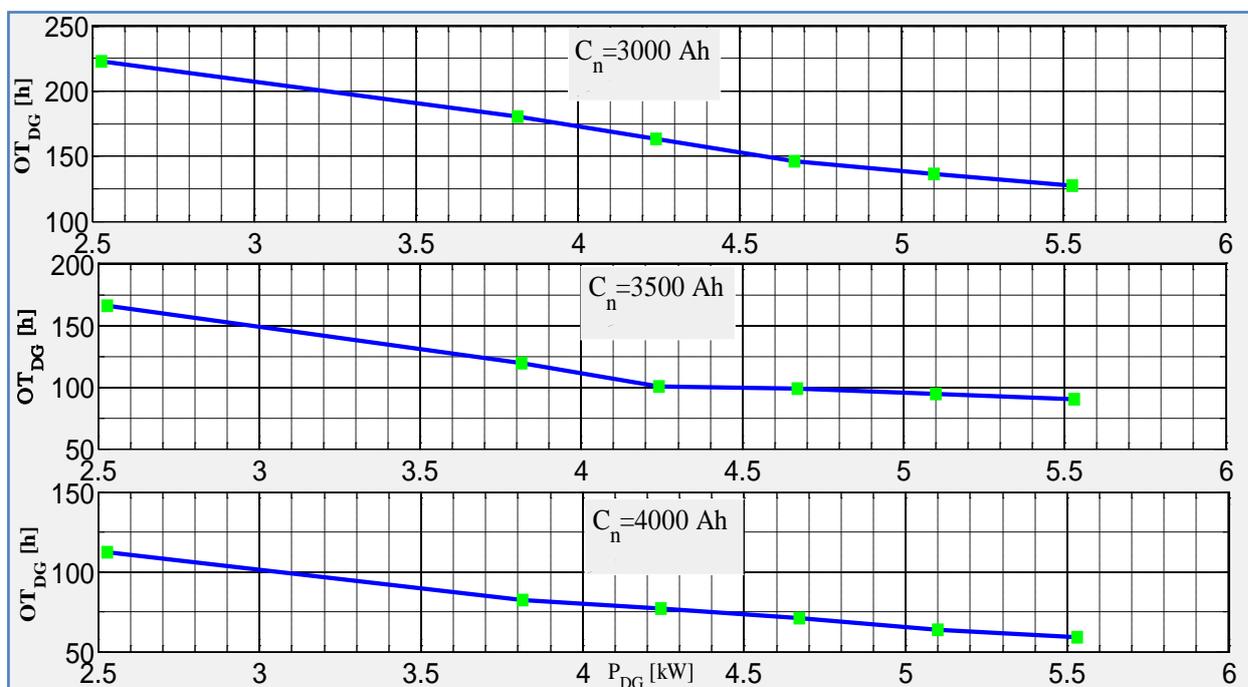


Figure 3.10 : Evolution du temps de fonctionnement du GD par an en fonction de sa puissance.

D'après la **Figure 3.10** on remarque que, la variation de la capacité du banc de stockage a une influence considérable sur le temps de fonctionnement du GD. En effet, Dans le cas d'une capacité égale de 4000 Ah et une puissance 5.53 kW pour le GD, le nombre d'heures est double par rapport à une capacité égale à 3000 Ah. Ceci signifie que le dimensionnement du banc de stockage dans les SMS peut changer la durée de vie du GD. Ainsi, la détermination d'une capacité optimale permettant l'optimisation de la durée de vie de l'installation sera détaillée dans le cinquième chapitre.

La **Figure 3.11** montre clairement l'influence de la capacité du banc de batteries sur le nombre de démarrages effectué par le GD pour différentes puissances de fonctionnement. Dans le cas d'une capacité de 3000 Ah, la variation du nombre de démarrages est presque proportionnelle par rapport à la puissance de fonctionnement du GD. L'optimisation du nombre de démarrages est un point primordial pour l'augmentation de la durée de vie du GD. En effet, un nombre de démarrages important dégrade rapidement le comportement du GD. Ainsi, afin de minimiser le nombre de démarrages du GD au sein des SMS, il est nécessaire de prendre en considération cette contrainte dans la boucle d'optimisation.

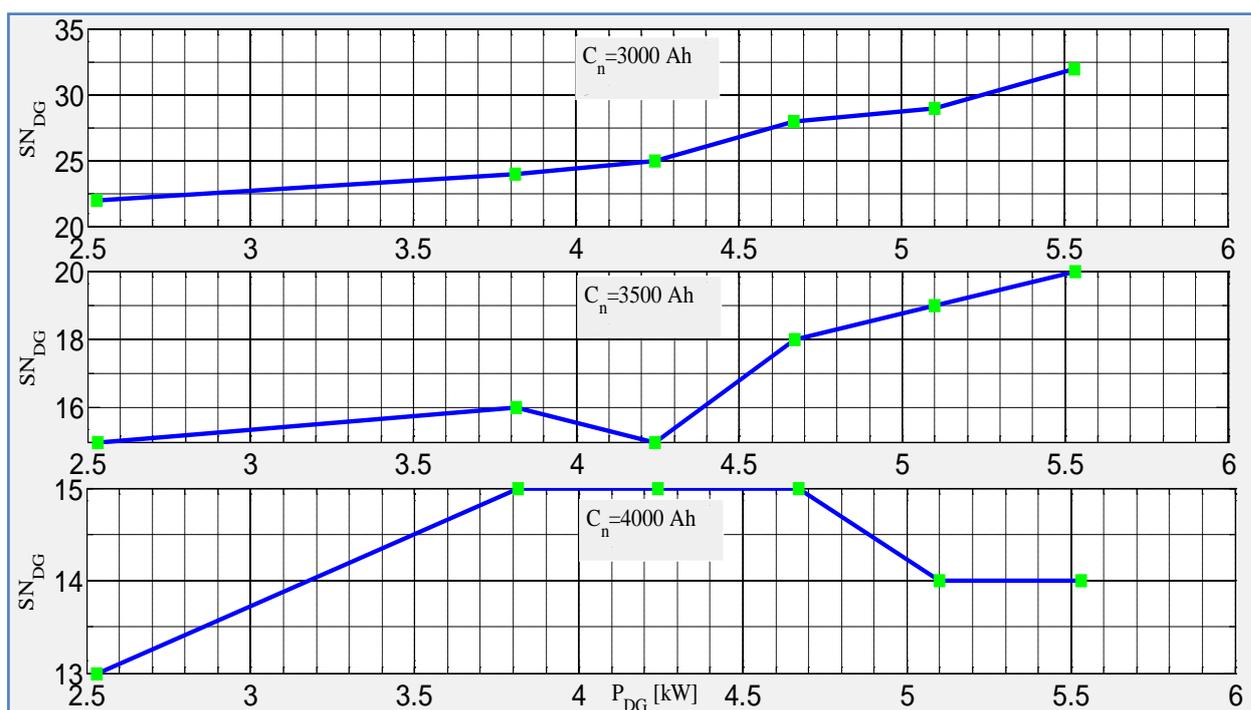


Figure 3.11 : Variation du nombre de démarrages du GD par rapport à la puissance de fonctionnement.

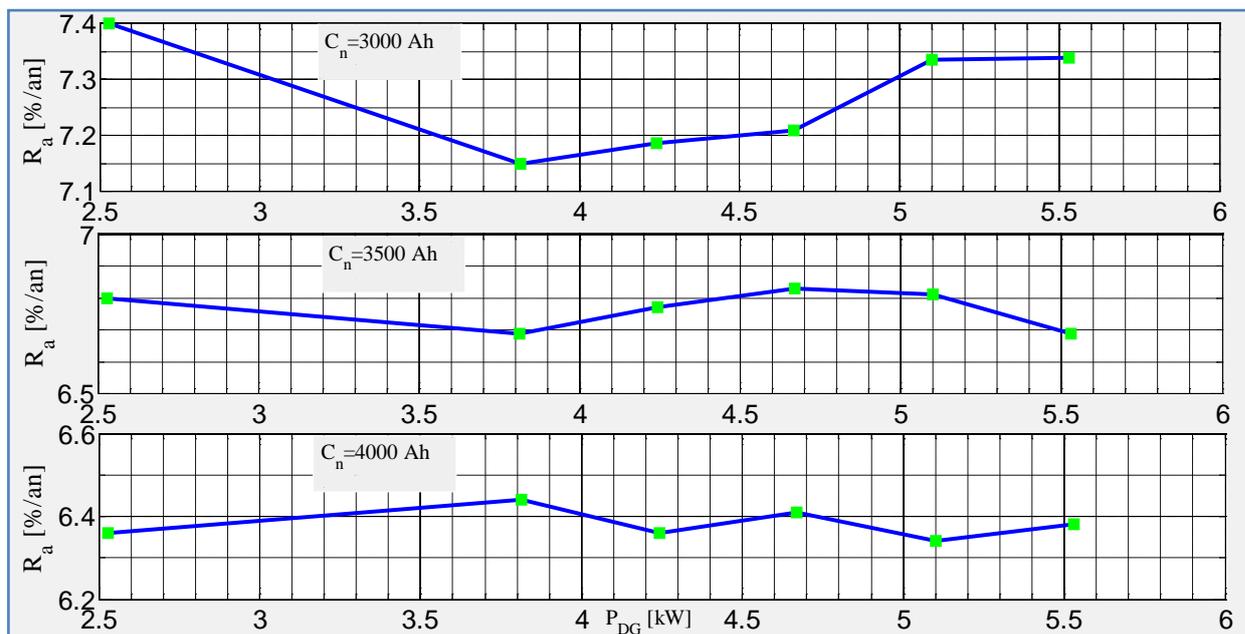


Figure 3.12 : L'évolution du taux de vieillissement du banc de batteries par rapport à la puissance du GD.

Sur les courbes illustrant la variation du taux de vieillissement du banc de batteries, on observe que pour chaque puissance de fonctionnement on a un taux de vieillissement différent. Dans le cas où la capacité de la batterie est égale à 3000 Ah, le taux de dégradation est supérieur par rapport au cas où la capacité correspond à la valeur de 4000 Ah. En effet, la diminution dans la capacité augmente le nombre de cycle de charge-décharge ce qui réduit la durée de vie de la batterie.

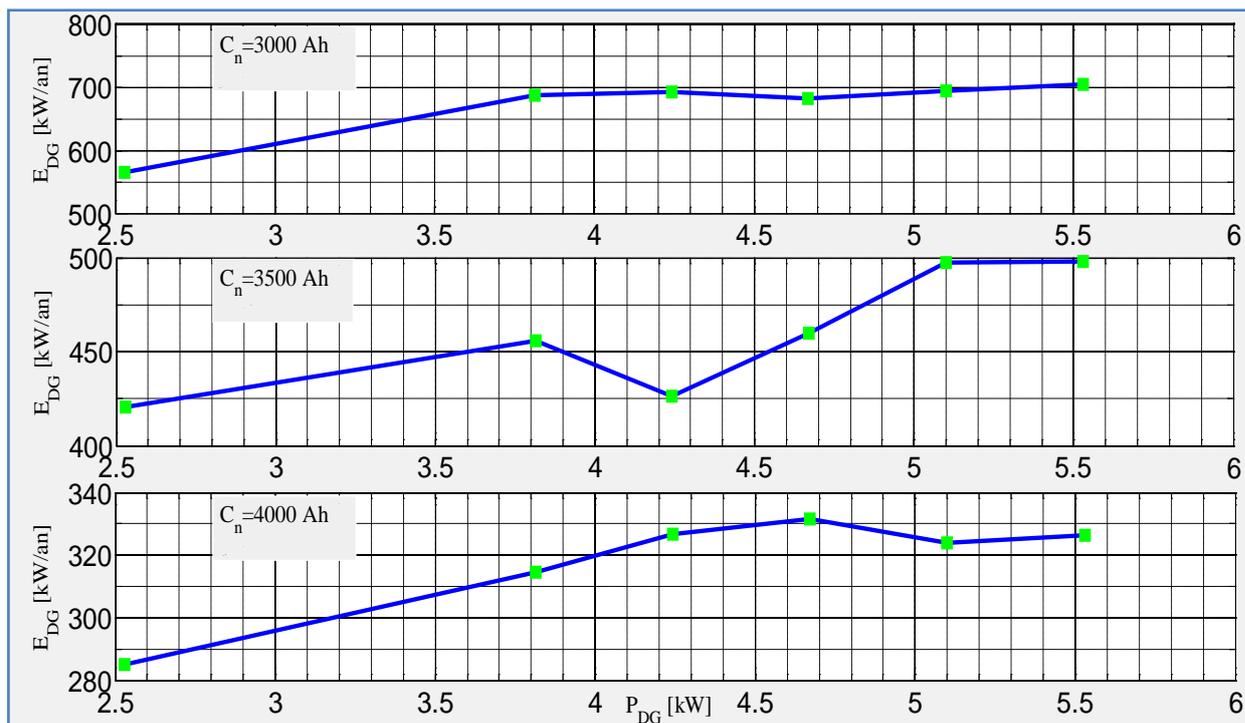


Figure 3.13 : L'énergie produite par le GD pour chaque puissance de fonctionnement et pour différentes capacités.

A partir de la **Figure 3.13** on observe que l'énergie annuelle produite par le GD diminue lorsque la capacité du banc de batteries augmenté. En plus, l'énergie produite est maximale si la puissance de fonctionnement est aussi maximale. Dans un SMS, le fonctionnement du GD dépend de l'état de la batterie. La charge de cette dernière est assurée par toutes les sources d'énergie (renouvelables et non renouvelables).

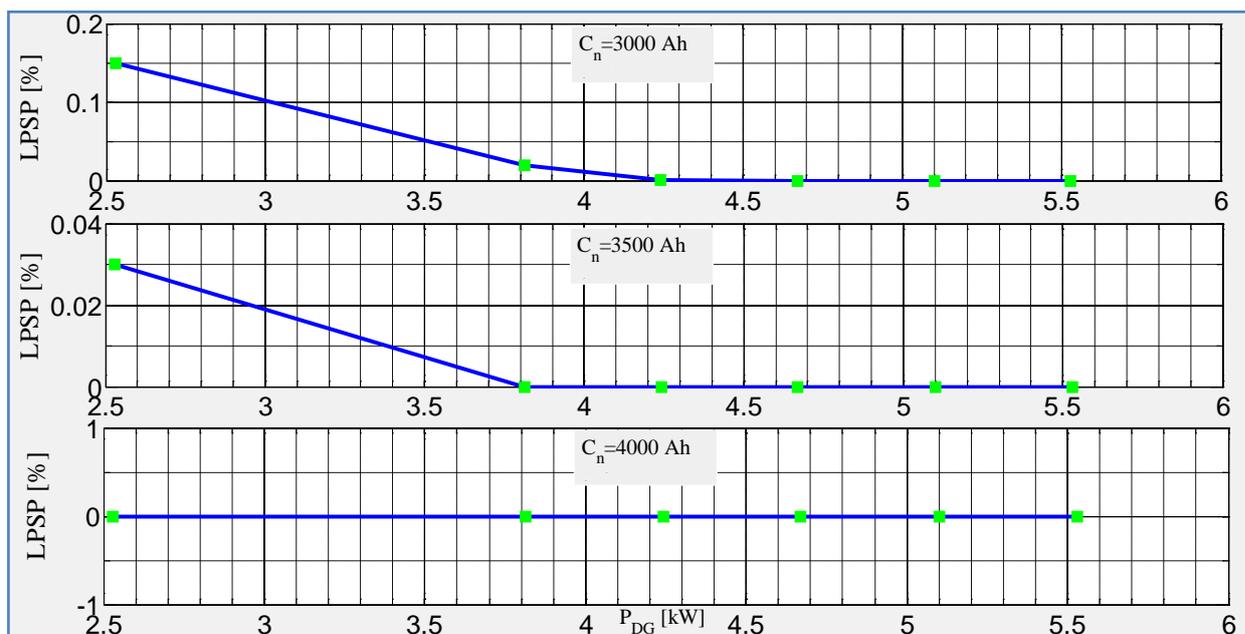


Figure 3.14 : Comparaison entre les paramètres de satisfaction LPSP pour trois valeurs différentes de capacité.

D'après la **Figure 3.14**, on constate que l'évolution du paramètre de satisfaction LPSP en fonction de la puissance du générateur diesel n'est pas le même pour chaque capacité. Pour une capacité égale à 4000 Ah, la fonction LPSP converge rapidement à 0%. Ceci, signifie que la fonction LPSP est très sensible à la variation de la taille du banc de stockage d'une part, et à la variation de la puissance de fonctionnement du générateur diesel d'autre part. Cependant, l'objectif de dimensionnement n'est pas la minimisation de la fonction de satisfaction LPSP seulement, mais la détermination d'une combinaison de paramètres de conception qui optimise le SMS complètement. La combinaison obtenue permettra d'optimiser le dimensionnement et le fonctionnement en même temps du SMS.

Ainsi, l'obtention d'une configuration optimale pour les paramètres de conception nécessite une optimisation globale. Le chapitre cinq fait l'objectif de l'optimisation du système étudié.

3.7.2 Influence des seuils de commande et la puissance du GD sur le dimensionnement

Dans cette section, l'objectif de la simulation est pour évaluer l'influence de la puissance du générateur diesel d'un côté et les seuils de contrôle du générateur d'autre côté. Ainsi, l'exécution de chaque simulation nécessite la fixation du seuil de démarrage du générateur et le seuil d'arrêt. Une fois les seuils de fonctionnement ($SOCd_{min}$ et $SOCd_{Max}$) sont fixés, nous allons définir la puissance du générateur diesel. A chaque puissance pour le générateur, une simulation sur un an sera réalisée. Le profil de charge utilisé pour la simulation correspondant à 2200 Kwh/an avec les paramètres de conception suivants :

- Surface du champ solaire égale à $15 m^2$;
- Surface balayée par le champ éolien égale à $3.5 m^2$ pour une turbine éolienne de 800 w ;
- Banc de stockage composé de 4 batteries 12V 200 Ah.

Dans la suite de ce travail nous gardons les mêmes surfaces et la même capacité nominale de batterie, et on ajoute un groupe diesel afin d'obtenir un système hybride.

Le rôle du générateur diesel DG est la suppression du manque d'énergie dans la charge pour avoir un LPSP=0, et pour atteindre cet objectif nous travaillons sur la variation de la quantité du carburant consommée par le générateur, la puissance minimale du GD, et la minimisation du nombre de démarrages.

La commande du GD est réalisée par un bloc de commande, ce bloc est en relation avec le banc de stockage à travers le bus DC. Ainsi, le démarrage et l'arrêt du GD suit l'état de charge SOC(t) de la batterie entre les seuils de commutation du GD $SOCd_{min}$ et $SOCd_{Max}$.

Les essais de simulation sont présentés par la **Figure 3.15**, la **Figure 3.16** et **Figure 3.17**.

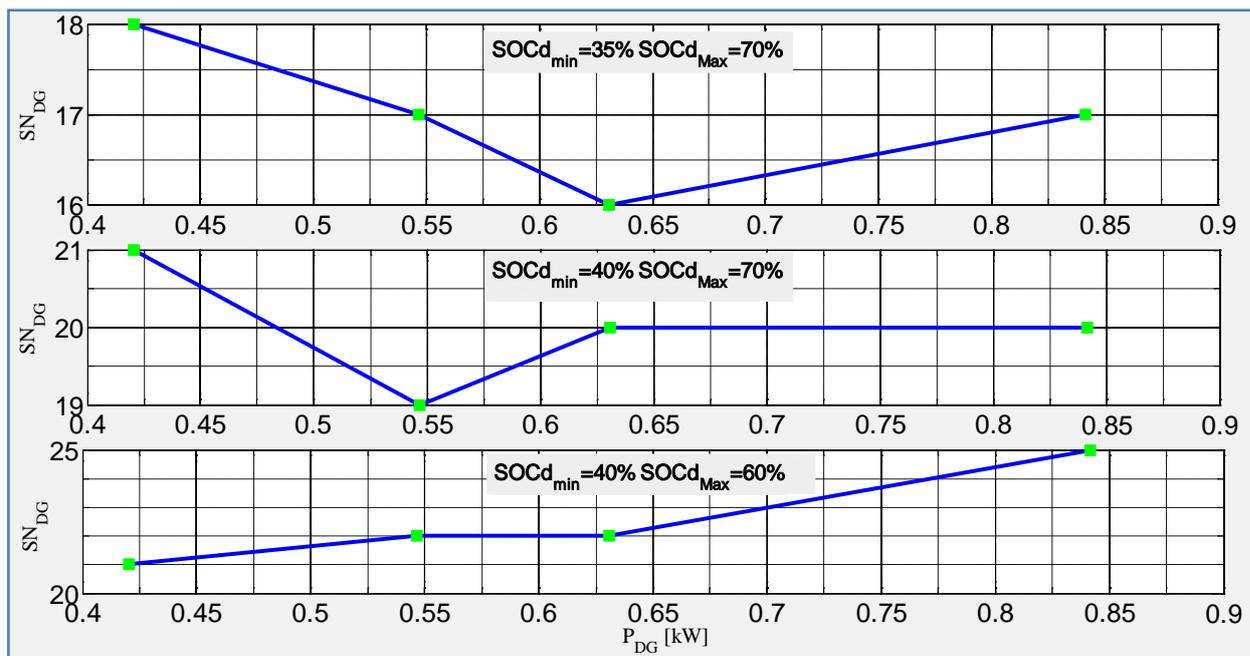


Figure 3.15 : Evolution du nombre de démarrage du GD pour plusieurs seuils de fonctionnement.

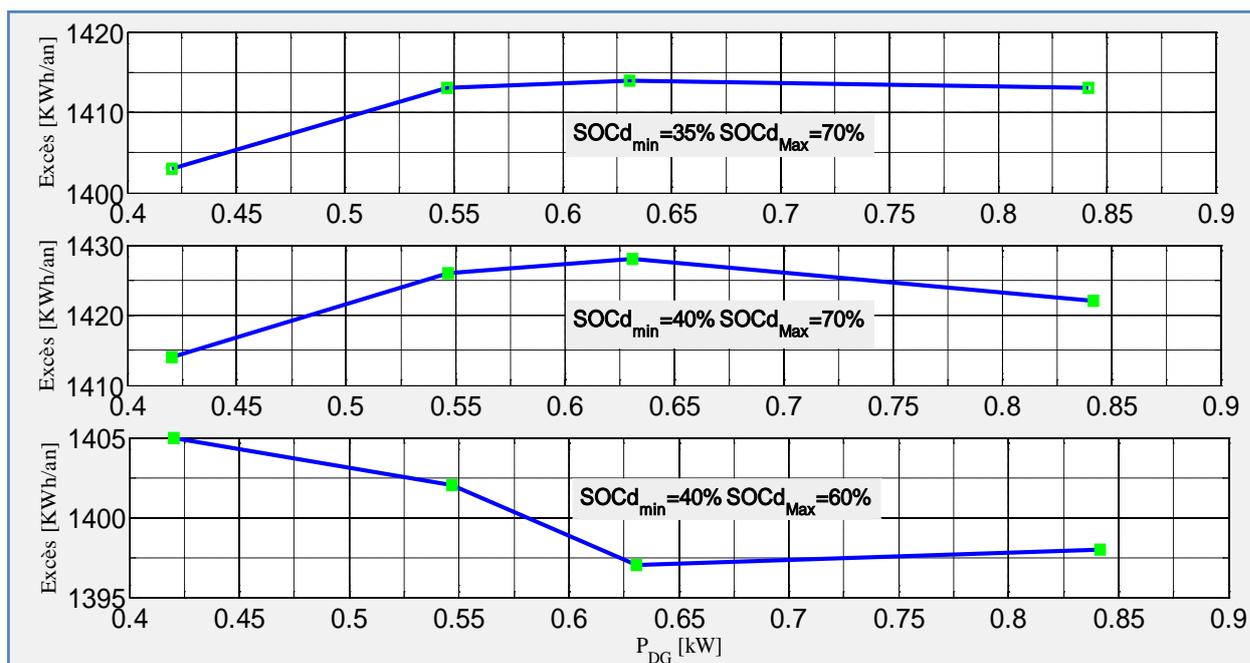


Figure 3.16 : Variation de l'excès d'énergie en fonction de la puissance du GD et à plusieurs seuils de fonctionnement.

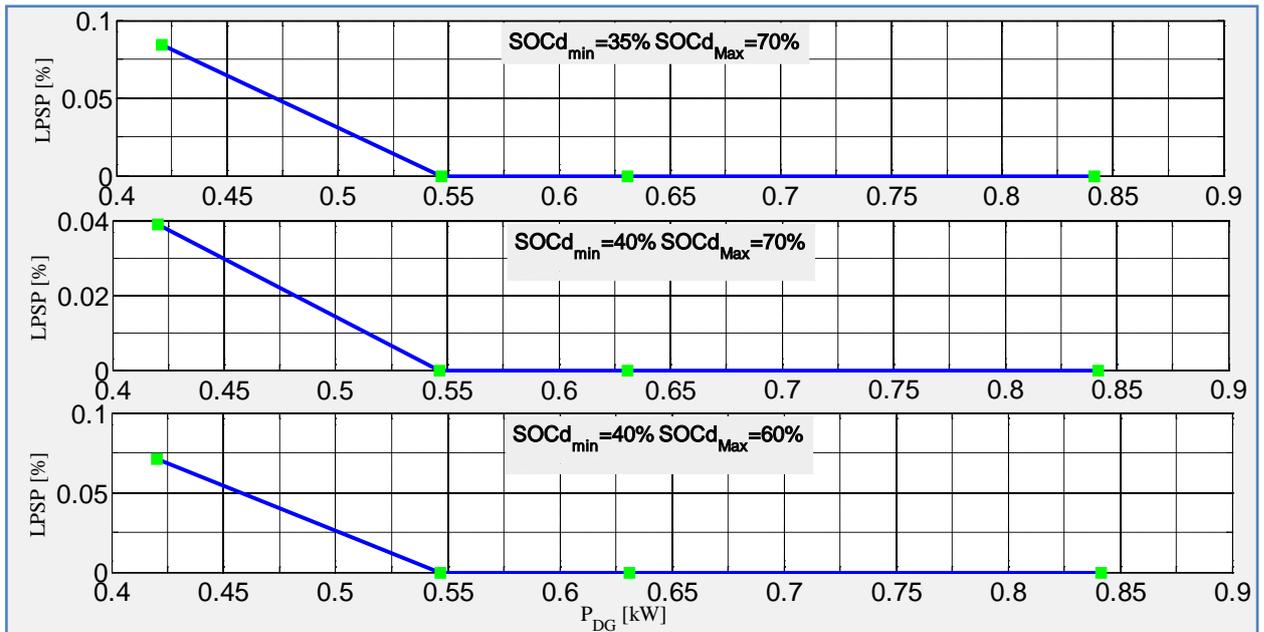


Figure 3.17 : Variation du paramètre de satisfaction en fonction de la puissance du GD et les seuils de fonctionnement.

Dans ces résultats de simulation nous avons supposé que, le générateur diesel est utilisé pour satisfaire les besoins en énergie par le chargement du banc de batteries. Le démarrage et l'arrêt de ce générateur est conditionné la borne inférieure $SOCd_{min}$ et la borne supérieure $SOCd_{max}$. Ces bornes sont obtenues par ajustement afin d'obtenir une configuration hybride convenable au profil de consommation.

La charge et la décharge de la batterie est strictement liée à la différence entre l'énergie globale fournie par le système hybride et l'énergie consommée par la charge notée $\Delta P(t)$. Nous distinguons deux cas différents :

Cas 1 : le générateur diesel est en repos

- Dans le cas où $\Delta P(t) \geq 0$, l'énergie restante sera utilisée pour charger la batterie. Si l'état de charge dépasse le soc_{dmax} un excès d'énergie est apparu.

Cas 2 : le générateur diesel est en marche

- Dans le cas où la différence d'énergie est négative, le profil de charge sera couvert par la batterie ou le générateur. ici, le générateur son rôle est la surveillance de l'état de charge de la batterie pour ne pas descendre en dessous du soc_{dmin} donné.

La **Figure 3.18** représente le fonctionnement du générateur diesel par rapport à l'état de charge de la batterie pour $SOCd_{min} = 35\%$ et $SOCd_{Max} = 70\%$, $P_{GD} = 0.6309kW$, $DOD\% = 80$.

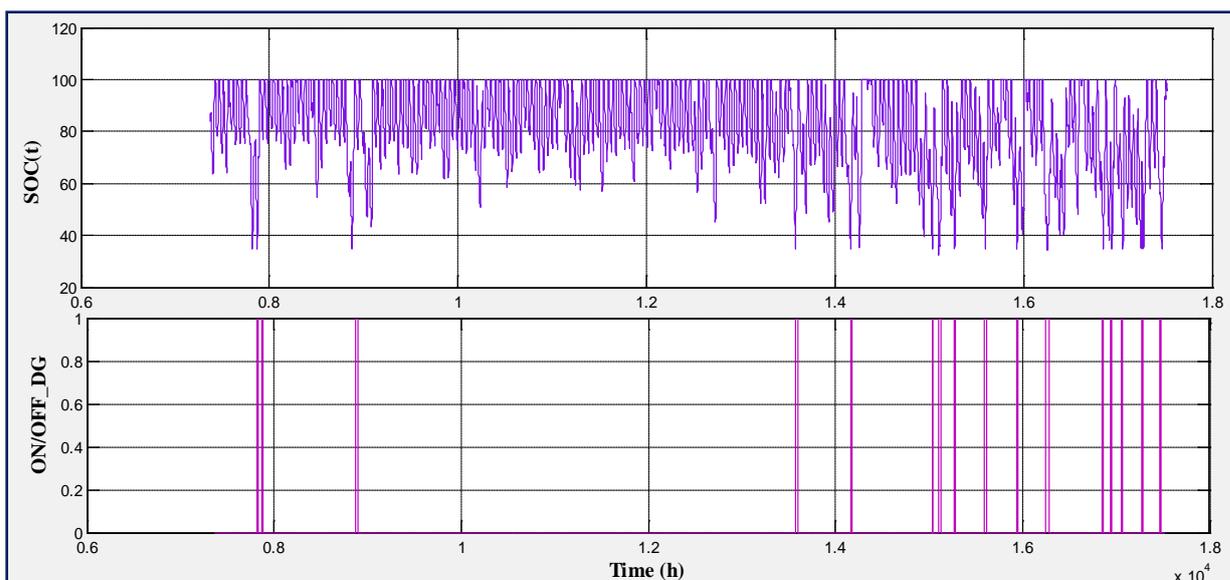


Figure 3. 18 : Etat de charge de batterie et l'état du générateur diesel.

D'après les résultats de simulation obtenus pour plusieurs seuils de fonctionnement du GD, il semble que le choix des seuils marche / arrêt du générateur joue un rôle très important pour satisfaire le profil de charge avec un nombre de démarrage réduit.

3.8 Conclusion

Dans le présent chapitre plusieurs points essentiels ont été traités : Premièrement, l'utilité de la simulation pour la conception des systèmes multi-sources et la classification des méthodes de simulation existantes ont été présentées. Deuxièmement, un ensemble d'outils utilisés pour la simulation et le dimensionnement des systèmes d'électrification dans les sites isolés et les sites connectés au réseau ont été présentés.

Ensuite, un outil pour la simulation et le dimensionnement (Simulateur dynamique) des SMS (PV/WT/DG + Batterie) a été développé. Le simulateur dynamique développé est basé sur l'utilisation des modèles de puissance des différentes sources d'énergie et l'aide de la méthode de simulation dynamique sous l'environnement de programmation **Matlab/Simulink**.

En fin, plusieurs essais de simulation ont été réalisés en utilisant ce simulateur dynamique pour des données météorologiques réelles. Ces essais de simulation permettent de valider le fonctionnement du simulateur pour des variables de dimensionnement différentes. Dans les essais que nous avons réalisés, on a basé sur la fixation de quelques paramètres du SMS et on va varier un paramètre à chaque essai de simulation.

D'après les résultats de simulation obtenus, il semble que le simulateur dynamique développé représente un outil très performant pour simuler le comportement fonctionnel des SMS. En effet, par ce simulateur on peut mesurer les grandeurs nécessaires pour le dimensionnement des SMS sur une durée de fonctionnement de plusieurs années. En plus, on peut voir avec précision l'influence des paramètres du SMS sur le dimensionnement. Les données climatiques testées sur le simulateur dynamique sont mesurées sur un an avec un pas de simulation égal à trente minutes. Pour un vecteur de données d'un an, l'utilisation d'un pas de mesure inférieur à trente minutes ralentit le simulateur. Dans le suivant chapitre, ce simulateur dynamique sera utilisé comme un outil nécessaire pour la détermination d'un modèle mathématique fiable qui facilite la tâche de l'optimisation du dimensionnement du SMS.

**L'OPTIMISATION DE LA MODELISATION PAR LA
METHODE DU PLAN D'EXPÉRIENCES**

4.1 Introduction

L'optimisation du SMS nécessite l'utilisation des entrées et des sorties du SD et exige la génération de toutes les configurations possibles. En effet, il est nécessaire de balayer tout l'intervalle de définition de chaque variable. En plus, la précision de l'optimisation dépend du pas d'échantillonnage adopté pour toutes les variables. Dans le cas où le nombre de variables est élevé, le nombre de combinaisons possibles sera important. Le système est donc considéré comme étant un système complexe dont l'optimisation est rendue compliquée en raison du temps de calcul de plus en plus long et du manque de précision due à la discrétisation des variables du système.

C'est pourquoi, devant une telle situation, l'optimisation du dimensionnement des SMS nécessite l'adoption d'un nouveau modèle de représentation qui devra refléter fidèlement le comportement du système considéré mais en même temps permettre un balayage continu au niveau des variables de dimensionnement. Ainsi, le modèle proposé prend une forme réduite afin de pouvoir implémenter des algorithmes d'optimisation de manière simplifiée et de les mettre en œuvre dans des temps raisonnables. La description des modèles proposés sera présentée dans les sections suivantes.

4.2 Détermination des modèles pour les SMS

La méthode proposée pour la modélisation du système d'électrification s'appelle la méthode de Plan d'Expériences (PE, Design of Experiments). Cette méthode de modélisation permet de simplifier la complexité du système multi-source d'une part et minimiser le temps d'optimisation d'autre part [TML15a].

4.2.1 Présentation de la méthode du plan d'expériences (PE)

La méthode du plan d'expériences représente un outil de modélisation basée sur une approche statistique qui utilise une base expérimentale. Cette méthode permet d'établir les relations existantes entre deux types de variables différentes, les *entrées* et les *sorties* [TML15a] [MZT15] [SVi02][Ska04][JFr08]. En utilisant ces variables, une base **expérimentale** est générée puis un modèle pour le système est déterminé. Une base expérimentale est un ensemble d'expériences dont chacune représente un point ou une exécution. L'application de la méthode de plan d'expériences pour la résolution des problèmes d'optimisation, de modélisation ou de conception exige une base de connaissance (ou d'expériences) comme une plateforme de travail essentielle.

La **Figure 4.1** montre le principe de conception et de modélisation par la méthode du plan d'expériences.

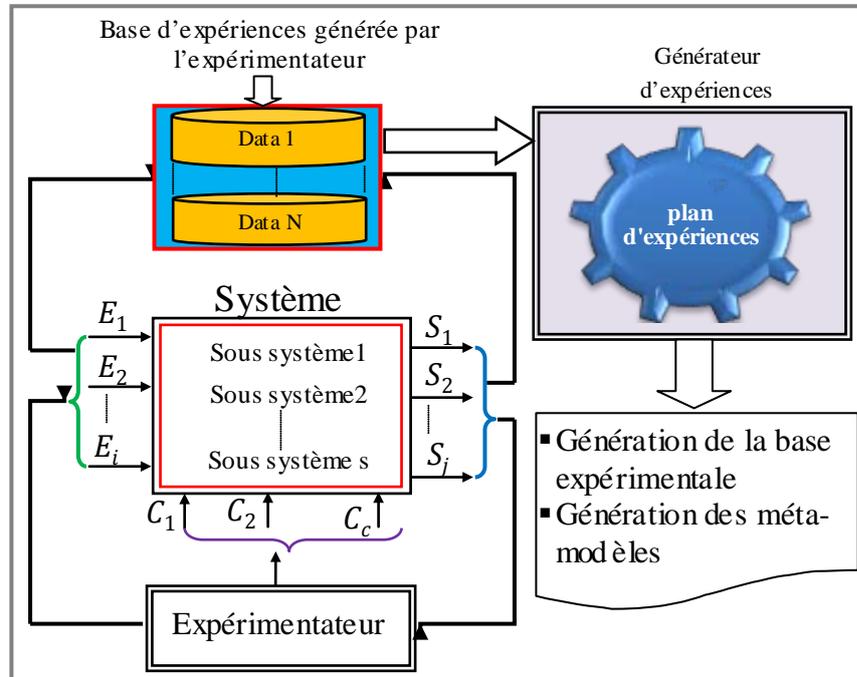


Figure 4.1 : principe de conception et de modélisation par plan d'expériences

Dans cette figure, nous avons présenté la relation qui existe entre l'expérimentateur, le système à modéliser et l'approche du PE. On observe que le rôle principal de l'expérimentateur est la modification et l'observation des réponses de sortie S_j en fonction des variables d'entrées E_i en respectant les contraintes de fonctionnement C_c . L'intervalle de variation de l'ensemble de variables (qui s'appellent facteurs dans l'espace expérimental) d'entrées représente l'espace ou le champ qui nous permet d'atteindre notre l'objectif souhaité. Ainsi, pour un système complexe à grande échelle, l'obtention de l'objectif désiré nécessite des milliers d'essais ou de simulations. Alors, le moyen qui peut réduire le nombre d'expériences (ou d'essais) pour obtenir nos solutions désirées est la méthode du PE.

Une base d'expériences est définie par N combinaisons générées par le système à modéliser. Une combinaison signifie une seule expérience pour des valeurs de variables et de sortie bien définies. Pour chaque expérience, la variable de sortie peut être mesurée comme un point ou un vecteur de points.

Le nombre de facteurs dans un plan d'expériences doit être égal au nombre de variables d'entrée du système, et les réponses du plan d'expérience correspondants au nombre de réponses de sortie du système.

Le choix de l'intervalle de variation des facteurs est strictement lié à l'objectif ciblé à la sortie du système. Donc, avant de générer une base d'expérience, il est important de définir une *borne inférieure* et une *borne supérieure* pour chaque facteur d'entrée.

Le passage entre les essais (ou les expériences) générés par le processus (ou le système) et l'espace expérimental est basé sur le principe de *codage* des facteurs sur le plan de présentation. Le codage d'un facteur signifie la manière de sa représentation dans un espace expérimental en utilisant un type de plan ou de présentation bien défini.

Ainsi, le choix du type de plan d'expérience joue un rôle très important afin d'obtenir un modèle expérimental bien adapté au processus réel. Selon la littérature plusieurs types de plans sont proposés pour la résolution des problèmes de modélisation et d'optimisation sur des processus de nature différente (domaines automatique, électrotechnique, chimique et autre).

4.3 Modélisation des SMS par la méthode du plan d'expériences

Dans cette section nous développons l'algorithme de la méthode du PE pour modéliser le SMS (PV/WT/DG+Batteries). Ainsi, les modèles obtenus par la méthode du **PE** sont des méta-modèles qui illustrent la variation des sorties du système en fonction des paramètres de conception (Surface du champ solaire **A_{pv}** , surface du rotor de la turbine éolienne **A_{wt}** , la capacité de batterie **C_n** , la puissance du générateur diesel P_{DG} et seuils du générateur diesel ($SOCD_{min}$ et $SOCD_{Max}$)).

Donc, La mise en œuvre de la méthode du PE consiste d'abord, à générer les configurations possibles par le SD. La configuration est une simulation dynamique sur une période d'un an de mesure (17520 points) pour des paramètres de conception et de contrôle constants. Les vecteurs des données météorologiques (I_r, T_a et W_s) sont utilisés pour chaque configuration ou exécution.

La modélisation par PE permettant de simplifier la complexité du SD en gardant le même comportement fonctionnel. La démarche de modélisation du SMS en utilisant la méthode du PE peut être structurée en suivant les étapes suivantes [TML15a]:

Etape 1 : Définir les paramètres ou les variables nécessaires pour réaliser les expériences. Chaque expérience représente une configuration exécutée par le SD pour des valeurs d'entrées et

des contraintes de contrôle. La **Figure 4.2** montre la méthodologie proposée pour la modélisation par la méthode du PE à partir du SD du système multi-sources [TML15a].

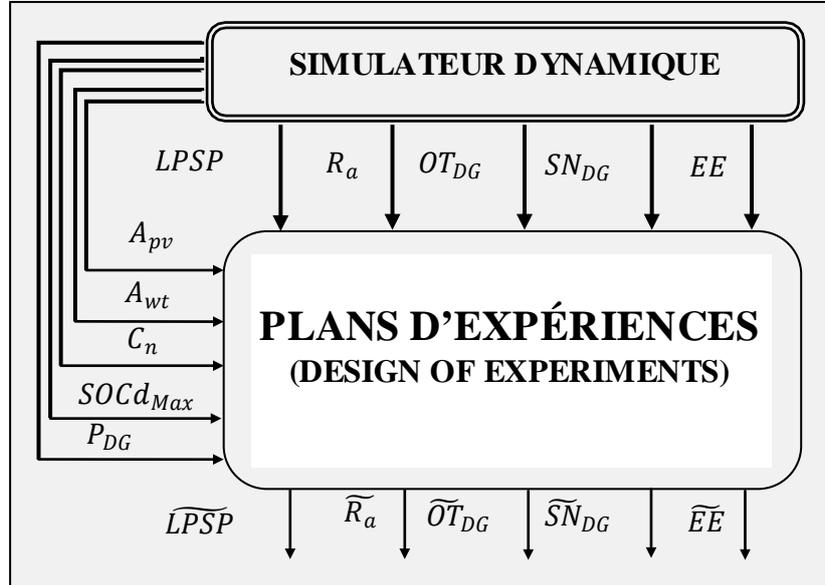


Figure 4.2 : Relation entre le SD et la méthode du PE.

Avec

$V_{in} = [LPSP \ R_a \ OT_{DG} \ SN_{DG} \ EE \ Apv \ Awt \ Cn \ SOCd_{Max} \ PDG]$: est le vecteur d'entrée pour l'espace d'expériences.

$V_{out} = [\overline{LPSP} \ \overline{R}_a \ \overline{OT}_{DG} \ \overline{SN}_{DG} \ \overline{EE}]$: est le vecteur des sorties (les fonctions) estimées ou prédites par PE.

Le vecteur de sortie représente le modèle obtenu par plans d'expériences. Toutes les fonctions ou les modèles de sortie varient en fonction de paramètres de conception et de contrôle du système multi-sources. Les modèles prédits pour les variables de conception sont données par les expressions suivantes :

$$\overline{LPSP} = f(Apv, Awt, Cn, SOCd_{Max}, PDG) \quad (4.1)$$

$$\overline{R}_a = f(Apv, Awt, Cn, SOCd_{Max}, PDG) \quad (4.2)$$

$$\overline{OT}_{DG} = f(Apv, Awt, Cn, SOCd_{Max}, PDG) \quad (4.3)$$

$$\overline{SN}_{DG} = f(Apv, Awt, Cn, SOCd_{Max}, PDG) \quad (4.4)$$

$$\overline{EE} = f(Apv, Awt, Cn, SOCd_{Max}, PDG) \quad (4.5)$$

Avec

\overline{LPSP} : Le paramètre de satisfaction en % ;

$\overline{R}_a = \overline{T}_v$: Le taux du vieillissement prédit en % pour le banc de batteries (PbA) ;

$\overline{OT}_{DG} = \overline{TF}_{GD}$: Le temps de fonctionnement prédit en heure pour générateur diesel ;

$\overline{SN}_{DG} = \overline{ND}_{GD} = [(N_{marc\ he} + N_{Arrêt})/2]$: Le nombre de démarrage du générateur diesel ;

\overline{EE} : La fonction de coût en termes d'énergie grise du SMS global.

Etape 2 : Cette étape concerne la définition de l'intervalle de modélisation ou de conception par plan d'expériences à partir de l'ensemble de configurations exécutées par le SMS. Ainsi, l'intervalle de conception est strictement lié à l'objectif de dimensionnement et d'optimisation du SMS.

Selon l'objectif de la thèse, le dimensionnement du SMS est réalisé de façons à satisfaire les besoins énergétiques d'un profil de charge bien définie dans un site isolé sous des contraintes différentes. Les contraintes de dimensionnement sont : La minimisation des pertes, l'optimisation du SMS par rapport au coût de conception et l'optimisation de fonctionnement du système global. Les équations suivantes montrent l'intervalle de variation de chaque variable ou facteur de conception.

$$A_{pv,min} \leq A_{pv} \leq A_{pv,Max} \quad (4.6)$$

$$A_{wt,min} \leq A_{wt} \leq A_{wt,Max} \quad (4.7)$$

$$P_{GD,min} \leq P_{GD} \leq P_{GD,Max} \quad (4.8)$$

$$SOCd_{Max,min} \leq SOCd_{Max} \leq SOCd_{Max,Max} \quad (4.9)$$

$$C_{n,min} \leq C_n \leq C_{n,Max} \quad (4.10)$$

Avec

$A_{pv,min}, A_{pv,Max}$: Représente respectivement la borne inférieure et la borne supérieure de la surface du champ solaire ;

$A_{wt,min}, A_{wt,Max}$: représente respectivement la borne inférieure et supérieure de la surface balayée par le rotor de la turbine éolienne ;

$P_{GD,min}, P_{GD,Max}$: La borne inférieure et la borne supérieure respectivement de la puissance délivrée par le générateur diesel ;

$SOCd_{Max,min}, SOCd_{Max,Max}$: La borne inférieure et la borne supérieure respectivement d'arrêt du générateur diesel ;

$C_{n,min}, C_{n,Max}$: Les limites de variation de la capacité du banc de stockage.

Le choix de la valeur de la borne inférieure et de la borne supérieure de chaque variable est réalisé suivant plusieurs paramètres. Parmi ces paramètres le potentiel énergétique délivré par les profils

météorologiques, le profil de consommation ou de charge du site à alimenter et les contraintes d'électrification.

La détermination de la base de données nécessaire à la modélisation par plan d'expérience exige la connaissance d'une configuration initiale. Cette configuration initiale générée par le simulateur dynamique ne représente pas une configuration optimale pour le système multi-source. En effet, dans cette étape l'optimum global du SMS n'est pas connu et il suffit de trouver un point $(A_{pv,init}, A_{wt,init}, P_{DG,init}, C_n,init, SOCd_{Max,init})_{init}$ accepté avec une valeur de LPSP égale à zéro sans prendre en considération la valeur coût énergétique en MJ du système global.

Alors, afin d'obtenir ce point initial on va travailler sur la variation des paramètres de conception de façon à avoir une participation de tous les générateurs pendant l'électrification.

A partir du point initial, et pour chaque variable du système on peut définir une borne inférieure et une borne supérieure. Entre les deux bornes définies on distingue plusieurs valeurs possibles. Le nombre de ces valeurs dépend du pas de variation choisi pour le plan d'expériences.

Etape 3 : Représente l'étape de la génération de la base de données en utilisant le SD. La taille de cette base de données dépend de la taille des vecteurs des variables d'entrée. Chaque exécution ou chaque simulation sera effectuée sur des données météorologiques pour un an de mesure (17520). La base de données générée par le SD est utilisée complètement par la méthode du plan d'expériences pour le développement des modèles.

La base de données est composée d'une infinité de configurations, chaque configuration représente une expérience pour le plan d'expériences. La taille de la base dépend du nombre de points pris pour chaque variable. Le nombre des points n'est pas obligatoirement identique pour toutes les variables. Afin d'utiliser toute la base de données dans l'espace expérimental, les réponses de sortie par rapport aux variables d'entrée sont enregistrées de la manière suivante :

Pour chaque configuration d'entrée, le simulateur génère des vecteurs ou des réponses à la sortie. Les vecteurs générés, chacun comporte 17520 valeurs (un an de simulation). La **Figure 4.3** montre le principe de stockage des configurations exécutées par le SD sous la forme des vecteurs.

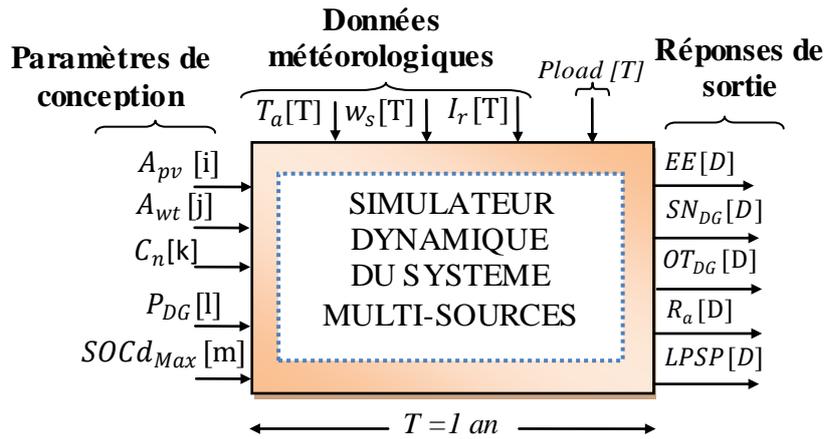


Figure 4.3 : Principe de génération des expériences par le SD

Avec

(i, j, k, l, m) : représentent les indices de la donnée utilisée pour les variables d'entrée respectivement $(A_{pv}, A_{wt}, P_{DG}, C_n, SOCd_{Max})$;

$(EE[D], C_n[D], SOCd_{Max}[D]) SN_{DG}[D], P_{DG}[D]$: représente le vecteur final qui comporte la valeur finale de chaque réponse de sortie pour la simulation.

4.3.1 Algorithme pour la génération d'expériences

Le principe de génération de la base de données est donné par l'algorithme 1 suivant :

Algorithme 1 : Principe de génération de la base des expériences en utilisant le SD

```

Pour  $SOCd_{min} = constant$ 
-----Pour  $A_{pv,min} : \Delta 1 : A_{pv,max}$ 
-----Pour  $A_{wt,min} : \Delta 2 : A_{wt,max}$ 
-----Pour  $P_{DG,min} : \Delta 3 : P_{DG,max}$ 
-----Pour  $C_{n,min} : \Delta 4 : C_{n,max}$ 
-----Pour  $SOCd_{Max,min} : \Delta 5 : SOCd_{Max,max}$ 
▪ Exécuter le simulateur dynamique pour  $t = 1 : \Delta t : 8760$ , ( $\Delta t = 30 minutes$ )
▪ Observer les réponses de sortie ( $EE, SN_{DG}, OP_{DG}, R_a, LPSP$ )
▪ sauvegarder les facteurs d'entrée et les réponses de sortie pour chaque exécution
-----Fin
-----Fin
-----Fin
-----Fin
-----Fin

```

Avec $\Delta 1, \Delta 2, \Delta 3, \Delta 4$ et $\Delta 5$ représentent les pas de variation des variables.

Ainsi, pour plusieurs valeurs associées aux variables d'entrées la base de données globale est organisée comme suit :

Table 4.1 : Présentation de l'organisation de la base d'expériences

Configuration	$A_{pv} [i]$	$A_{wt} [j]$	$C_n [k]$	$P_{DG} [l]$	$SOCd_{Max} [m]$	$EE [D]$	$SN_{DG} [D]$	$OT_{DG} [D]$	$R_a [D]$	$LPSP [D]$
1	$A_{pv} [1]$	$A_{wt} [1]$	$C_n [1]$	$P_{DG} [1]$	$SOCd_{Max} [1]$	$EE [1]$	$SN_{DG} [1]$	$OT_{DG} [1]$	$R_a [1]$	$LPSP [1]$
2										
·										
·										
·										
N	$A_{pv} [N_i]$	$A_{wt} [N_j]$	$C_n [N_k]$	$P_{DG} [N_l]$	$SOCd_{Max} [N_m]$	$EE [N_p]$	$SN_{DG} [N_p]$	$OT_{DG} [N_p]$	$R_a [N_p]$	$LPSP [N_p]$

Avec N est le nombre de combinaisons possibles réalisées par le SD et qui représente la taille de la base de données. $N_p = N_i * N_j * N_k * N_l * N_m$

Etape 4 : Une fois la base de données générée par le simulateur dynamique nous allons modéliser le SMS dans l'espace expérimental. Dans cette étape un algorithme de modélisation par plan d'expérience a été proposé. La **Figure 4.4** montre l'organigramme proposé pour la conception du SMS en utilisant l'approche de plan d'expériences [TML15a].

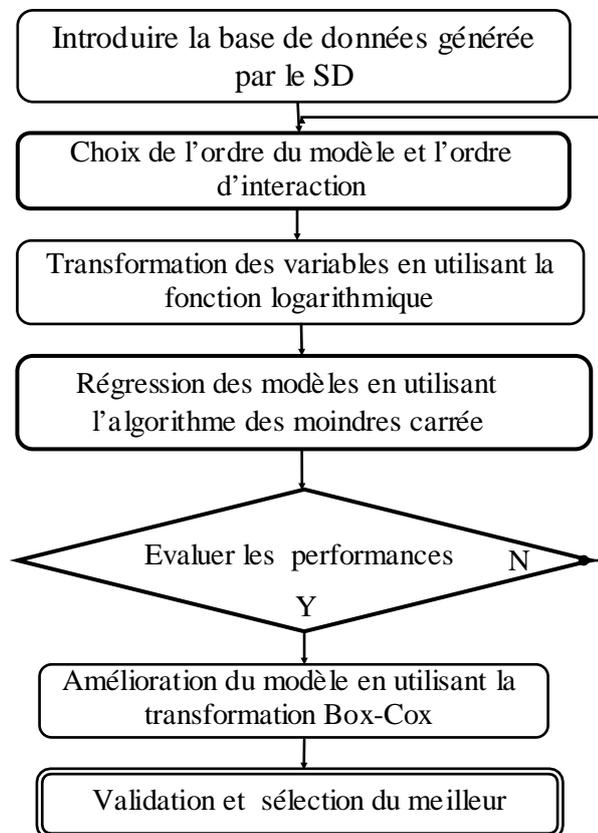


Figure 4.4 : Organigramme de modélisation par PE

Une fois la base de données générée par le SD, il est nécessaire de définir le type de méta-modèle utilisé par le plan d'expériences. Chaque réponse de sortie possède un modèle de conception propre, dans notre situation cinq méta-modèles sont nécessaires. Le choix de la nature de méta modèle joue un rôle très important pour la détermination d'un modèle expérimental bien adapté au modèle comportemental du SMS. Notre choix est basé sur des méta-modèles de conception type polynômial.

Ces méta-modèles de conception sont caractérisés par l'ordre polynômial et l'ordre d'interaction. L'équation (4.11) représente la forme quadratique du modèle.

$$y_i = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + b_{11}x_1^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{15}x_1x_5 + b_{22}x_2^2 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{25}x_2x_5 + b_{33}x_3^2 + b_{34}x_3x_4 + b_{35}x_3x_5 + b_{44}x_4^2 + b_{45}x_4x_5 + b_{55}x_5^2 \quad (4.11)$$

Où

$$x_1 = \log_{10}(A_{pv}), x_2 = \log_{10}(A_{wt}), x_3 = \log_{10}(C_n), x_4 = \log_{10}(SOCd_{Max}) \text{ et } x_5 =$$

$\log_{10}(Fuel_{DG})$ représentent les facteurs ; b_0, b_i, b_{ii} et b_{ij} représentent les coefficients de régression. Les coefficients b_1, b_2, b_3, b_4 et b_5 représentent les coefficients multipliés par les facteurs x_1, x_2, x_3, x_4 et x_5 respectivement. Ainsi,

$b_{12}, b_{13}, b_{14}, b_{15}, b_{23}, b_{24}, b_{25}, b_{34}, b_{35}$ et b_{45} sont des coefficients multipliant deux facteurs différents. Finalement, $b_{11}, b_{22}, b_{33}, b_{44}$ et b_{55} représentent l'effet quadratique des facteurs.

A partir de ce modèle on constate que le polynôme est caractérisé par des facteurs à nature multiplicative. Cette nature exige l'utilisation d'une transformation logarithmique pour toutes les variables du polynôme. Par cette transformation, les modèles régressés deviennent meilleurs et proches des modèles de références. La régression des modèles de conception peut être réalisée par plusieurs techniques, dans notre cas nous avons utilisé la méthode de moindres carrés. Cette méthode de régression permet de minimiser l'erreur quadratique entre le modèle de référence et le modèle prédit. La qualité des modèles prédits par l'espace expérimental sera évaluée par le paramètre quadratique ou le facteur statistique R^2 . Une autre transformation qui s'appelle la transformation Cox-Box a été appliquée pour l'amélioration de certains modèles.

4.3.2 Résultats de modélisation par la méthode du plan d'expériences

Avant de présenter les résultats de modélisation ou de conception obtenus par la méthode du PE suivant la méthodologie illustrée précédemment, il est important de définir tous les paramètres nécessaires au fonctionnement du SMS à l'aide du SD. Ainsi, les données météorologiques utilisées comme des entrées pour les sources d'énergie renouvelables sont les

données du site tunisien [STu04]. Les paramètres du rendement des modules de conversion sont résumés dans la table suivante :

Table 4. 2 : Rendements des convertisseurs et de batterie

Rendement	η_{dcac}	η_{dcac}	η_{acdc}	η_{batc}	η_{batd}
Valeur [%]	95	95	95	85	100

L'intervalle de variation et le pas de calcul associé à chaque variable d'entrée sont illustrés dans la table suivante :

Table 4. 3 : Borne inférieure et borne supérieure des variables

Variable	Borne inférieure	Interval de calcul	Borne supérieure
$A_{pv} [m^2]$	35	5	60
$A_{wt} [m^2]$	130	10	220
$C_n [Ah]$	3500	200	4500
$SOCD_{Max} [%]$	36	5	46
$P_{DG} [kw]$	2.54	0.84	6

En utilisant l'algorithme de génération de la base d'expériences on peut obtenir plus de 5000 expériences (configuration). La détermination des méta-modèles est obtenue par l'algorithme du plan d'expérience présenté par Figure 4.4. Les facteurs ou les coefficients des méta-modèles obtenus sont résumés dans la table suivante :

Table 4. 4 : Facteurs des modèles obtenus par la méthode du PE.

Coefficient	variables de sortie				
	\overline{EE}	\overline{SN}_{DG}	\overline{OT}_{DG}	\overline{R}_a	\overline{LPSP}
b0	65465092	3285.1	-103409	350.7	59.7
b1	- 10284164	9387	- 2928.87	- 35.68	- 5.87
b2	-26831989	- 10321.1	- 143134	- 8.76	- 18.8
b3	- 19945555	73602.8	123233.5	- 105.7	- 17.5
b4	11552232	- 139790	135976.5	- 115.9	- 1.15
b5	2498554	28137.63	- 114266	24.96	- 29.9
b11	801318	- 1592.39	- 3758.74	3.92	0.16
b22	3724788	2449.2	30417.84	- 5.51	1.58
b33	1998593	- 10566.6	- 15830.1	10.61	1.94
b44	-459804	5120.57	- 15573.8	15.5	-0.43
b55	-53487	212.2687	0	1.83	2.21
b12	2132233	714.52	16040.8	2.02	1.35
b13	1159415	- 4696.84	- 5468.84	1.82	0.425
b14	-761862	6203.518	- 6454.53	5.1	0.383
b15	-157284	- 2008.85	9804.82	-0.45	1.42

b23	2652617	- 3497.19	- 3129.24	2.32	1.64
b24	-1759191	5182.61	- 17311.9	10.41	1.91
b25	-432898	- 2168.22	17289.7	-0.95	5.941
b34	1264355	9318.57	- 8133.94	9.1	-0.69
b35	-414396	- 1801.49	17715.86	-3.7	3.28
b45	-185362	- 8004.69	- 6033.16	- 5.25	1.308
R^2	0.966	0.961	0.995	0.995	0.86

Les modèles obtenus pour les réponses de sortie en fonction des variables d'entrées sont montrées par les équations (4.12) – (4.16) et présentés par les figures correspondantes :

$$\bar{E}E = y_1(x_i) \tag{4.12}$$

$$\bar{S}N_{DG} = ((0.024831879684384 * y_2(x_i)) + 1)^2 \tag{4.13}$$

$$\bar{O}T_{DG} = (9.8101010353976e - 3 * y_3(x_i) + 1))^2 \tag{4.14}$$

$$\bar{R}_a = y_4(x_i) \tag{4.15}$$

$$\bar{L}PSP = y_5(x_i) \tag{4.16}$$

Avec $i = 1,2,3,4,5$

Validation des résultats de modélisation par plan d'expériences

Afin de valider les méta-modèles nous avons procédé à une étude comparative entre les modèles obtenus par le simulateur dynamique du SMS et les méta-modèles obtenus par PE. Pour cela nous avons simulé toute la base d'expériences et représenté les résultats comparatifs dans les figures présentées ci-dessous.

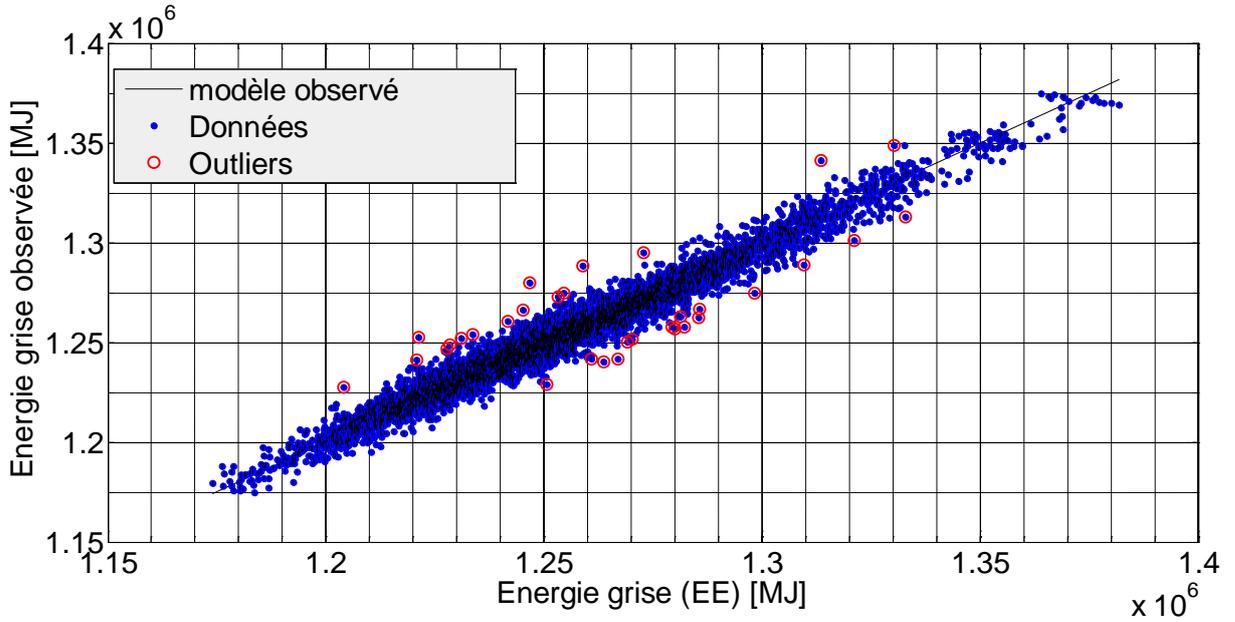


Figure 4.5 : La fonction observée de l'énergie grise avec $R^2=0.966$.

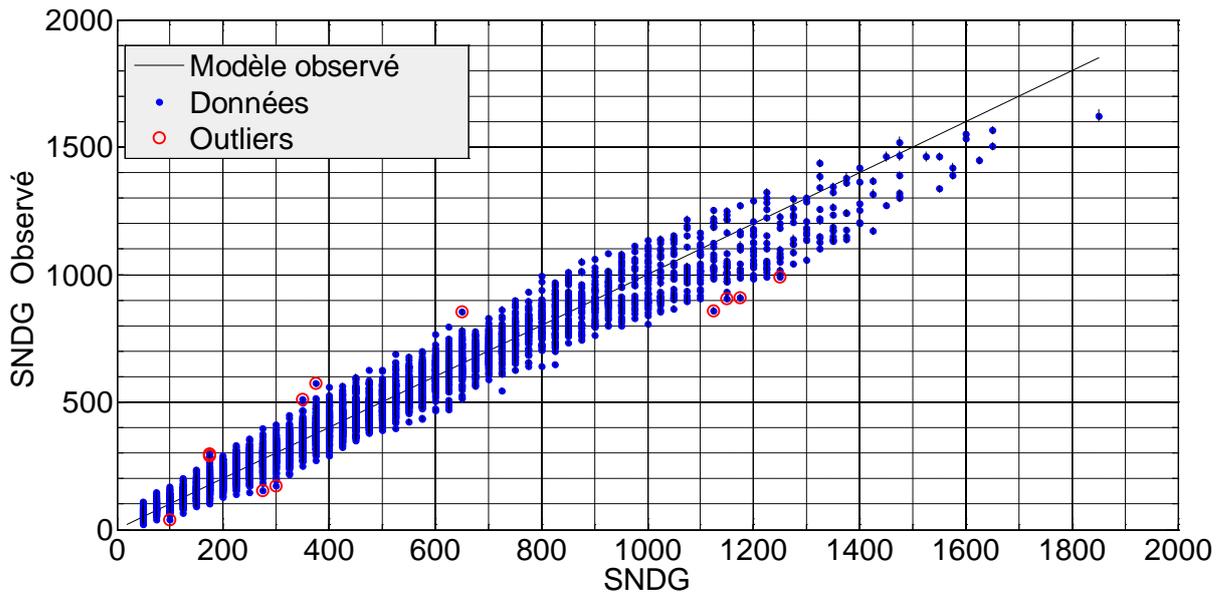


Figure 4.6 : La fonction observée de nombre de démarrages avec $R^2=0.961$.

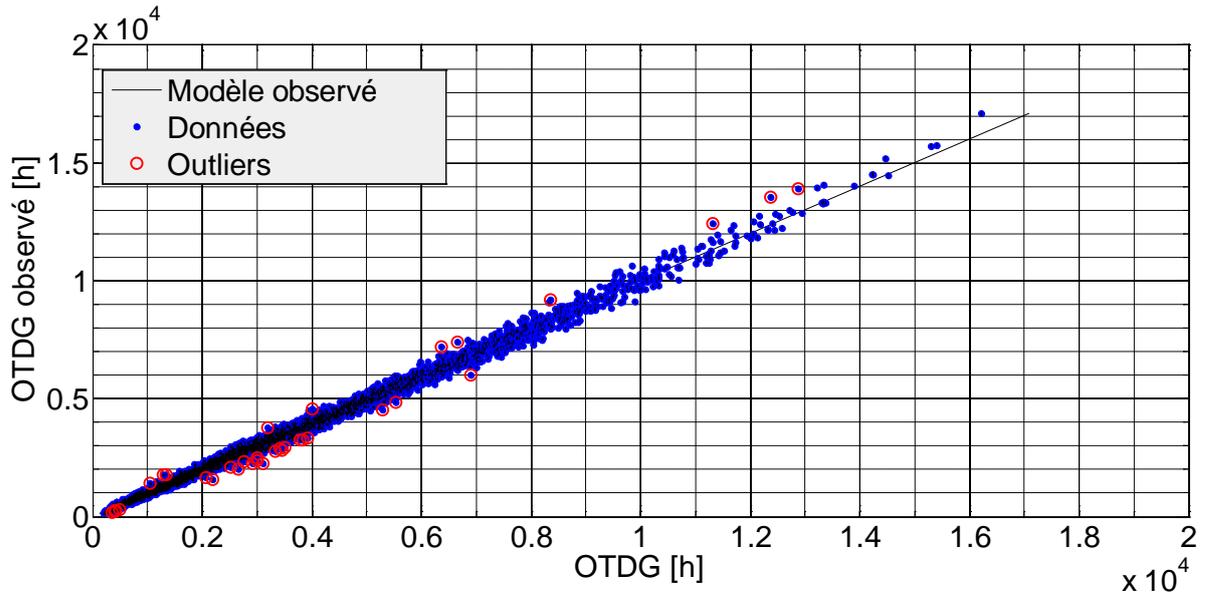


Figure 4.7 : La fonction observée pour le temps de fonctionnement du GD avec $R^2=0.995$

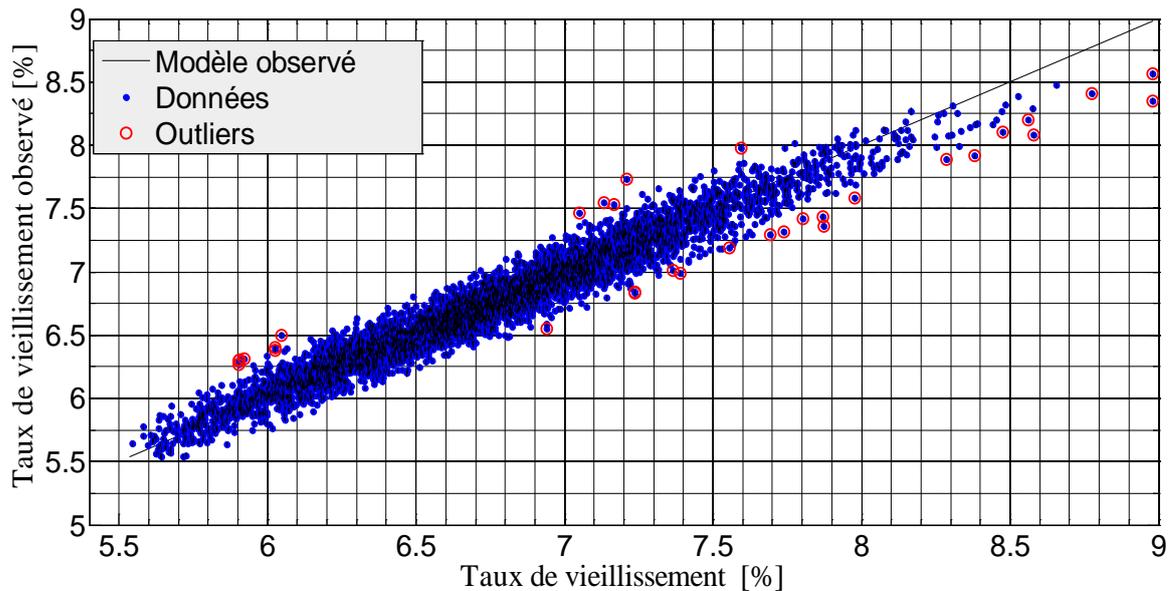


Figure 4.8 : La fonction observée du taux de vieillissement R_a de batterie avec $R^2=0.995$.

D'après la **Figure 4.4**, la **Figure 4.5**, la **Figure 4.6** et **Figure 4.7** il est montré que les modèles prédits pour toutes les fonctions (EE , SN_{DG} , OT_{DG} et R_a) modélisent avec une bonne précision les nuages d'expériences.

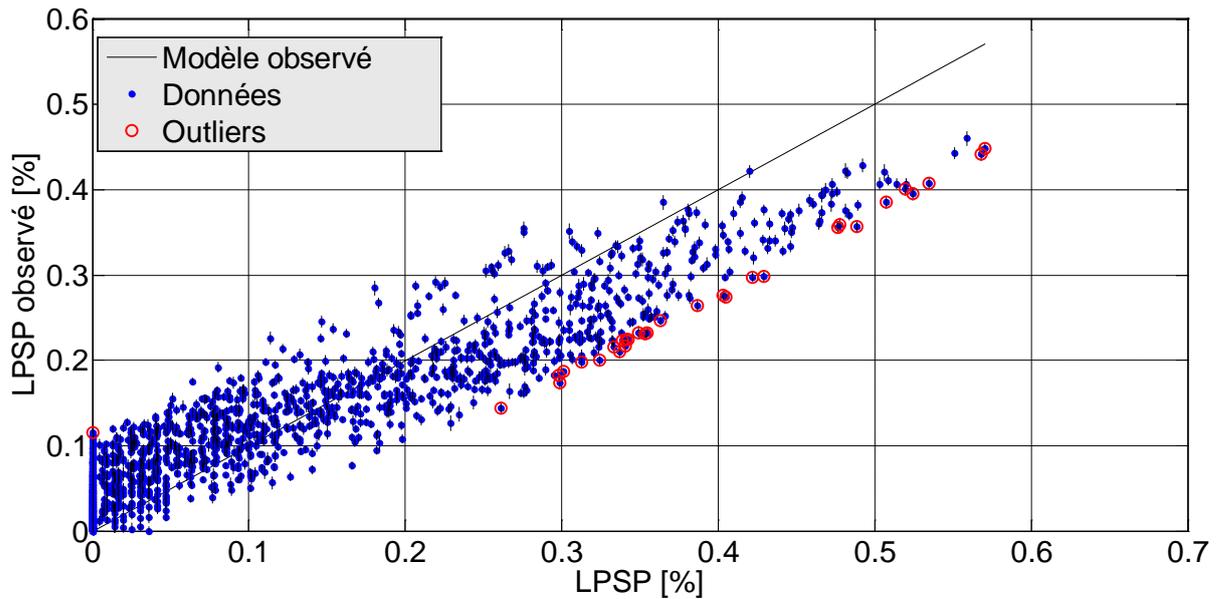


Figure 4.9 : La fonction observée de la fonction LPSP avec $R^2=0.86$.

Dans le cas du modèle du paramètre de satisfaction LPSP, le modèle prédit est bien représentatif quand les valeurs du LPSP sont inférieures ou égales à 0.3%. Pour le dimensionnement, cet intervalle est plus intéressant. En effet, la valeur du LPSP doit être nulle pour assurer une bonne satisfaction au profil de charge.

Les variations des réponses mesurées et observées par plan d'expériences en fonction des expériences sont données respectivement par la **Figure 4.10**, la **Figure 4.11**, la **Figure 4.12**, **Figure 4.13** et la **Figure 4.14**. A partir de l'ensemble de ces figures on constate que les données exprimées par l'espace expérimental représentent bien les expériences initiales engendrées par le SD.

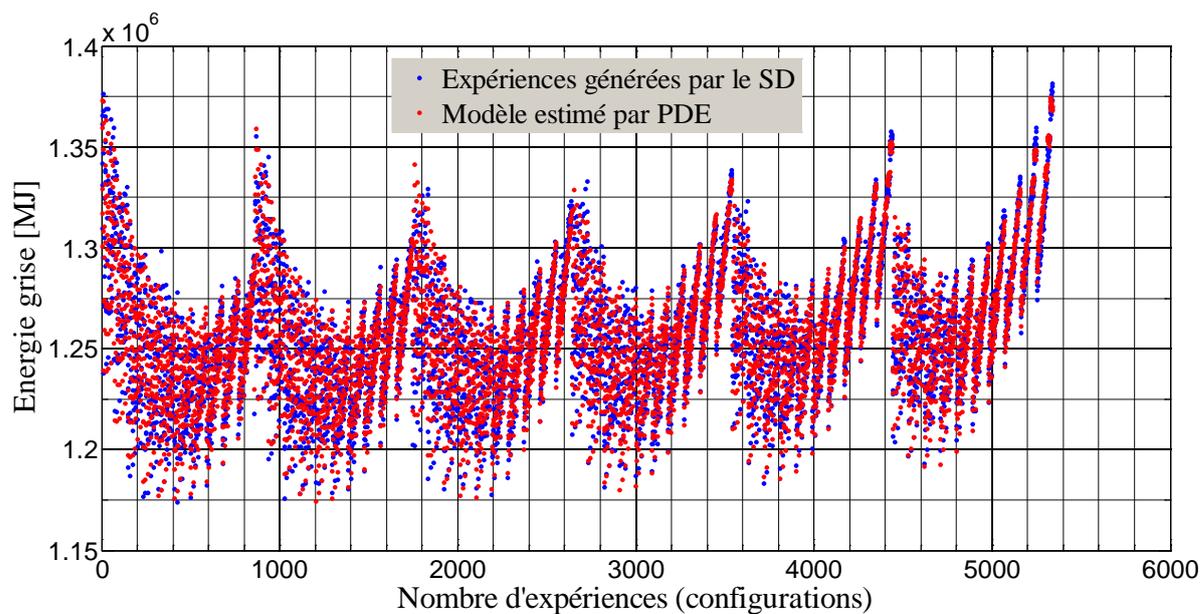


Figure 4. 10 : Les expériences générées par le SD et celle générées par PE.

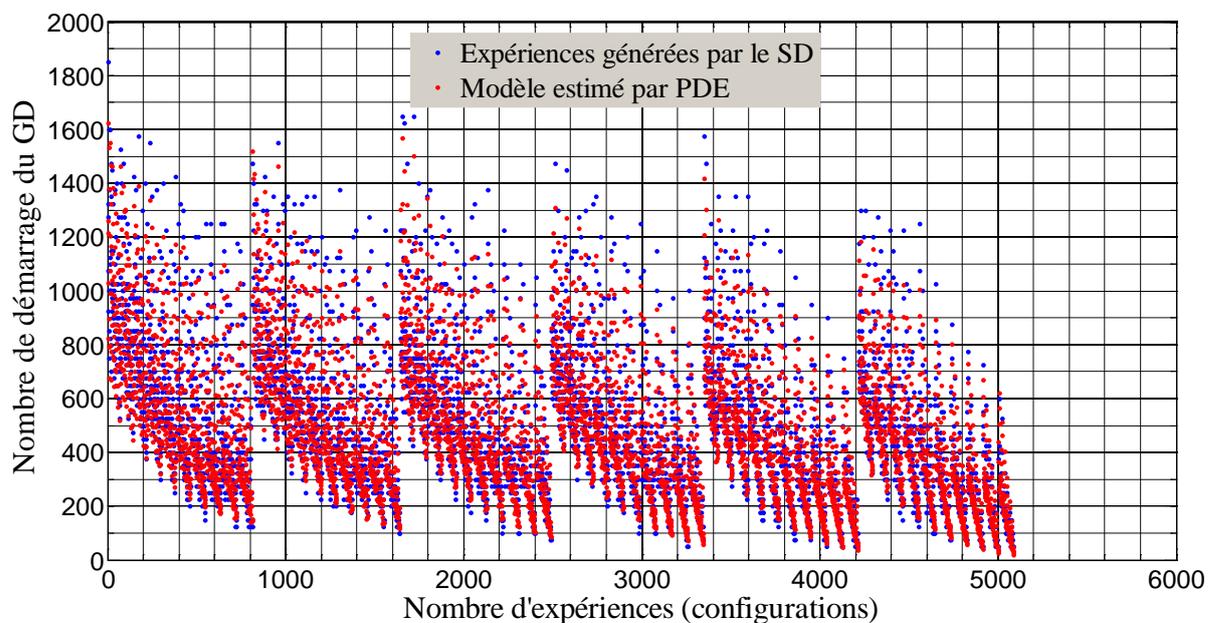


Figure 4. 11 : Les expériences générées par le SD et celle générées par PE.

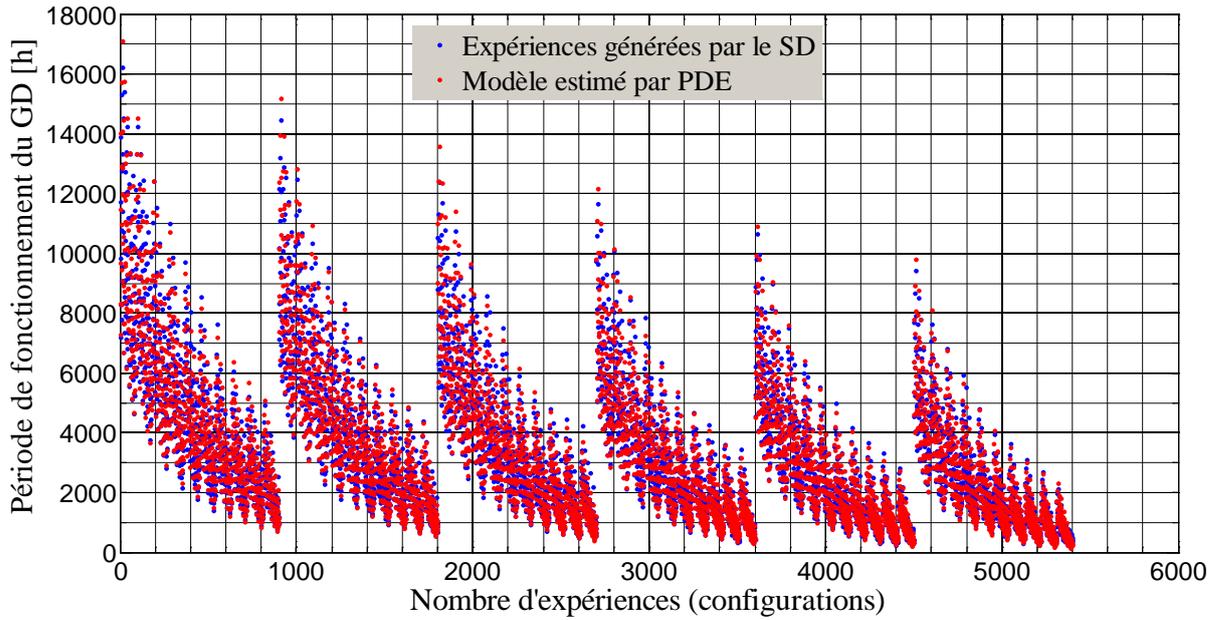


Figure 4. 12 : Les expériences générées par le SD et celle générées par PE.

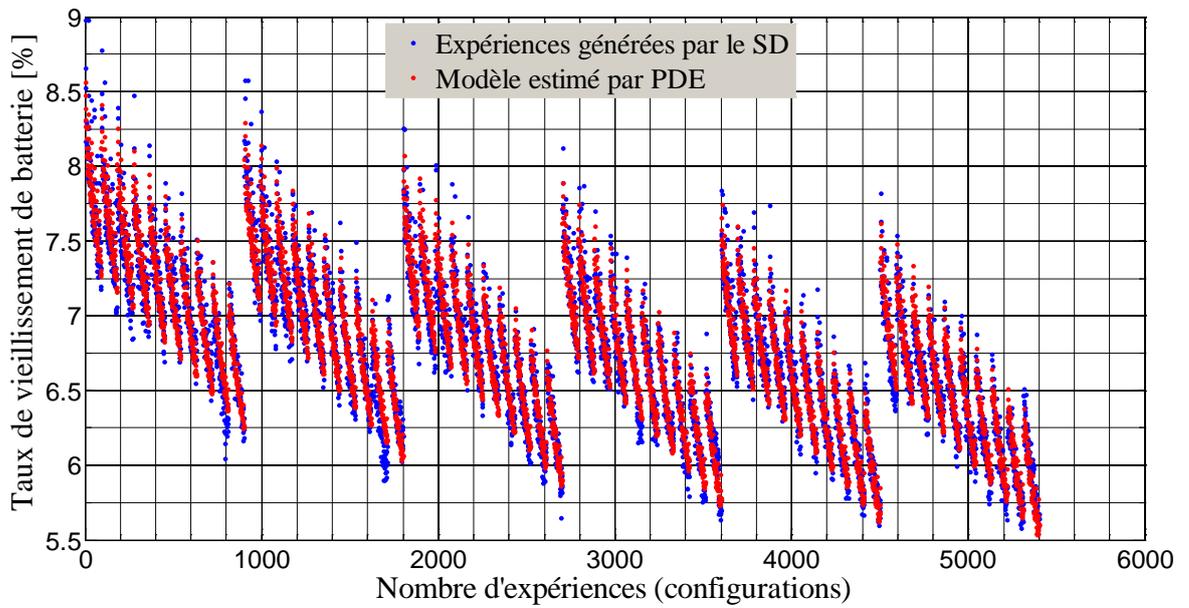


Figure 4. 13 : Les expériences générées par le SD et celle générées par PE.

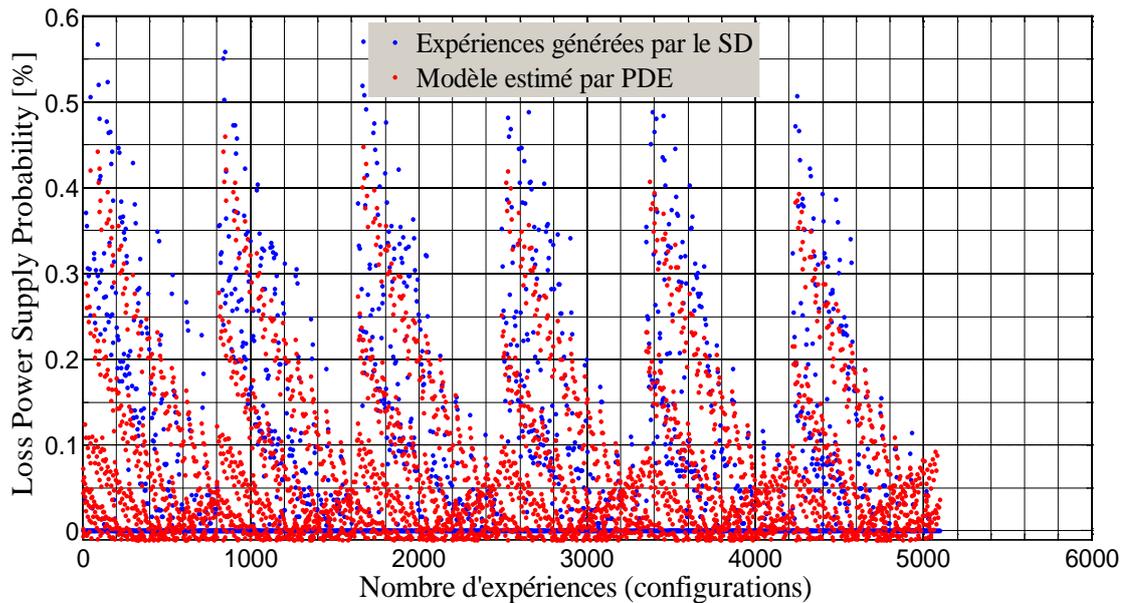


Figure 4. 14 : Les expériences générées par le SD et celle générées par PE.

Les figures des expériences montrent encore une fois l'efficacité des méta-modèles par rapport aux modèles de référence.

4.4 Conclusion

Dans le présent chapitre l'approche statistique du plan d'expérience a été appliquée pour l'optimisation de la modélisation du SMS (PV/WT/DG+ Batterie). Le principe de l'application de la méthode est fondé premièrement sur l'utilisation du SD du SMS. Le rôle du SD est la génération des expériences ou des configurations pour la modélisation. Chaque expérience représente une exécution du simulateur pour des données mesurées sur un an avec un pas de mesure égal à trente minutes. Une fois la base de données générée, la méthode du plan d'expérience est utilisée pour identifier les facteurs de conception des méta-modèles. Après la représentation des données sur des plans expérimentaux, des méta-modèles pour les fonctions ou les réponses de sortie seront développés. Pour l'amélioration des qualités des modèles obtenus, la transformation de Cox-Box a été appliquée sur les tous les facteurs des fonctions. Les modèles obtenus par la méthode du PE représentent avec précision le SMS. L'optimisation du dimensionnement en utilisant les méta-modèles sera détaillée dans le cinquième chapitre.

DIMENSIONNEMENT ET OPTIMISATION DES
SYSTEMES MULTI-SOURCES

5.1 Introduction

L'optimisation des systèmes d'électrification représente une phase primordiale pour obtenir des configurations optimales et bien adaptées aux sites isolés. Pour les systèmes multi-sources qui comportent des sources renouvelables et des sources fossiles avec systèmes de stockage, plusieurs points nécessitent l'optimisation.

- *L'optimisation du coût de développement du système d'électrification* : Dans ce point, les tailles ou les dimensions des générateurs d'énergie doivent être identifiées sous des contraintes liées au profil de charge, et sous des contraintes liées aux données météorologiques caractérisant le site isolé.
- *L'optimisation de fonctionnement du système d'électrification* : Une technique pour la gestion d'énergie est déterminée pour optimiser le fonctionnement des sources fossiles et systèmes de stockage. La gestion de fonctionnement des systèmes est un moyen pour augmenter la durée de vie du générateur diesel par exemple et la longévité des batteries de stockage. En effet, la limitation de la consommation du carburant permet de minimiser le coût du kilowattheure d'un côté et réduire les émissions à effet de serre d'un autre côté.

L'objectif principal de ce chapitre concerne l'exploitation des méta-modèles obtenus par la méthode du plan d'expérience afin d'optimiser le SMS.

Par cette optimisation, nous allons traiter l'optimisation du dimensionnement et l'optimisation du fonctionnement des systèmes multi-sources (PV/WT/DG + Batterie). La configuration optimale du SMS obtenue par l'optimisation doit être valable sur une durée de fonctionnement égale à 25 ans.

Alors, avant d'aborder l'optimisation du SMS il est essentiel de présenter les méthodes d'optimisation les plus connues, et ensuite l'algorithme choisi pour l'optimisation du SMS (PV/WT/DG+batterie). Ce chapitre se terminera par l'application de l'algorithme d'optimisation choisi pour optimiser le SMS.

5.2 Classification des méthodes d'optimisation

Le choix de la méthode d'optimisation pour la résolution d'un problème bien défini est une étape très importante. En effet, l'obtention d'une solution d'optimisation optimale est strictement liée à la compatibilité existante entre la méthode choisie pour l'optimisation et la nature du problème à résoudre. Les problèmes à résoudre sont obtenus généralement à partir des systèmes d'équations ou des systèmes de traitement numérique des données (par ordinateur). Les systèmes d'équations peuvent être des systèmes continus ou discrets, des systèmes statiques ou

dynamiques, des systèmes déterministes ou stochastiques. Ainsi, devant ces différents types de systèmes, la méthode utilisée pour l'optimisation est sélectionnée en fonction du type du problème. Suivant la littérature, les méthodes (ou les algorithmes) d'optimisation sont subdivisées en deux grandes classes différentes : la classe des méthodes déterministes et la classe des méthodes stochastiques. Dans chaque classe on distingue différents types d'algorithmes ou méthode d'optimisation comme il est présenté dans la **Figure 5.1**.



Figure 5.1 : Classification des méthodes d'optimisation

5.2.1 Les algorithmes d'optimisation déterministes

Dans ces méthodes d'optimisation nous distinguons les méthodes d'optimisation **locales** et les méthodes d'optimisation **globales**. L'optimisation par les méthodes locales permet de trouver un ou plusieurs optimums locaux après la recherche. Par contre les méthodes d'optimisation globales ont la capacité de déterminer l'optimum global d'une fonction objectif. Les méthodes d'optimisation déterministe n'utilisent aucun principe stochastique pour la recherche des solutions.

Suivant la **Figure 5.1**, les méthodes déterministes peuvent être subdivisées en plusieurs méthodes : les méthodes énumératives, les méthodes linéaires, les méthodes non linéaires et les méthodes de Line Search.

Dans la première famille des méthodes d'optimisation on distingue les **méthodes exactes**. Ces méthodes d'optimisation sont utilisées pour obtenir des solutions exactes ou optimales non approchées durant un temps de calcul raisonnable. Les méthodes énumératives (Branch & Band, Branch & Cut et la programmation dynamique) sont des méthodes appartenant aux méthodes d'optimisation exactes. En plus, on peut ajouter à la famille des méthodes exactes les méthodes linéaires (méthodes de simplexe de Dantzig).

Pour la résolution des problèmes d'optimisation non linéaire il existe plusieurs types d'algorithmes. Ces algorithmes peuvent être fondés sur le principe de gradient ou non.

Les **méthodes de gradients** sont parmi les méthodes les plus anciennes. Ces méthodes sont nommées par cette nomination car elles sont basées sur l'utilisation du gradient pendant la recherche. Ainsi, la fonction à optimiser par la méthode de gradient doit être dérivable et continue. Ceci signifie que la connaissance de la dérivée de la fonction à chaque point dans l'espace de recherche est nécessaire. Ces méthodes d'optimisation exigent la définition d'un point initial pour démarrer la recherche. Ces méthodes d'optimisation sont utilisées généralement pour la résolution des problèmes non linéaires [VGa11]. Parmi les méthodes de la même famille les plus utilisées pour la résolution des problèmes non linéaires nous citons : méthode de gradient, méthode de gradient conjugué, méthode de Fletcher et Reeves, méthode de quasi Newton et Nelder-Mead.

5.2.2 *Les algorithmes d'optimisation stochastiques*

Les algorithmes stochastiques ce sont des algorithmes d'optimisation qui ne nécessitent pas de connaître le gradient de la fonction à optimiser. Ce type d'algorithmes est caractérisé par un processus aléatoire pour la création de l'espace de recherche. La plupart des algorithmes stochastiques utilisent le principe de génération des populations pour optimiser un problème. Parmi les méthodes d'optimisation stochastiques les plus couramment connues nous citons : la famille des méta heuristiques, la famille des algorithmes évolutionnaires et la famille des essaims. Dans le cadre de notre étude on s'intéressera à la famille des algorithmes évolutionnaire et plus particulièrement les algorithmes génétiques.

5.3 L'algorithme choisi pour l'optimisation du SMS

Le choix de l'algorithme d'optimisation du dimensionnement sera effectué en fonction de la nature du problème à optimiser. Alors, pour sélectionner l'algorithme d'optimisation le plus adapté à la résolution de notre problématique il est important d'évaluer le type du problème lié au SMS. Après la détermination des modèles traduisant le comportement fonctionnel du système multi-sources nous pouvons connaître la nature du problème d'optimisation.

Ainsi, d'après les modèles (ou les méta-modèles) obtenus par la méthode du plan d'expériences, il semble que le problème d'optimisation est de type non linéaire avec contraintes. Ces méta-modèles sont conçus à partir d'un traitement numérique réalisé par un ordinateur et en utilisant la méthode statistique du plan d'expériences.

Dans le cas d'optimisation du dimensionnement à l'aide de l'optimisation mono-objectif, la fonction objectif utilisée est une fonction non linéaire. Les contraintes d'égalité et d'inégalité utilisées sont aussi des fonctions non linéaires. Donc, devant ce comportement non linéaire du système multi-sources, l'algorithme d'optimisation choisi est basé sur la technique de recherche par le maillage adaptatif directe avec les algorithmes Génétiques (Mesh Adaptive Direct Search & GA, MADSGA). Cet algorithme d'optimisation permet d'hybrider entre les algorithmes d'optimisation déterministes et les algorithmes stochastiques. Cette hybridation offre de meilleures performances pour les algorithmes d'optimisation. En effet, chaque famille possède des avantages et des inconvénients. La description de l'algorithme choisi est détaillée dans la sous-section suivante :

5.3.1 Description de l'algorithme d'optimisation hybride MADSGA

L'algorithme d'optimisation MADSGA est une hybridation entre deux algorithmes d'optimisation différents, l'algorithme de recherche adaptatif directe (MADS) et les algorithmes génétiques (GA). Cette hybridation a pour objectif d'améliorer les performances de l'algorithme d'optimisation MADS. Avant de présenter l'algorithme hybride MADSGA, il est nécessaire de présenter l'origine de l'algorithme MADS.

Suivant l'ensemble des travaux de recherche présentés dans la littérature, l'algorithme MADS représente une extension de l'algorithme généralisé de recherche par motifs (Generalized Pattern Search Algorithm) [CAu08]. Ce type d'algorithme est classifié dans la famille des algorithmes de recherche directs pour l'optimisation des fonctions non lisses et non linéaire avec et sans contraintes. Cet algorithme est généralement utilisé pour l'optimisation des fonctions discontinues avec contraintes, les fonctions de types boîte noire (black-box) et aussi les fonctions continues. Le principe d'optimisation par les algorithmes directs est fondé sur la technique de

maillage. Ainsi, l'espace de recherche où se trouve l'optimum de la fonction doit être subdivisé en un ensemble de cadre ou rectangles. Le nombre de rectangles varie en fonction du nombre d'itérations exécutées par l'algorithme. Pour obtenir l'optimum global de la fonction, le maillage réalisé par l'algorithme doit être dense. L'intersection de deux lignes différentes représente un point centre pour évaluer la fonction objectif dans des directions différentes par rapport à ce point de démarrage.

La recherche par l'algorithme GPS utilise des vecteurs de direction fixe, par contre l'algorithme MADS utilise une sélection aléatoire de vecteurs dans l'espace.

Un avantage clé de MADS par rapport à l'algorithme GPS est que l'exploration locale de l'espace des variables ne se limite pas à un nombre fini de directions (directions de sondage, poll directions). Ceci représente l'inconvénient majeur de l'algorithme GPS, et donc la principale motivation dans l'utilisation de MADS pour résoudre ce problème.

L'algorithme d'optimisation MADS est un algorithme de recherche itératif. Alors, l'algorithme va commencer par un point d'initialisation. Dans cette étape, l'algorithme nécessite la définition d'un point initial $x_0 \in \Omega$ pour démarrer sa recherche. Ce point initial rassemble toutes les variables de décision qui doivent appartenir à l'espace de recherche Ω . Ainsi, l'évaluation de la fonction objectif à optimiser se réalise dans l'espace d'exploration Ω .

Dans l'étape suivante, l'algorithme va chercher un point de maillage amélioré. Dans cette étape, deux types de recherche seront réalisés à chaque itération k : une recherche globale et une sonde locale (*local poll*). La recherche locale est obligatoire car elle permet à l'algorithme d'effectuer l'évaluation de la fonction objectif sur l'ensemble des points définis par le maillage.

La recherche globale représente une option facultative pour l'évaluation de la fonction objectif.

Les directions réalisées pendant la recherche sont définies par D avec $D = GZ$, $G \in \mathbb{R}^{n \times n}$ représente une matrice non singulière, $Z \in \mathbb{Z}^{n \times p}$ et $D_k = \{d_k^1, d_k^2, \dots, d_k^p\} \in D$.

A chaque itération k , le treillis (en anglais s'appelle *mesh*) est défini comme l'union suivante :

$$M_k = \bigcup_{x \in S_k} \{x + \Delta_k^m Dz : z \in \mathbb{N}^D\} \tag{5.1}$$

Avec $\Delta_k^m \in \mathbb{R}_+$ représente le paramètre de taille de treillis.

Un treillis (ou maillage) M_k représente une discrétisation dans l'espace réel \mathbb{R}^n . Avec S_k est l'ensemble des points où la fonction objectif f avait été évaluée par le début de l'itération k .

Le maillage est défini comme une union d'ensembles sur S_k . Définir le maillage de cette façon assure que tous les points visités précédemment se trouvent sur le maillage, et que de nouveaux points de test peuvent être sélectionnés autour de l'un d'eux.

L'ensemble des points de recherche locale (ou sonde local) est donné par la formule suivante :

$$P_k = \{x_k + \Delta_k^m d : d \in D_k\} \subset M_k \tag{5.2}$$

Avec

D_k doit être défini comme un ensemble générateur positif tel que $0 \notin D_k$, d peut être écrit comme une combinaison entier positif de la direction dans D : $D = Du$ pour un vecteur u , $u \in N^{n_{D_k}}$ qui peut dépendre du nombre d'itérations k .

La distance entre le centre du cadre x_k et un point du cadre $x_k + \Delta_k^m d \in P_k$ est bornée par un multiple du paramètre de sondage Δ_k^p :

$$\Delta_k^m \|d\| \leq \Delta_k^p \max\{\|d^l\| : d^l \in D\} \tag{5.3}$$

Les limites normalisées de l'ensemble D_k sont des ensembles générateurs positifs. La mise à jour des paramètres de l'algorithme est réalisée selon l'équation (5.4).

$$\Delta_{k+1}^m = \tau^{w_k} \Delta_k^m \tag{5.4}$$

Avec τ est un nombre rationnel fixe et le nombre entier w défini comme suit :

$$w_k \in \begin{cases} [0, 1, \dots, w^+] & \text{si un point de maillage amélioré est trouvé} \\ [w^-, w^- + 1, \dots, -1] & \text{ailleurs} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Delta_k^m \leq \Delta_k^p \text{ pour tout } k \\ \lim_{k \in K} \Delta_k^m = 0 \Leftrightarrow \lim_{k \in K} \Delta_k^p = 0 \text{ pour tout ensemble infini d'indices } K \end{cases}$$

Le principe d'optimisation par l'algorithme MADS est donné par l'algorithme 1 suivant:

Algorithme 1 : principe de l'algorithme MADS

Début

- **Initialisation** : soit $x_0 \in \Omega$, $\Delta_0^m \leq \Delta_0^p$, G, Z, τ, ω^- et ω^+ satisfaire aux exigences, régler le compteur d'itération k à 0.
- **Etape de Recherche et de sondage (research and poll)** : Effectuer la recherche et éventuellement le sondage (ou seulement une partie d'entre eux) jusqu'à ce qu'une amélioration du point de maillage x_{k+1} se trouve sur le maillage M_k .
 - *Recherche optionnelle : Évaluer f_Ω sur un sous-ensemble fini de points d'essai sur le maillage M_k .
 - *sondage local : Evaluer f_Ω sur le cadre P_k .
- **Mise à jour des paramètres** : mettre à jour Δ_{k+1}^m et Δ_{k+1}^p , augmenter k par $k+1$ puis revenir à l'étape de recherche et de sondage.

Fin

L'exemple donné à la **Figure 5.2** montre les cadres et les directions générés par l'algorithme MADS. Dans cet exemple des valeurs de paramètre Δ_k^m et Δ_k^p .

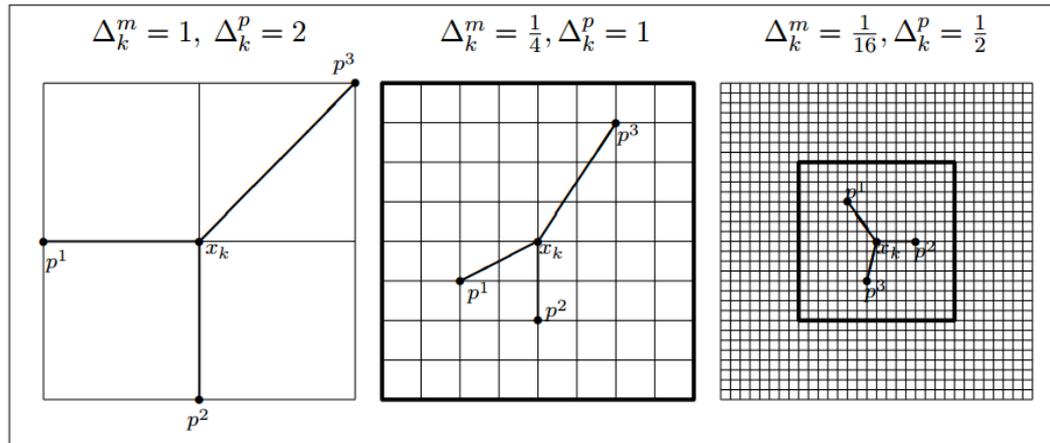


Figure 5.2 : Exemple de cadres dans MADS $P_k = \{p^1, p^2, p^3\}$.

Pour améliorer certaines performances pour l'algorithme PS et MADS, une hybridation avec les algorithmes génétiques a été effectuée [Pva11]. Il est montré que l'algorithme MADSGA est plus performant que l'algorithme PSGA. Ainsi, l'utilisation des algorithmes évolutionnaires (GA) avec l'algorithme MADS permet d'améliorer la fonction objectif d'une part et de minimiser le temps de calcul d'autre part. Donc, cet algorithme hybride MADSGA sera plus adapté à la résolution du problème d'optimisation dans les systèmes multi-sources.

5.4 Optimisation du dimensionnement du SMS

La détermination de la configuration optimale pour le système multi-sources représente l'objectif principal de ce dernier chapitre. Cette configuration optimale permet de définir les paramètres du système qui minimisent le coût de l'installation d'une part, et optimisent le fonctionnement de l'installation d'autre part.

Selon la problématique définie dans le premier chapitre, le coût global de l'installation sera évalué par l'énergie grise des systèmes énergétiques.

L'optimisation du fonctionnement de l'installation est strictement dépendante de la gestion du générateur diesel par rapport au banc de stockage et le profil de charge. En effet, le vieillissement ou la durée de vie du générateur diesel est en relation directe avec plusieurs paramètres qui sont : le nombre de démarrages ((ON/OFF)/2), l'intervalle ou la bande de fonctionnement et la période de fonctionnement. Concernant le banc de stockage, le vieillissement sera lié au nombre de cycles de charge-décharge par rapport à la profondeur utilisée.

Ainsi, dans cette section deux types d'optimisation seront abordés, l'optimisation du dimensionnement et l'optimisation du fonctionnement du générateur diesel et de la batterie de stockage.

Les variables d'entrée et les variables de sortie étudiées précédemment pour les systèmes multi-sources sont nécessaires pour réaliser l'optimisation. Le nombre de variables sera suffisant à la détermination d'une configuration optimale sur une durée de fonctionnement égale à 25 ans. Après l'obtention du modèle mathématique traduisant le comportement dynamique du système multi-sources, nous pouvons réaliser l'optimisation (optimisation de dimensionnement et de fonctionnement) du système. Le principe de l'optimisation globale du système multi-sources sera fondé sur les principaux points suivants :

1. Définir l'objectif de l'optimisation en connaissant la fonction (ou les fonctions) objectif à optimiser;
2. Identifier les variables d'optimisation liées au système multi-sources et identifier les limites de variation des variables de décision ;
3. Connaître l'espace d'optimisation par rapport au système multi-sources;
4. Définir les contraintes de l'optimisation ;
5. Choix de l'algorithme d'optimisation.

5.4.1 Définition de la fonction objectif et les variables de décision

L'optimisation de dimensionnement du SMS est réalisée en fonction de l'objectif désiré. Ainsi, on peut déterminer une configuration optimale pour le SMS par l'application de l'optimisation mono-objectif ou l'optimisation multi-objectif. L'optimisation multi-objectif (ou multicritères) permet d'optimiser le système par l'obtention de compromis entre deux ou trois fonctions objectifs. Dans l'optique de cette étude, nous allons commencer par l'application de l'optimisation mono-objectif.

Dans le cas d'optimisation mono-objectif, la fonction objectif à optimiser représente la fonction qui mesure l'énergie grise (Embodied Energy) du système multi-sources. L'énergie grise du système global est définie par la somme des énergies grises (ou intrinsèques) de toutes les sources d'énergie.

Ainsi, d'après les méta-modèles obtenus par la méthode du plan d'expériences dans le quatrième chapitre, on peut définir la fonction de coût du SMS. Cette fonction permet de traduire le comportement du SMS vis-à-vis de l'énergie grise consommée pendant un cycle de vie égale à 25 ans. La répartition de l'énergie grise (EE) sur les différentes sources d'énergie est représentée comme suit :

- Pour la source renouvelable solaire, l'énergie grise EE varie en fonction de la surface A_{pv} [m²] du panneau solaire ;
- Pour la source renouvelable éolienne l'énergie EE varie en fonction de la surface balayée par le rotor de la turbine éolienne A_{wt} [m²] ;
- L'énergie grise de la batterie est liée directement à la capacité de la batterie C_n [Ah];
- Pour le générateur diesel l'énergie grise représente la somme de l'énergie de fabrication et l'énergie consommée par le carburant.

Le modèle mathématique de la fonction objectif \bar{EE} en termes d'énergie grise est donné par l'équation suivante :

$$\begin{aligned} \bar{EE} = & 65465092.2942 - 10284163.6149 * (\log_{10}(A_{pv})) - 26831988.6904 * \\ & (\log_{10}(A_{wt})) - 19945554.6144 * (\log_{10}(A_h)) + 11552231.9947 * \\ & (\log_{10}(SOCdMax)) + 2498554.04573 * (\log_{10}(FuelDG)) + 801318.40475 * \\ & (\log_{10}(A_{pv}))^2 + 2132232.92989 * (\log_{10}(A_{pv})) * (\log_{10}(A_{wt})) + 1159415.39154 * \\ & (\log_{10}(A_{pv})) * (\log_{10}(A_h)) - 761862.538347 * (\log_{10}(A_{pv})) * (\log_{10}(SOCdMax)) - \\ & 157284.119135 * (\log_{10}(A_{pv})) * (\log_{10}(FuelDG)) + 3724788.72093 * \\ & (\log_{10}(A_{wt}))^2 + 2652616.72116 * (\log_{10}(A_{wt})) * (\log_{10}(A_h)) - 1759190.528 * \\ & (\log_{10}(A_{wt})) * (\log_{10}(SOCdMax)) - 432898.332012 * (\log_{10}(A_{wt})) * \\ & (\log_{10}(FuelDG)) + 1998592.59792 * (\log_{10}(A_h))^2 - 1264355.17314 * \\ & (\log_{10}(A_h)) * (\log_{10}(SOCdMax)) - 414396.214723 * (\log_{10}(A_h)) * \\ & (\log_{10}(FuelDG)) - 459804.042671 * (\log_{10}(SOCdMax))^2 + 185361.717895 * \\ & (\log_{10}(SOCdMax)) * (\log_{10}(FuelDG)) - 53486.8494435 * (\log_{10}(FuelDG))^2 \quad (5.5) \end{aligned}$$

A partir de la fonction objectif présentée à l'équation (5.5), nous allons définir le vecteur de variables de décision ou d'optimisation comme suit :

$$V_D = [x_1 = A_{pv}, x_2 = A_{wt}, x_3 = C_n, x_4 = SOCd_{Max}, x_5 = P_{DG}]$$

Dans l'équation (5.5) on a utilisé la cinquième variable comme le fuel consommé par le générateur diesel. Cependant, dans le vecteur V_D nous avons utilisé la variable de puissance P_{DG} , puisque ces deux variables sont liées par l'équation non linéaire présentée dans le deuxième chapitre.

L'intervalle de variation de chaque variable est résumé dans la **Table 5.1** suivante :

Table 5.1 : Borne inférieure et supérieure pour les variables de décision

Variable	A_{pv} [m ²]	A_{wt} [m ²]	C_n [Ah]	$SOCd_{Max}$ [%]	P_{DG} [kw]
$x_{i,min}$	35	130	3500	36	2.54
$x_{i,max}$	60	220	4500	46	6

Avec $x_{i,min}$ et $x_{i,max}$ représente respectivement la borne inférieure et la borne supérieure de chaque variable.

5.4.2 Définition des contraintes d'optimisation

L'utilisation des contraintes pour l'optimisation du dimensionnement du SMS joue un rôle très important. En effet, l'objectif principal du SMS dans un site isolé est la satisfaction des besoins énergétiques sans coupure pendant une durée de fonctionnement bien définie. Ainsi, l'obtention d'une configuration optimale convenable aux conditions de conception et de demande exige plusieurs contraintes. Ces contraintes permettent d'obtenir un système multi-sources suivant des objectifs de développement différents. Ainsi, les contraintes étudiées peuvent être liées à des paramètres différents : des contraintes de conception et des contraintes de dimensionnement :

5.4.2.1 Contraintes liées au coût de conception

Le paramètre de coût est un paramètre primordial pour la conception des systèmes multi-sources. Deux types de coûts peuvent être utilisés pour mesurer le coût de conception global des SMS, un coût basé sur une valeur donnée en \$ ou un coût basé sur une valeur énergétique (sous forme d'énergie grise). Par rapport aux sources renouvelables, le coût du SMS augmente avec l'augmentation de la surface des panneaux solaire A_{pv} et/ou la surface balayée par le rotor de la turbine éolienne. Le générateur diesel a une influence directe sur le coût du SMS lorsque son utilisation n'est pas bien dimensionnée. Ainsi, le coût global pour la conception du SMS représente le coût de fabrication et le coût de fonctionnement ou de maintenance de toutes les sources d'énergie utilisées. Donc, les contraintes du SMS liées au coût de conception sont données comme suit :

$$\left. \begin{aligned} A_{pv} &\leq A_{pv,max} \\ A_{wt} &\leq A_{wt,max} \\ C_n &\leq C_{n,max} \\ P_{DG} &\leq P_{DG,max} \\ SOCd_{Max} &\leq SOCd_{Max,max} \end{aligned} \right\} \quad (5.6)$$

$$R_a \leq R_{a,max} \quad (5.7)$$

Avec

L'équation qui estime le taux de vieillissement du banc de stockage est donnée comme suit :

$$\begin{aligned} \bar{R}_a = & 350.6497 - 35.68284 * (\log_{10}(A_{pv})) - 8.7575 * (\log_{10}(A_{wt})) - 105.645 * \\ & (\log_{10}(A_h)) - 115.947 * (\log_{10}(SOCd_{Max})) + 24.95592 * (\log_{10}(Fuel_{DG})) + \\ & 3.924189 * (\log_{10}(A_{pv}))^2 + 2.020746 * (\log_{10}(A_{pv})) * (\log_{10}(A_{wt})) + 1.82372 * \\ & (\log_{10}(A_{pv})) * (\log_{10}(A_h)) + 5.098779 * (\log_{10}(A_{pv})) * (\log_{10}(SOCd_{Max})) - \\ & 0.4467115 * (\log_{10}(A_{pv})) * (\log_{10}(Fuel_{DG})) - 5.510093 * (\log_{10}(A_{wt}))^2 + \\ & 2.322482 * (\log_{10}(A_{wt})) * (\log_{10}(A_h)) + 10.40786 * (\log_{10}(A_{wt})) * \\ & (\log_{10}(SOCd_{Max})) - 0.9541552 * (\log_{10}(A_{wt})) * (\log_{10}(Fuel_{DG})) + 10.61397 * \\ & (\log_{10}(A_h))^2 + 9.092419 * (\log_{10}(A_h)) * (\log_{10}(SOCd_{Max})) - 3.706256 * \end{aligned}$$

$$(\log_{10}(Ah)) * (\log_{10}(FuelDG)) + 15.49898 * (\log_{10}(SOCdMax))^2 - 5.246893 * (\log_{10}(SOCdMax)) * (\log_{10}(FuelDG)) + 1.831068 * (\log_{10}(FuelDG))^2 \quad (5.8)$$

$R_{a,max}$: représente le seuil maximal de taux de vieillissement sur une durée de 25 ans avec un seul de changement de la batterie. L'équation d'inégalité de nombre de démarrage du générateur diesel est donnée par l'équation suivante :

$$SN_{DG} \leq SN_{DG,max} \quad (5.9)$$

Avec

$$SN_{DG} = \left(\left((0.024831879684384) * \left(-196768.2623 + 250271.2067 * (\log_{10}(Awt)) + 9357.326731 * (\log_{10}(Apv)) + 73675.99537 * (\log_{10}(Ah)) - 139859.0125 * (\log_{10}(SOCdMax)) + 28192.26087 * (\log_{10}(FuelDG)) - 114501.1548 * (\log_{10}(Awt))^2 + 722.3682507 * (\log_{10}(Awt)) * (\log_{10}(Apv)) - 3487.006316 * (\log_{10}(Awt)) * (\log_{10}(Ah)) + 5156.407361 * (\log_{10}(Awt)) * (\log_{10}(SOCdMax)) - 2166.339296 * (\log_{10}(Awt)) * (\log_{10}(FuelDG)) - 1591.8675 * (\log_{10}(Apv))^2 - 4700.015958 * (\log_{10}(Apv)) * (\log_{10}(Ah)) + 6216.849678 * (\log_{10}(Apv)) * (\log_{10}(SOCdMax)) - 2013.137492 * (\log_{10}(Apv)) * (\log_{10}(FuelDG)) - 10584.55791 * (\log_{10}(Ah))^2 + 9341.848502 * (\log_{10}(Ah)) * (\log_{10}(SOCdMax)) - 1812.248272 * (\log_{10}(Ah)) * (\log_{10}(FuelDG)) + 25127.30104 * (\log_{10}(SOCdMax))^2 - 8012.606761 * (\log_{10}(SOCdMax)) * (\log_{10}(FuelDG)) + 214.1609415 * (\log_{10}(FuelDG))^2 + 17483.70647 * (\log_{10}(Awt))^3 + 1 \right)^2 \right) \quad (5.10)$$

Où

$SN_{DG,max}$: représente le nombre maximal de démarrage pour une durée de vie de 25 ans et sans changement du diesel.

5.4.2.2 Contraintes liées à la charge

Ce type de contrainte signifie la fiabilité d'électrification du SMS vis-à-vis du profil de charge. L'indice de fiabilité du système est mesuré par le paramètre de satisfaction LPSP (Loss Power Supply Probability). Ainsi, ce paramètre de satisfaction permet d'évaluer les performances d'autonomie du SMS (PV/WT/GD + Batterie) sur toute la période de fonctionnement. Pour les contraintes de dimensionnement, la fonction de fiabilité LPSP doit être égale à zéro. La contrainte de satisfaction de la charge est donnée par l'équation suivante :

$$LPSP = 0 \quad (5.11)$$

Où

$$\begin{aligned} LPSP = & 59.698 - 5.81656 * (\log_{10}(Apv)) - 18.829 * (\log_{10}(Awt)) - 17.5392 * \\ & (\log_{10}(Ah)) - 1.15235 * (\log_{10}(SOCdMax)) - 29.9437 * (\log_{10}(FuelDG)) + \\ & 0.158469 * (\log_{10}(Apv))^2 + 1.3498 * (\log_{10}(Apv)) * (\log_{10}(Awt)) + 0.420634 * \\ & (\log_{10}(Apv)) * (\log_{10}(Ah)) + 0.382657 * (\log_{10}(Apv)) * (\log_{10}(SOCdMax)) + \\ & 1.41989 * (\log_{10}(Apv)) * (\log_{10}(FuelDG)) + 1.58514 * (\log_{10}(Awt))^2 + 1.63952 * \\ & (\log_{10}(Awt)) * (\log_{10}(Ah)) + 1.90993 * (\log_{10}(Awt)) * (\log_{10}(SOCdMax)) + \\ & 5.94345 * (\log_{10}(Awt)) * (\log_{10}(FuelDG)) + 1.94429 * (\log_{10}(Ah))^2 - 0.68995 * \\ & (\log_{10}(Ah)) * (\log_{10}(SOCdMax)) + 3.27572 * (\log_{10}(Ah)) * (\log_{10}(FuelDG)) - \\ & 0.43348 * (\log_{10}(SOCdMax))^2 + 1.30663 * (\log_{10}(SOCdMax)) * (\log_{10}(FuelDG)) + \\ & 2.21338 * (\log_{10}(FuelDG))^2 \end{aligned} \quad (5.12)$$

Une fois la fonction objectif définie et les contraintes de dimensionnement connues nous allons appliquer l'algorithme d'optimisation présenté précédemment pour déterminer la configuration optimale du SMS (PV/WT/DG+Batterie). La configuration obtenue permet de minimiser le coût de développement du système et d'optimiser son fonctionnement.

5.4.3 Formulation du problème d'optimisation mono-objectif

La formulation du problème d'optimisation signifie la présentation du problème sous forme d'un problème mathématique général. Dans le cas général, un problème d'optimisation (P) avec contraintes peut s'écrire selon la forme suivante :

$$\left. \begin{aligned} & \text{Min}(f_1(X), f_2(X), \dots, f_n(X)) \\ & g_k(X) \leq 0 \\ & h_m(X) = 0 \\ & X_L \leq X \leq X_h \\ & X = [x_1, x_2, \dots, x_i] \end{aligned} \right\} (P) \quad (5.13)$$

Avec

f_n : représentent les fonctions objectifs à optimiser ; on appelle l'optimisation une optimisation multi-objectif si le nombre de fonctions à optimiser est égale à deux ou plus. Ce type d'optimisation s'appelle généralement l'optimisation multicritères qui est basée généralement sur la détermination de compromis entre les fonctions.

g_k et h_m : représentent les contraintes qui sont respectivement des fonctions d'inégalité de dimension k et des fonctions d'égalité de dimension m .

X : Vecteur comportant les variables de décision. Chaque variable est bornée par une borne supérieure nommée X_h et une borne inférieure nommée X_L .

5.4.4 Application de l'algorithme MADS pour l'optimisation mono objectif du SMS

Dans le cas d'optimisation mono-objectif, la formulation du problème d'optimisation avec les contraintes non linéaires est donnée par le système d'équations (5.14) [TML15a].

$$\left. \begin{array}{l} \text{Min}(\overline{EE}(x_i)) \\ \overline{R}_a(x_i) \leq R_{a,Max} \\ \overline{SN}_{DG}(x_i) \leq SN_{DG,Max} \\ \overline{LPSP}(x_i) = 0 \\ x_{i,min} \leq x_i \leq x_{i,max} \\ i=1,2,3,4,5 \end{array} \right\} \quad (5.14)$$

Où

$\overline{EE}(x_i)$: est la fonction objectif à optimiser qui représente la fonction de coût en termes d'énergie grise. Cette fonction varie en fonction de toutes les variables de dimensionnement. La nature de cette fonction est non linéaire continue et dérivable.

$\overline{R}_a(x)$ et $\overline{SN}_{DG}(x_i)$ représentent des fonctions de contraintes d'inégalité non linéaires; $\overline{LPSP}(x)$ représente la fonction de contrainte d'égalité non linéaire.

x_i sont les variables de décision (paramètres du système multi-sources $X = [A_{pv}, A_{wt}, C_n, SOCd_{max}, P_{DG}]$ et $x_{i,min}$, $x_{i,max}$ sont respectivement les bornes inférieures et supérieures pour les variables de décision. Ces bornes de variables sont données par le système d'équations (5.15).

$$\left. \begin{array}{l} A_{pv,min} \leq A_{pv} \leq A_{pv,max} \\ A_{wt,min} \leq A_{wt} \leq A_{wt,max} \\ C_{n,min} \leq C_n \leq C_{n,max} \\ SOCd_{max,min} \leq SOCd_{max} \leq SOCd_{max,max} \\ P_{DG,min} \leq P_{DG} \leq P_{DG,max} \end{array} \right\} \quad (5.15)$$

Les bornes de variation des variables d'optimisation permettent de définir les limites de variation des réponses des fonctions de sortie du SMS. Ces limites sont nécessaires pour connaître l'espace d'optimisation ou d'exploration. La détermination des valeurs des bornes pour chaque variable d'optimisation a été réalisée dans le quatrième chapitre de façon à satisfaire les besoins énergétiques de la charge.

Dans le contexte de notre étude, le choix des seuils pour chaque fonction de contrainte est effectué afin de satisfaire les points suivants :

- Satisfaire les besoins en énergie du site isolé ($LPSP(x) = 0$);

- Réduire le nombre de démarrage du GD pour minimiser son taux de vieillissement ($SN_{DG}(x) \leq 600$) ;
- Reduire le nombre de remplacement du banc de batterie sur 25 ans ($R_a(x) \leq 8\%$).

Afin d'évaluer l'influence des contraintes sur le dimensionnement optimal du SMS nous allons appliquer l'algorithme d'optimisation sous des contraintes pour des valeurs différentes. Cependant, dans tous les essais d'optimisation nous allons modifier la valeur de contrainte liée au nombre de démarrage du GDSN_{DG}. Par la modification de cette contrainte plusieurs configurations optimales peuvent être obtenues. Chaque configuration sera caractérisée par un vecteur de variables et un coût de conception propre. Les valeurs correspondants au nombre de démarrage associées à la contrainte d'inégalité $SN_{DG}(x)$ sont : $SN_{DG}(x) \leq 800$, $SN_{DG}(x) \leq 600$ et $SN_{DG}(x) \leq 400$.

Concernant la contrainte liée au nombre de remplacement de la batterie nous avons considéré un seul remplacement pendant une durée de fonctionnement égale à 25 ans. Donc, pour satisfaire cette condition le taux de vieillissement de la batterie $R_a(x)$ doit être inférieur ou égale à 8% par an. La contrainte d'égalité $LPSP(x)$ correspond à une valeur nulle.

L'implémentation de l'algorithme d'optimisation MADSGA a été réalisée en utilisant l'environnement de programmation Matlab-Simulink. Suivant la complexité du problème d'optimisation à résoudre, le processeur utilisé pour le calcul doit être très performant. En effet, la fonction objectif EE et les contraintes du SMS sont des fonctions polynômiales non linéaires avec un nombre de variables égale à cinq. Les caractéristiques de l'unité centrale de calcul sont données comme suit :

- Processeur AMD FX(tm)-8150 Eight-Core de vitesse 3.61 GHz
- Mémoire RAM égale 24 Go

Les performances de l'unité de traitement choisie permettent de réaliser des opérations de traitement et de calcul de façon parallèle. Le traitement parallèle des données est parmi les points qui accélèrent le temps d'exécution. En effet, l'algorithme d'optimisation MADSGA nécessite une haute performance pour évaluer parallèlement la fonction objectif.

Pour démarrer l'algorithme d'optimisation MADSGA il est nécessaire de fixer les paramètres d'optimisation résumés dans la [Table 5.2](#) :

Table 5. 2 : Paramètres d'optimisation de l'algorithme d'optimisation

Paramètre	Valeur
Maximum d'évaluations	10^5
Maximum d'itérations	10^2
Fonction de tolérance	1e-006
Tolérance de Variable	1e-006
Tolérance de contrainte	1e-006
Tolérance de la taille de maillage	1e-006

Selon le principe de l'algorithme d'optimisation, la recherche de l'optimum global de la fonction s'effectue par l'évaluation de la fonction objectif sur des points différents, en utilisant la méthode de division de l'espace de recherche. A l'itération initiale, l'algorithme doit commencer par un point initial défini dans l'espace d'exploration. Ce point initial possède des coordonnées définies par les variables de la fonction à optimiser. Pour avoir une solution proche de la solution optimale nous allons proposer un passage par plusieurs points initiaux.

Donc, dans un premier temps, nous allons générer 10 points initiaux entre la valeur max et min de chaque variable. On appelle une configuration initiale toute configuration définie pour un point initial. Ainsi, à partir de toute configuration initiale l'algorithme va travailler sur l'évaluation de la fonction objectif en procédant plusieurs itérations. La meilleure configuration obtenue sera retenue comme un deuxième point initial pour le calcul suivant. A la fin du calcul et en utilisant tous les points initiaux, on va choisir la meilleure solution.

Les points initiaux pris en considération sont données dans la [Table 5.3](#). La [Figure 5.3](#) montre le principe d'utilisation des points initiaux [TML15a].

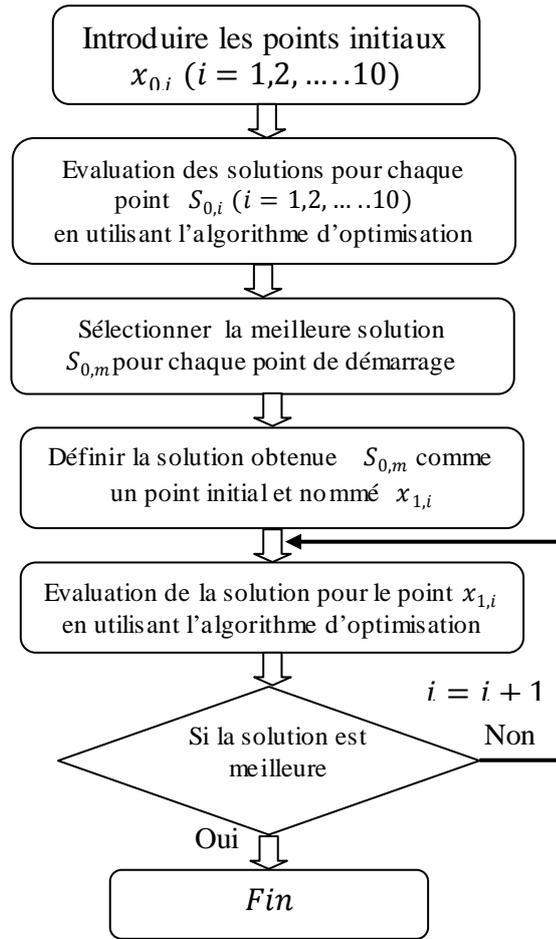


Figure 5.3 : principe de sélection du point initial pour l'algorithme d'optimisation.

Table 5.3 : Points initiaux utilisés par l'algorithme d'optimisation

	Variable					
	$A_{pv} [m^2]$	$A_{wt} [m^2]$	$C_n [Ah]$	$Fuel_{DG} [L/h]$	$SOCd_{max} [%]$	$EE [MJ]$
$x_{0,1}$	35.0	130.0	3500.0	0.6	0.6	1.2472e6
$x_{0,2}$	37.78	140.0	3611.11	0.6	0.69	1.2256e6
$x_{0,3}$	40.56	150.0	3722.22	0.69	0.77	1.2157e6
$x_{0,4}$	43.336	160.0	3833.33	0.77	0.87	1.2176e6
$x_{0,5}$	46.11	170.0	3944.44	0.87	0.96	1.2276e6
$x_{0,6}$	48.89	180.0	4055.55	0.96	1.04	1.2448e6
$x_{0,7}$	51.67	190.0	4166.66	1.04	1.13	1.2685e6
$x_{0,8}$	54.44	200.0	4277.77	1.13	1.22	1.2977e6
$x_{0,9}$	57.22	210.0	4388.88	1.22	1.31	1.3314e6
$x_{0,10}$	60.0	220.0	4500.0	1.31	1.4	1.3691e6
$x_{1,1}$	38.23	196.06	3618.75	1.4	0.97	1.218430 e6
$x_{1,2}$	41.86	185.62	3785.12	0.97	0.99	1.221447 e6
$x_{1,3}$	44.25	184.02	3582.48	0.99	1.02	1.218655 e6
$x_{1,4}$	38.87	185.12	3714.34	1.02	1.02	1.218424 e6
$x_{1,5}$	39.47	191.00	3660.87	1.02	0.99	1.219287 e6
$x_{1,6}$	42.195	183.9	3699.01	0.99	1.02	1.218399 e6
$x_{1,7}$	44.47	188.97	3660.62	1.02	0.97	1.218911 e6
$x_{1,8}$	42.53	181.38	3766.19	0.97	1.02	1.219357 e6
$x_{1,9}$	35.17	196.52	3868.85	1.02	0.94	1.219814 e6
$x_{1,10}$	38.49	193.94	3782.98	0.94	0.95	1.218394 e6

Les points présentés dans la **Table 5.3** sont générés de la manière suivante :

Premièrement à l'aide de la **Table 5.1** qui présente la borne inférieure et la borne supérieure de chaque variable, nous avons généré les dix points initiaux de l'indice $x_{0,i}$ avec $i = 1, \dots, 10$. Nous avons choisi le nombre de points égal 10 afin de réduire le temps de calcul. Ensuite, les points générés seront utilisés comme des points de départ par l'algorithme d'optimisations MADSGA. Ainsi, l'algorithme doit utiliser tous les points pour générer des solutions. L'algorithme va commencer par le point $x_{0,1}$ pour trouver la solution $s_{0,1}$ puis le point $x_{0,2}$ pour trouver la solution $s_{0,2}$ et ainsi de suite jusqu'à l'obtention de la solution $s_{0,10}$. Les solutions ou les configurations obtenues seront sélectionnées comme des points de démarrage aussi pour la détermination des autres solutions. En fin, la configuration optimale du SMS représente la meilleure solution obtenue en utilisant les points de l'indice $x_{1,i}$ avec $i = 1, \dots, 10$. Cette technique d'optimisation a été appliquée sur la fonction objectif EE pour un nombre de démarrage $SN_{DG} \leq 400, SN_{DG} \leq 600$ et $SN_{DG} \leq 800$.

La configuration optimale obtenue par l'optimisation mono-objectif sous contraintes pour chaque valeur du nombre de démarrage est donnée dans la **Table 5.4**.

Table 5.4 : Résultats d'optimisation pour des valeurs différentes de SN_{DG} .

Paramètre	$SN_{DG} \leq 800$	$SN_{DG} \leq 600$	$SN_{DG} \leq 400$
$A_{pv} [m^2]$	38.17	41.42	40
$A_{wt} [m^2]$	139.93	189.91	192.81
$C_n [Ah]$	3781	3816.66	3914
$SOCd_{Max} [\%]$	36.1	37.98	41
$P_{DG} [kW]$	4.02	4.0	3.80
$OT_{DG} [h]$	2742	2754	2907
$LPSP [\%]$	0	0	0
$R_a [\%]$	6.9799	6.8195	6.70

A partir de ces résultats d'optimisation, on peut conclure que la fonction de coût EE varie en fonction de la variation de la contrainte SN_{DG} . D'après les essais d'optimisation pour les trois valeurs du nombre de démarrage SN_{DG} , on observe que la fonction de l'énergie grise EE augmente quand le nombre de démarrage diminue. Ce qui entraîne une augmentation dans le temps de fonctionnement du générateur diesel et de la taille de la batterie.

Ainsi, la contrainte présentée par le nombre de démarrage du GD permet de modifier le dimensionnement du système multi-sources. La modification du nombre de démarrage pour le générateur diesel est un moyen pour influencer sur sa durée de vie. En effet, pendant la phase de démarrage, le générateur perd un grand pourcentage de sa durée de vie.

Chaque configuration propose des surfaces pour les générateurs renouvelables bien définies, une valeur de puissance pour le GD et une capacité pour le banc de batteries.

A partir de la table des solutions obtenues pour un nombre de démarrage différent on observe une variation dans la fonction de coût EE comme le montre la **Figure 5.7**. Chaque variable est représentée par sa valeur pondérée qui est obtenue en divisant sa valeur par la valeur du seuil max autorisé.

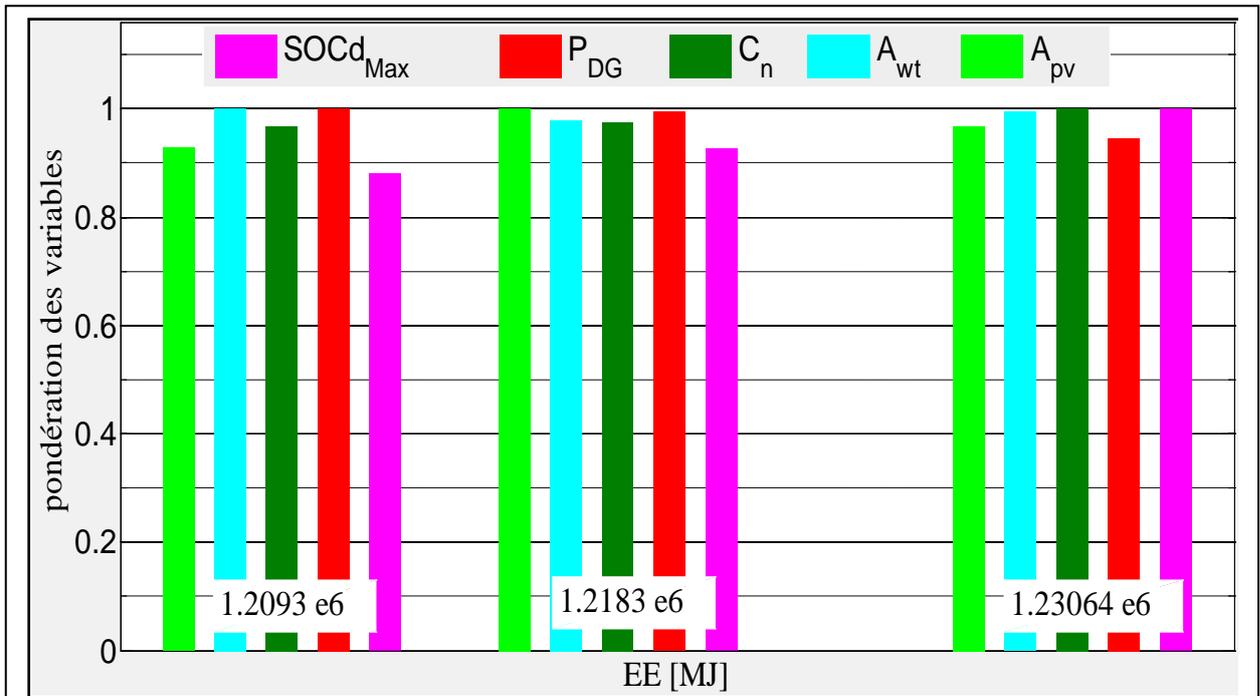


Figure 5.4 : Solutions d’optimisation de dimensionnement obtenues pour un nombre de démarrage $SN_{DG} \leq 800, SN_{DG} \leq 600$ et $SN_{DG} \leq 400$.

La détermination de la solution optimale par l’algorithme d’optimisation permet de fixer les valeurs optimales des variables de conception ainsi que celles des variables de contraintes. Par conséquent, il suffit de remplacer ces valeurs optimales dans le simulateur dynamique présenté dans le chapitre 3 pour pouvoir simuler l’évolution des différentes puissances délivrées par les sources. Ainsi, Les instants de fonctionnement du GD pendant un an par rapport à l’état de batterie SOC(t) en utilisant les paramètres des trois solutions obtenues sont illustrés par la **Figures 5.5**, la **Figure 5.6** et la **Figure 5.7**.

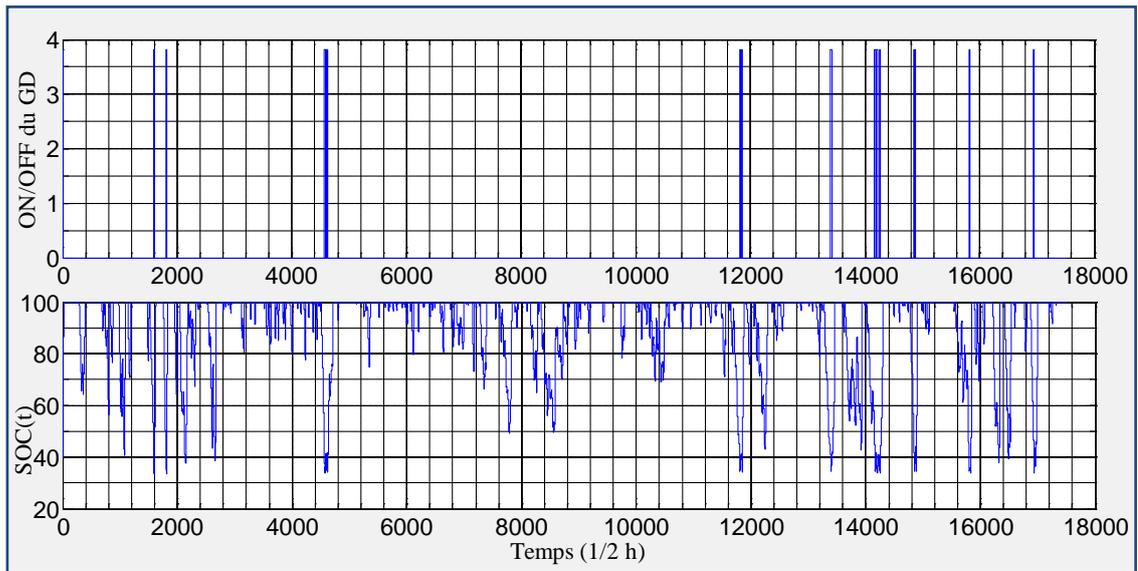


Figure 5. 5 : Evolution du nombre de démarrage du GD et l'état de charge du banc de batteries pour $SNDG \leq 400$.

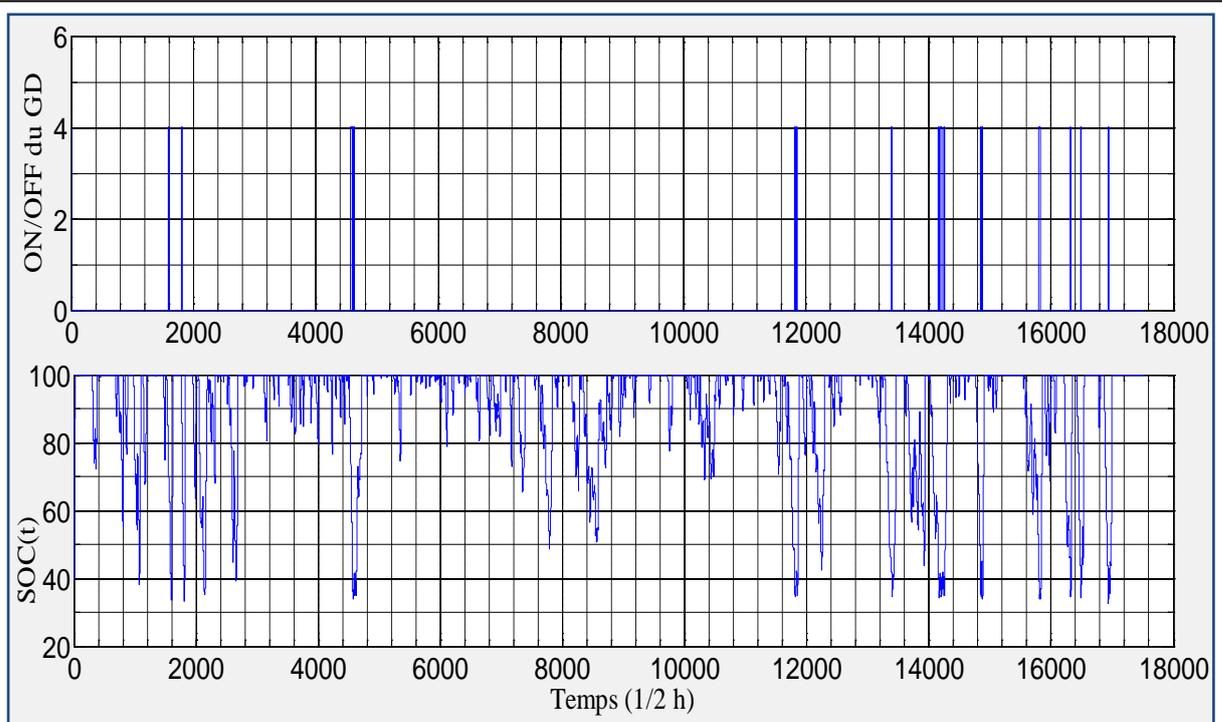
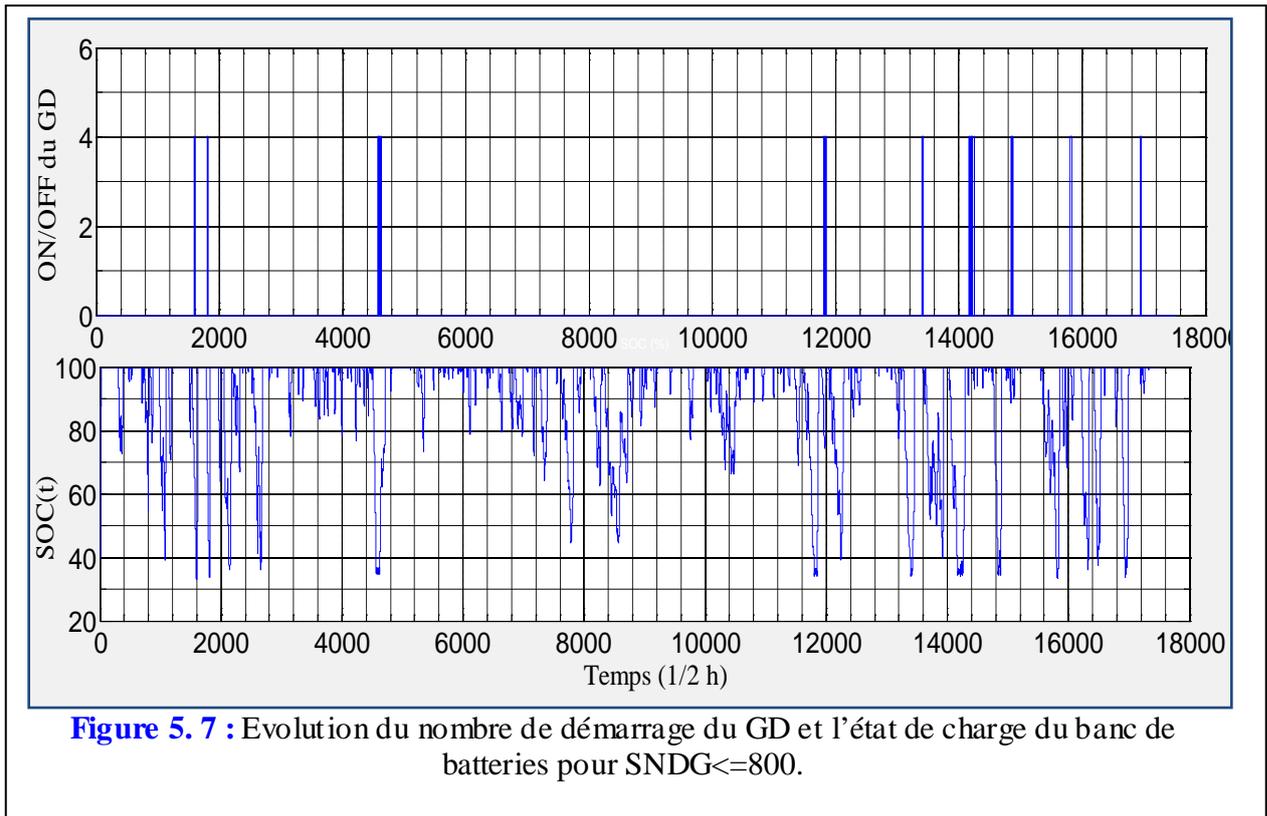
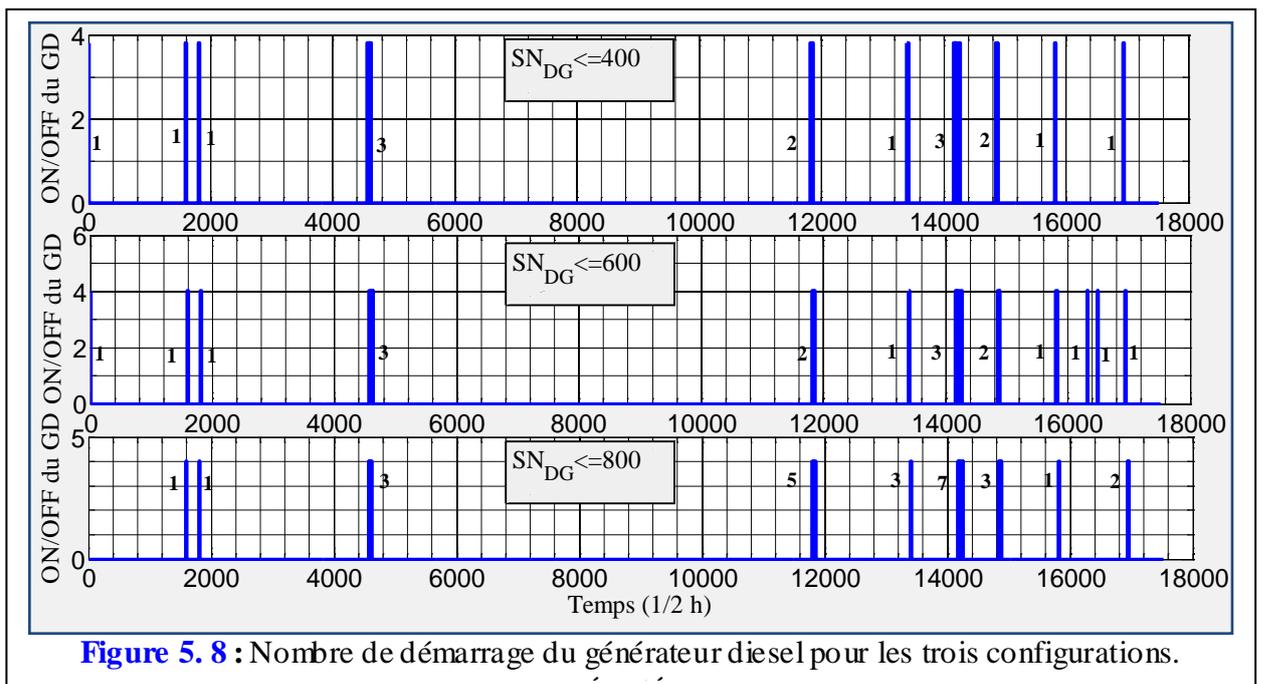


Figure 5. 6 : Evolution du nombre de démarrage du GD et l'état de charge du banc de batteries pour $SNDG \leq 600$.



Afin d'évaluer l'influence des paramètres de conception sur les solutions ou sur les réponses du SMS, nous allons présenter sur la même figure l'évolution du générateur diesel en fonction du temps pour les trois solutions ($SN_{DG} \leq 400, SN_{DG} \leq 600$ et $SN_{DG} \leq 800$). Pour chaque solution ou configuration on remarque un mode de fonctionnement différent comme le montre la **Figure 5.8**.



Pour un profil de charge sur une période de 25 ans, le fonctionnement du générateur diesel présenté à la **Figure 5.8** sera répété 25 fois. D'après cette figure on constate que, chaque configuration est caractérisé par un nombre de démarrage ((nombre de marche + nombre d'arrêt)/2) propre. Pour présenter clairement les points de différence des configurations par rapport aux instants de commutation du GD et sa durée de fonctionnement, plusieurs zooms seront présentés. La **Figure 5.9**, la **Figure 5.10**, la **Figure 5.11**, la **Figure 5.12**, la **Figure 5.13** et la **Figure 5.14** représentent ces zooms.

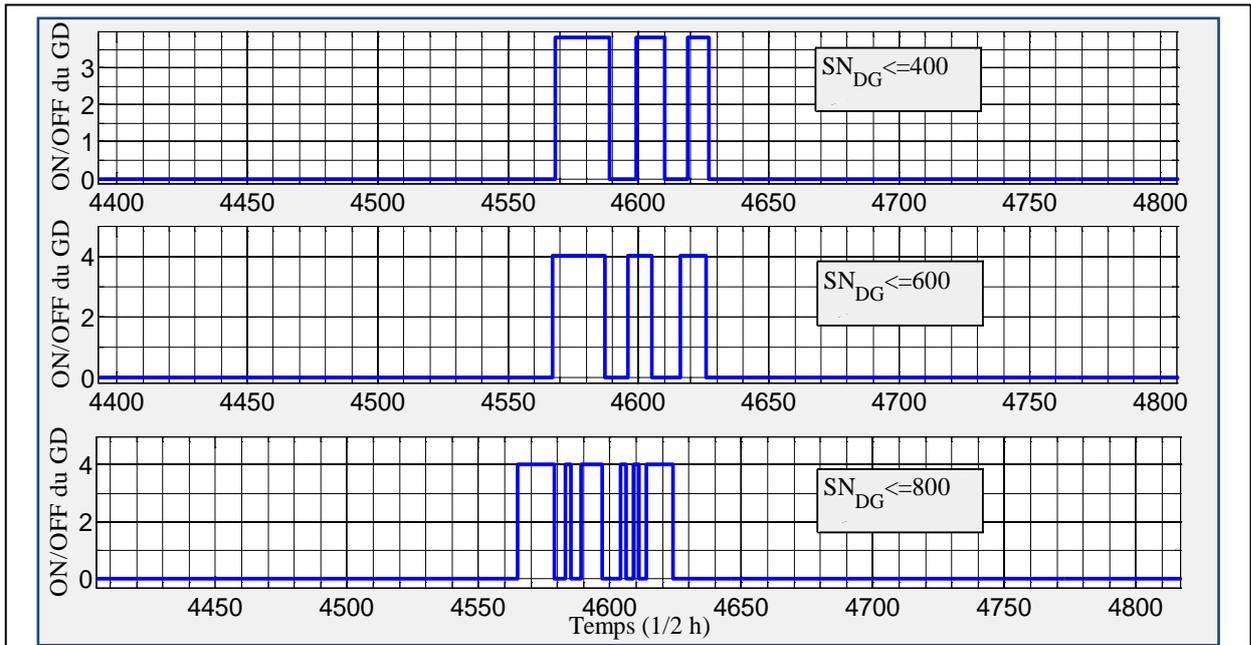


Figure 5.9 : Zoom 1 représente les instants de commutation du générateur diesel.

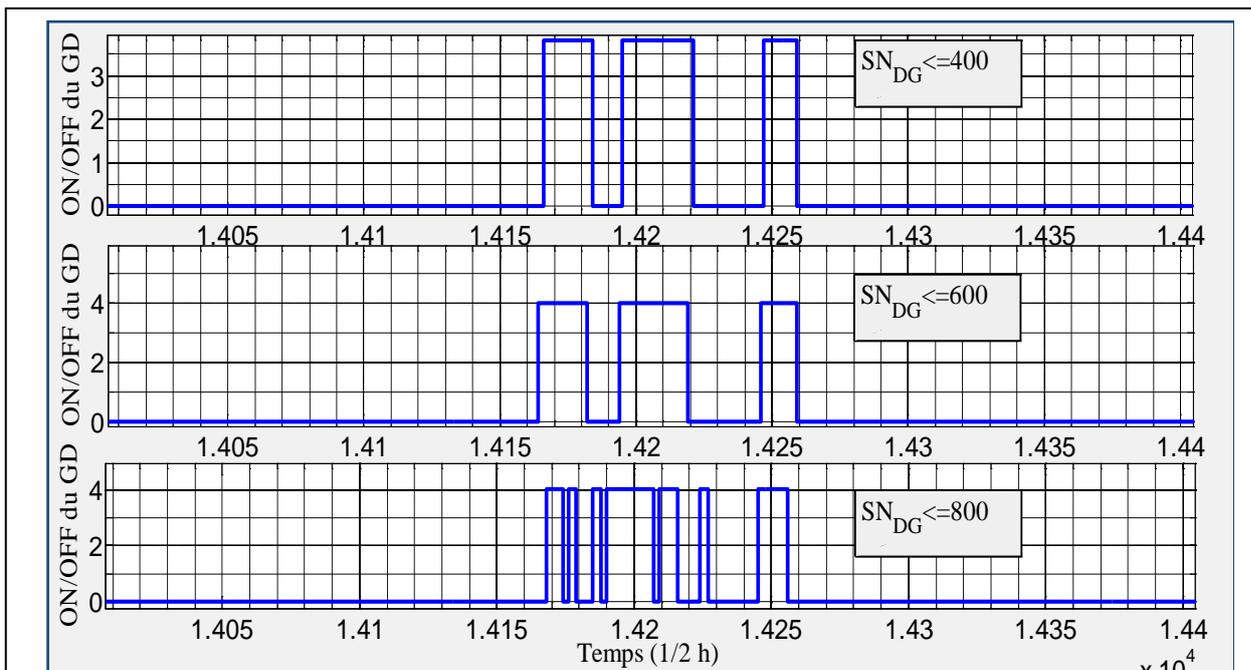


Figure 5.10 : Zoom 2 présente les instants de commutation du générateur diesel.

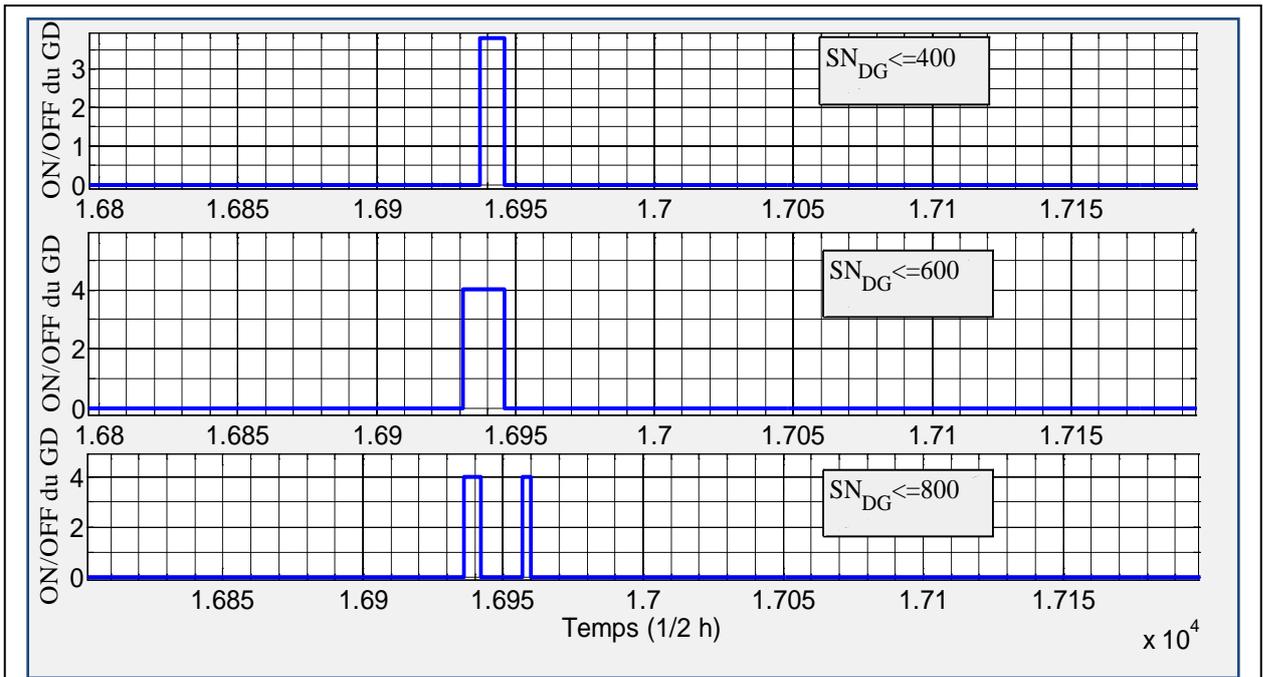


Figure 5.11 : Zoom 3 présente les instants de commutation du générateur diesel.

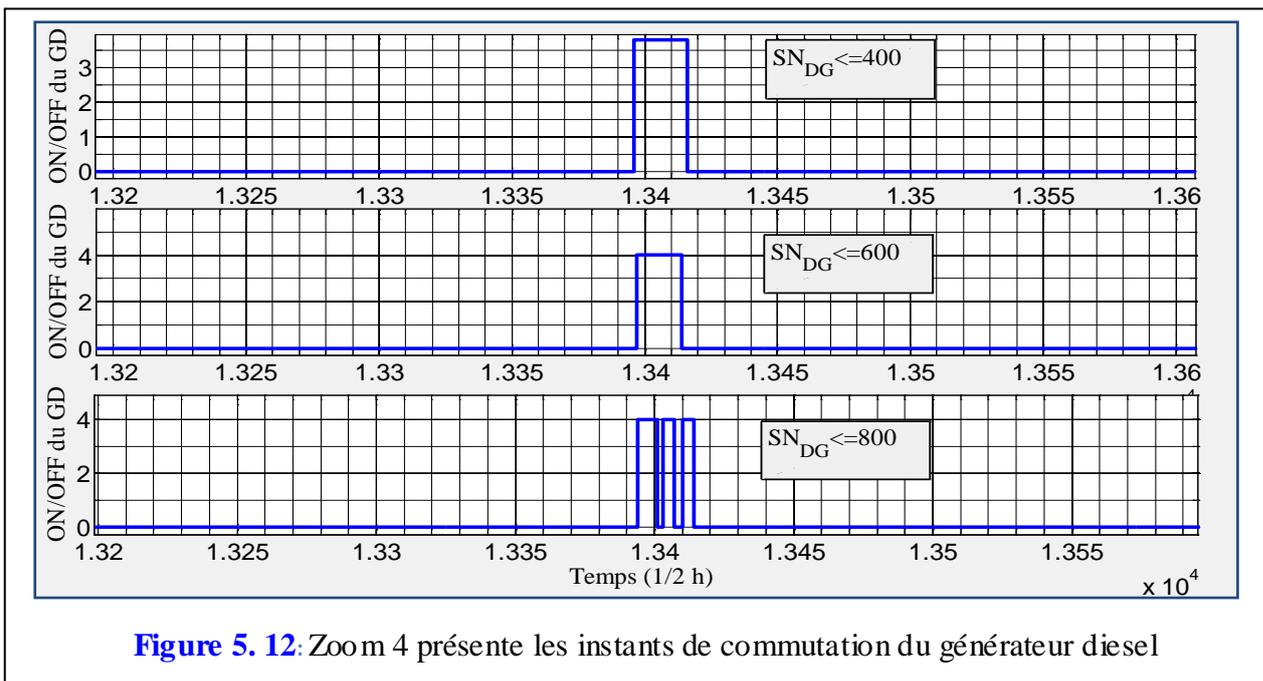


Figure 5.12: Zoom 4 présente les instants de commutation du générateur diesel

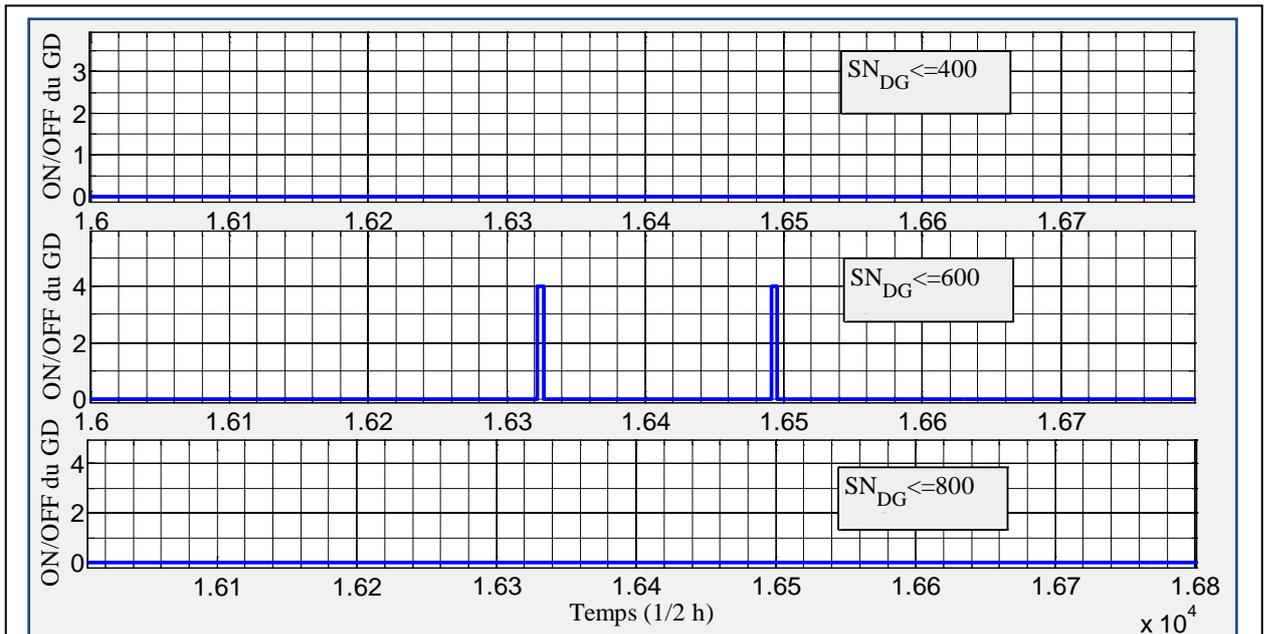


Figure 5.13 : Zoom 5 présente les instants de commutation du générateur diesel.

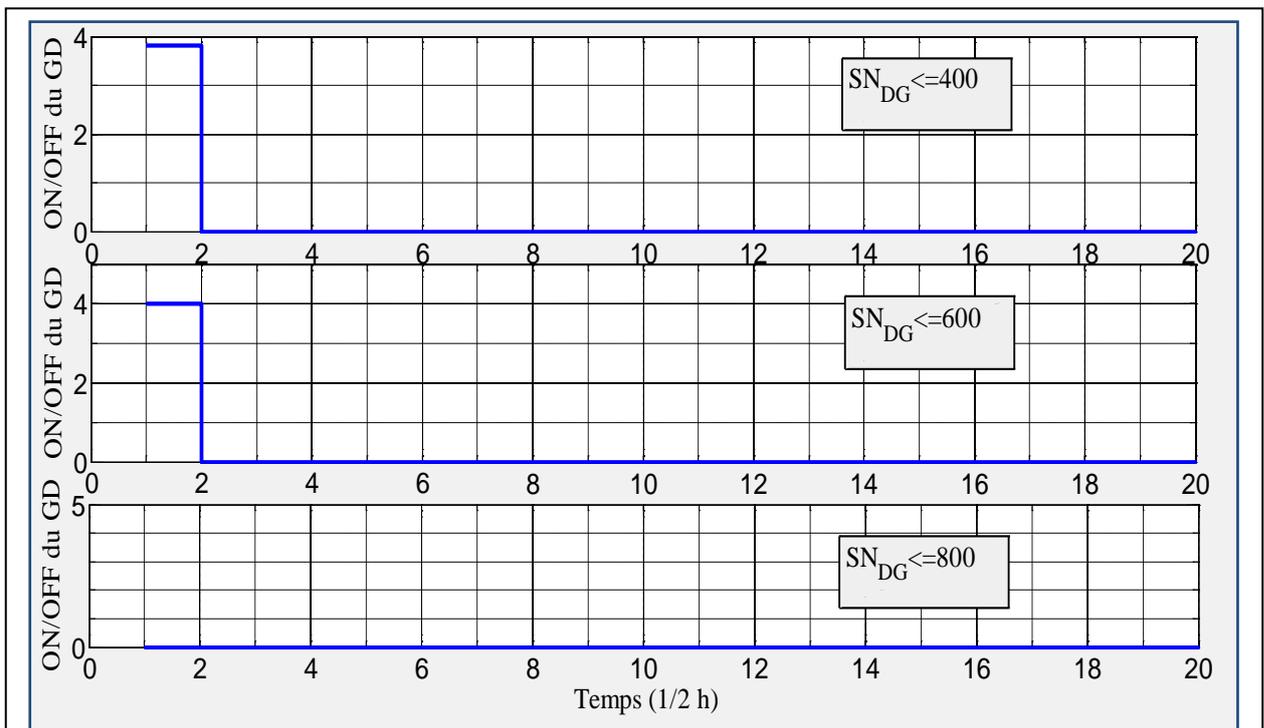


Figure 5.14 : Zoom 6 présente les instants de commutation du générateur diesel.

La puissance fournie par le générateur solaire et la turbine éolienne est illustrée dans la Figure 5.15. Les instants de démarrage du GD par rapport à l'état de charge (SOC(t)) du banc de

stockage et la différence entre la puissance délivrée par les sources renouvelables et la charge ($\Delta P = P_r(t) - P_L(t)$) sont données à la Figure 5.16

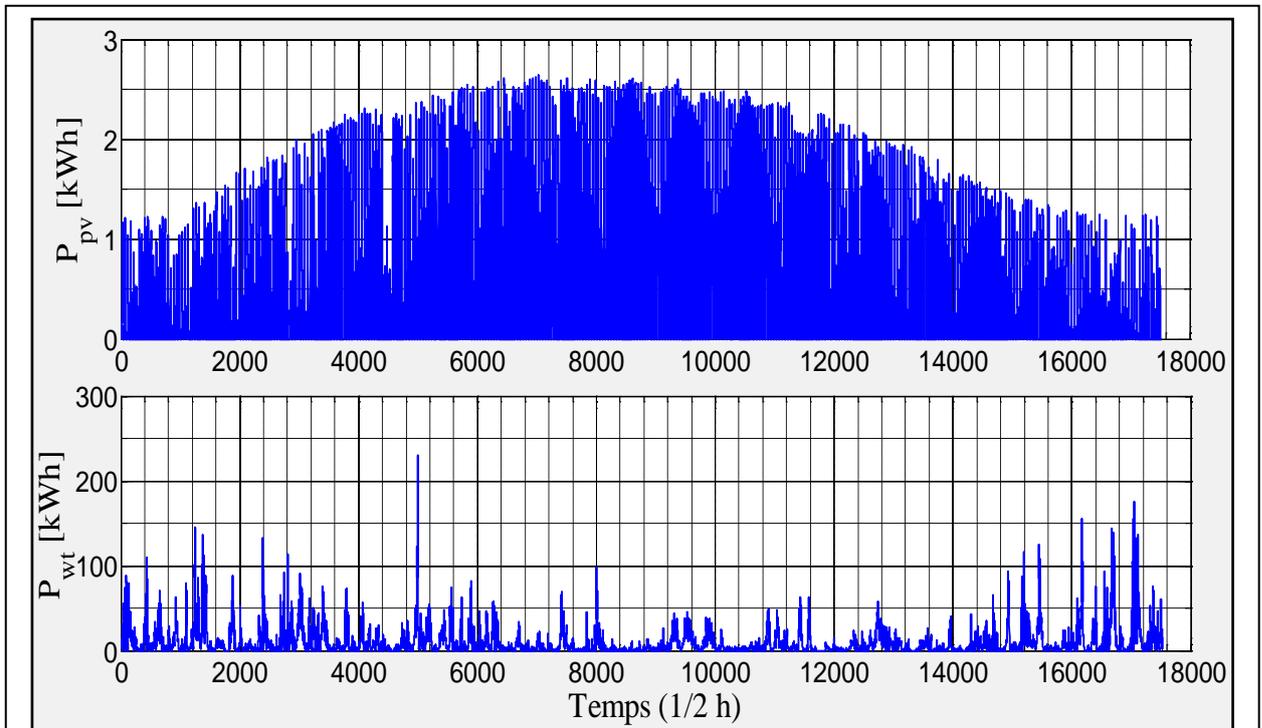


Figure 5.15 : Puissance fournie par le générateur solaire et le générateur éolien pour $SNDG \leq 600$.

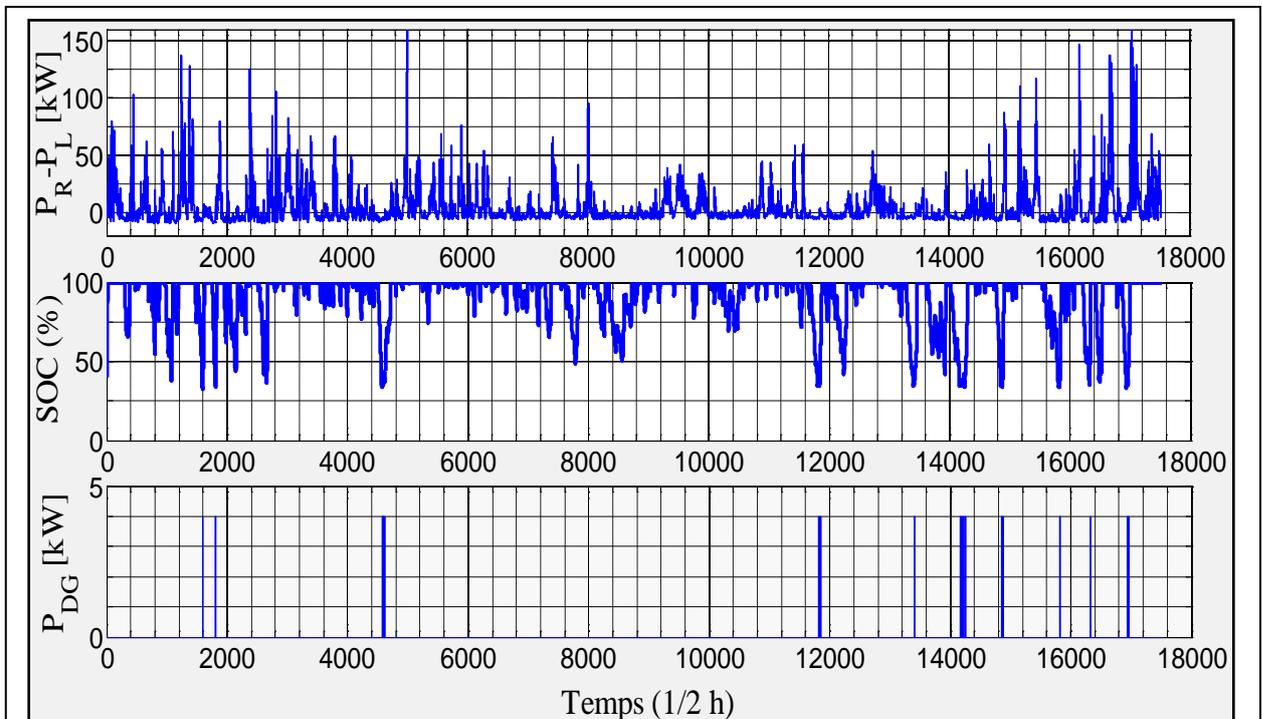


Figure 5.16 : Evolution du nombre de démarrage du GD et l'état de charge du banc de batteries pour $SNDG \leq 600$.

5.5 Conclusion

Dans ce chapitre deux aspects essentiels ont été abordés : le dimensionnement et l'optimisation du SMS. Alors, dans un premier temps nous avons présenté de manière résumée les méthodes d'optimisation les plus couramment utilisées dans la littérature. Les grandes classes d'algorithmes d'optimisation présentées sont les méthodes déterministes et les méthodes stochastiques. Dans un second temps, nous avons appliqué les méthodes d'optimisation directes (Mesh Adaptive Direct Search & GA) pour optimiser le dimensionnement du système-multi-sources. La fonction de coût optimisée représente le coût global de l'installation en termes d'énergie grise. D'après les résultats obtenus il semble que les algorithmes d'optimisation directs sont très performants pour l'optimisation des fonctions non linéaires avec des contraintes.

L'algorithme d'optimisation appliqué (MADSGA) permet de trouver l'optimum global du SMS soit par la méthode de gradient ou sans gradient. Dans notre cas, la résolution du problème est faisable par les deux méthodes, puisque la fonction objectif optimisée et les fonctions contraintes sont des fonction continues et dérivables.

D'après les résultats d'optimisation obtenus sous des contraintes différentes. Il semble que, l'algorithme d'optimisation est sensible à la contrainte liée au nombre de démarrage du GD (SN_{DG}). En effet, le remplacement des paramètres de conception quand $SN_{DG} \leq 400$, $SN_{DG} \leq 600$ et $SN_{DG} \leq 800$ dans le simulateur dynamique permet de confirmer cette sensibilité. Ce qui nous permet de conclure que, la variation dans la contrainte SN_{DG} a une influence directe sur sa durée du GD.

Conclusion Générale et Perspectives

Dans ce travail de recherche une nouvelle méthodologie pour le dimensionnement et l'optimisation des SMS a été développée. Le principe de cette méthodologie est fondé sur l'utilisation d'un outil de simulation dynamique simulant les SMS. Ainsi, l'outil de simulation (ou le simulateur dynamique) développé a la capacité de traduire le comportement fonctionnel des SMS. L'optimisation du dimensionnement et du fonctionnement des SMS est basée sur deux points essentiels : L'exploitation de la méthode statistique du plan d'expériences (Design of Experiments, PE) pour la modélisation des SMS en se basant sur les expériences et l'implémentation d'un algorithme d'optimisation pour optimiser les modèles obtenus par la méthode du PE.

Dans un premier temps, un état de l'art sur les systèmes multi-sources a été présenté. Différents types de systèmes multi-sources ont été illustrés et correspondent à différentes configurations, à savoir : les systèmes autonomes purement fossiles (**SAF**), les systèmes autonomes purement renouvelables (**SAR**), les systèmes renouvelables hybrides (**SHR**) et les systèmes renouvelables hybrides avec des générateurs fossiles (**SHRF**). Les SMS cités sont parfois connectés aux systèmes de stockage. Pour chaque configuration d'électrification, des avantages et des inconvénients ont été tirés. Dans notre travail, une configuration hybride (**PV/WT/DG + Batterie**) a été choisie comme un système d'électrification pour un site isolé localisé. Nous avons exploité la base de données de ce site pour réaliser l'installation du SMS en utilisant des sources renouvelables et fossiles.

Dans un second temps, un outil de simulation nommé simulateur dynamique (**SD**), permettant de simuler le comportement fonctionnel du SMS, a été développé. La conception de ce **SD** est fondée sur l'utilisation des modèles propres pour les différentes sources d'énergie utilisées dans le SMS. Pour cela, le développement de plusieurs modèles est nécessaire. En effet, trois types de modèles ont été développés, un modèle de puissance estimant les puissances délivrées par les sources d'énergie, un modèle qui permet d'évaluer l'énergie grise de chaque source séparément et un modèle qui estime le vieillissement du banc de batteries type plomb

acide. Le développement du modèle de vieillissement des batteries de stockage est nécessaire pour l'évaluation du taux de dégradation en fonction de l'utilisation dans le système multi-sources. L'algorithme de comptage Rainflow a été utilisé pour la détermination de la profondeur de fonctionnement de chaque cycle (charge-décharge). La validation du modèle de vieillissement des batteries plomb acide (VRLA) est effectuée en utilisant une base de données réelle fournie par le constructeur. A partir de cette base de données, nous avons pu déterminer les courbes de Wöhler qui représentent les variations du nombre de cycle de fonctionnement en fonction des profondeurs de décharge : $N_{cycle} = F(DOD)$. Une fois ces modèles obtenus, on applique l'algorithme de comptage Rainflow sur la courbe de charge-décharge de la batterie. Dans ce modèle de vieillissement, nous avons pris en considération l'influence de la température de fonctionnement sur la dégradation de la batterie. Alors, un modèle thermique est utilisé pour déterminer l'évolution de la température absolue : La température absolue est calculée sur tout l'intervalle d'un cycle de charge-décharge effectué par la batterie.

L'intégration du modèle de vieillissement dans la simulation des SMS représente un outil performant pour l'estimation de la durée de vie du banc de stockage dans les systèmes multi-sources. Le dimensionnement des SMS sur une période de plus de 20 ans exige un modèle de vieillissement.

Ensuite, une validation du fonctionnement du **SD** a été faite sous l'environnement de programmation Matlab-Simulink. Les entrées du simulateur dynamiques sont les données météorologiques du site et les paramètres de conception du **SMS**. La longueur des données météorologiques du site est égale à un an avec un pas de prélèvement ou de mesure correspondant à une demi-heure. Les intervalles de variation des paramètres de conception du système sont définis par l'expérimentateur selon différentes contraintes. Ces contraintes sont en relation directe avec le potentiel énergétique des sources renouvelables par rapport aux variations du profil de charge annuel. Les essais de simulation du **SD** sont effectués pour différentes valeurs des variables d'entrées. Les réponses mesurées à la sortie du système de simulation sont définies par les puissances des sources d'énergie renouvelables et fossiles, la puissance fournie par le banc de stockage, le nombre de démarrage du GD, le temps de fonctionnement du GD, le taux de vieillissement du banc de batteries, l'énergie grise calculée pour le système global et le paramètre de satisfaction (LPSP). Le **SD** offre la possibilité de tester l'influence des paramètres d'entrée du **SMS** sur les réponses de sortie.

En fin, la détermination de la configuration optimale qui optimise le dimensionnement et le fonctionnement du **SMS** a été traitée. En raison de la complexité du **SMS** due au nombre de

paramètres important avec des longueurs des données météorologique définies sur un an, l'optimisation en ligne devient difficile et pas toujours faisable. Alors, devant cette problématique nous avons résolu le problème d'optimisation du SMS par la manière suivante :

Premièrement, par l'application de la méthode du plan d'expériences (PE), des méta-modèles modélisant le SMS ont été développés. La conception de ces méta-modèles est réalisée moyennant une base de données (vecteurs d'entrée et réponses de sortie) générée par le simulateur dynamique. Les modèles obtenus par l'approche du plan d'expériences, représentent bien le comportement du SMS. En effet, la comparaison entre l'évolution à l'aide des réponses du SD et celle en utilisant les méta-modèles montre que les deux comportements du système sont proches. En plus, les modèles prédits (ou observés) par la méthode du PE sont caractérisés par un facteur de qualité R^2 meilleur. Ceci signifie que la méthode statistique du PE représente un outil très efficace pour l'optimisation de la modélisation des systèmes multi-sources complexes.

Deuxièmement, une fois le SMS converti à un modèle mathématique (ou méta-modèle), un algorithme d'optimisation sera nécessaire pour la détermination de la configuration optimale. Dans cette étape d'optimisation un algorithme de type direct a été appliqué pour l'optimisation mono-objectif sous contraintes. Ainsi, l'optimisation du SMS est basée sur l'optimisation de la fonction objectif qui varie en fonction du coût du système global. La solution optimale calculée par l'algorithme d'optimisation varie en fonction de l'ensemble des contraintes supposées. Ces contraintes d'optimisation permettent de guider l'algorithme à converger vers des configurations ou des solutions optimales désirées. Parmi les contraintes les plus importantes utilisées pour changer les solutions de dimensionnement ou de fonctionnement du SMS nous citons : Une contrainte qui permet de contrôler le nombre de démarrage du GD (SN_{DG}) pendant son cycle de vie, une contrainte pour estimer le taux de dégradation (R_a) du banc de batteries dans le système et une contrainte pour l'évaluation du paramètre de satisfaction ($LPSP$). La validation de l'algorithme d'optimisation a été faite par la réalisation de nombreux essais de simulation à des contraintes différentes. Les solutions obtenues par optimisation ont été remplacées dans le SD afin de les valider.

Enfin, d'après les problématiques traitées au cours de cette thèse, plusieurs perspectives peuvent être envisagées dans des travaux futurs. Une première perspective concerne l'amélioration du simulateur dynamique du SMS. Pour avoir un simulateur dynamique proche d'un système multi-sources réel, il est intéressant d'introduire des modèles réels pour les convertisseurs de puissance. En plus, il y a une possibilité d'élargir l'application du SD par l'intégration d'autres générateurs d'énergie dans le SMS.

Une deuxième perspective concerne l'utilisation d'un profil de charge différent pour chaque année. Donc, ce profil dépend de la variation du nombre d'habitats.

Finalement, l'étude de sensibilité des variables de conception du SMS permet d'éliminer les variables non sensibles dans le système global.

Bibliographie

[AAJ15] *Abtin Ataei, Jun-Ki Choi, Reza Rashidi, Mojtaba Nedaei and Elnaz Kurdestani : Simulation and Optimization of a Wind/PV/Battery Hybrid Power System for a Commercial Building, American Journal of Renewable and Sustainable Energy. Vol. 1, No. 3, pp. 133-139, 2015.*

[AAS14] *Abdulwahed A Salem, Ahmed Abu-Siada, Syed Islam : Condition Monitoring Techniques of the Wind Turbines Gearbox and Rotor, International Journal of Electrical Energy, Vol. 2 pp : 53-56, March 2014.*

[ABe01] *A Berro : Optimisation multiobjectif et stratégie d'évolution en environnement dynamique, thèse doctorat, Université des sciences sociales Toulouse I, 18 Décembre 2001.*

[ADh12] *Abbes Dhaker : Contribution au dimensionnement et à l'optimisation des systèmes hybrides éoliens-photovoltaïques avec batteries pour l'habitat résidentiel autonome, thèse doctorat, Université de Poitier –France, 2012.*

[ADM12] *Abbes D, Martinez A and Champenois G: Eco-design Optimization of autonomous hybrid wind-photovoltaic system with battery storage, IET Renew Power Gen. Vol. 6, pp : 358–371,2012.*

[AFZ12] *Allen F Zielnik, David P Dumbleton : Photovoltaic Module Weather Durability and Reliability Testing, Solar Energy Competence Center Atlas Material Testing Technology LLC - USA , 22 June, 2012.*

[AKM11] *Ali Keyhani and Muhammad Marwali : Smart Power Grids 2011, ISBN 978-3-642-21577-3, Springer, edition 2011.*

[ASa06] *Arnusorn Saengprajak : Efficiency of Demand Side Management Measures in Small Village Electrification Systems, Doctorat theses, Kassel University, 20 November 2006.*

[ASt08] *A Stoppato and al : Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation, Energy Journal. Vol. 33, pp: 224–232, 2008.*

[AWC] *A W Czanderna and G J Jorgensen : Service Lifetime Prediction for Encapsulated Photovoltaic Cells/Minimodules, Center for Performance Engineering and Reliability National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO 80401-3393.*

[BBM14] *Brian B McKeon, J Furukawa, S Fenstermacher : Advanced Lead-Acid Batteries*

and the Development of Grid-Scale Energy Storage Systems, *IEEE*. Vol. 102, pp: 953-963. June 2014.

[**BFD07**] *B Flèche et D Delagnes : Production d'énergie électrique : Energie Solaire Photovoltaïque, juin 07.*

[**BFM09**] *Brian Fleck and Marc Huot : Comparative life-cycle assessment of a small wind turbine for residential off-grid use, Renewable Energy. Vol. 34, pp: 2688–2696, 2009.*

[**BGu13**] *B Guinot : Evaluation multicritère des technologies de stockage couplées aux énergies renouvelables : conception et réalisation de la plateforme de simulation ODYSSEY pour l'optimisation du dimensionnement et de la gestion énergétique , Thèse doctorat, Université de Grenoble –France, 13 septembre 2013.*

[**BoA14**] *Boice A : Energy Storage Technologies : The Past and the Present, IEEE, vol. 102, PP: 1777.1794. November 2014.*

[**BRZ11**] *Belfkira R, Zhang L and Barakat G: Optimal sizing study of hybrid wind/PV/diesel power generation unit, Sol Energy, Vol. 85, PP : 100–110, 2011.*

[**BSB96**] *B S Borowy and al : Methodology for Optimally Sizing the Combination of a Battery Bank and PV Array in a Wind/PV Hybrid System, IEEE Transactions on Energy Conversion. Vol. 11, No. 2, PP: 367- 375, June 1996.*

[**BZh14**] : *B Zhao and al, Optimal sizing, operating strategy and operational experience of a stand-alone microgrid on Dongfushan Island, Journal of Applied Energy, Vol. 113, PP 1656–1666, 2014.*

[**CAu08**] *C Audet : Mesh Adaptive Direct Search Algorithms For Constrained Optimization, SIAM Journal on Optimization. Vol. 17, N°1, PP: 188-217, 2008.*

[**CHa14**] *Cherif Habib : Développement D.une Méthodologie de Conception Systémique et d'Analyse sur Cycle de Vie (ACV) de Systèmes Énergétiques Hybrides, Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Tunis, 2014.*

[**CHS12**] *Classic-Handbook for Stationary Vented Lead-Acid Batteries Part 2 : Installation, Commissioning and Operation, Industrial Power, Application Engineering, GNB a division of Exide Technologies, Edition 4, January 2012.*

[**CJB94**] *Copetti J B and Chenlo F: Lead/acid batteries for photovoltaic applications: Test results and modeling, J Power Sources. Vol. 47 pp : 109-118, 1994.*

[**CMa00**] *C Massimo : New dynamical models of lead–acid batteries, IEEE Trans Power Syst.*

Vol. 15, pp : 1184–1190, 2000.

[**CSe11**] Clarence Semassou : Aide A La Décision Pour Le Choix de Sites et Systèmes Énergétiques Adaptés Aux Besoins du Benin, Thèse doctorat, Université Bordeaux 1-France, 15 décembre 2011.

[**DCJ12**] Dirk C Jordan and Sarah R Kurtz : Photovoltaic Degradation Rates — An Analytical Review, Journal Article NREL/JA-5200-51664, June 2012.

[**DSD82**] Downing S D and Socie D F : Simple Rain Flow counting algorithms, Int J Fatigue, Vol. 4, pp: 31-40, 1982.

[**DWi13**] D Witmer : Wind-Diesel Hybrid System Testing at the Alaska Center for Energy and Power, A Review of Project Activities under the Denali Commission Emerging Energy Technology Grant Award #01233-00, 10/31/2013.

[**DYN12**] D Y Nguewo : Expérimentation et Optimisation d'un Prototype de Centrale Hybride Solaire PV/Diesel sans Batteries de Stockage : Validation du Concept « Flexy Energy », Thèse doctorat, Institut International d'ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, 2012.

[**EKa12**] E Kaplani : Degradation Effects in *sc*-Si PV Modules Subjected to Natural and Induced Ageing after Several Years of Field Operation, JOURNAL OF Engineering Science and Technology Review, Vol. 4 PP : 18-23, 2012.

[**GDK15**] Générateur Diesel ouvert de type KIPOR : <http://www.twenga.fr/groupe-electrogene-diesel.html>, site visité en 2015.

[**GEI15**] Groupes Electrogènes ITCPOWER-EUROPE : <http://www.unitedpower-online.com/>, site visité en 2015.

[**GKI15**] Générateurs KIPOR, <http://www.dmt-distribution.com/images/jpg/catalogue-kipor-generateurs-professionnels-dmt-1.pdf>, visité en 2015.

[**HGV03**] Handbook for Gel-VRLA-Batteries Part 2 : Installation, Commissioning and Operation, Exide Technologies "Sonnenschein" Rev. 5, December 2003.

[**HIA12**] Hussein Ibrahim and Adrian Ilinca : Contribution of the Compressed Air Energy Storage in the Reduction of GHG – Case Study: Application on the Remote Area Power Supply System, chapter 13, PP:338-364, 2012.

[**HNa88**] H Nacfaire : Wind-Diesel and Wind Autonomous Energy Systems, Commission of the European Communities, Elsevier Applied Science London And New York, 1988.

[**HTT10**] Henerica Tazvinga, Tawanda Hove : *Photovoltaic/diesel / Battery Hybrid Power Supply System : Generator Component and sizing energy performance Analysis*, 2010.

[**JAH09**] Joern A, *Heat tolerance of automotive lead-acid batteries*, *J Power Sources*, Vol. 190, pp : 162–172, 2009.

[**JFr08**] J Franco : *Planification d'expériences numériques en phase exploratoire pour la simulation des phénomènes complexes*, Thèse doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2008.

[**JHJ09**] Jaroslav Hofierka and Jan Kanuk : *Assessment of photovoltaic potential in urban areas using open-source solar radiation tools*, *Renewable Energy*, Vol. 34, pp: 2206–2214, 2009.

[**JKu15**] Jagat Kumar : *System Simulation and Modeling Jagat Kumar*, Paper Code: MCA 504, <http://www.ddegjust.ac.in/studymaterial/mca-5/mca-504.pdf>, visited in July 2015.

[**JPG92**] Jean-Pierre, G Dauphin-Tanguy Frédéric Rotella, Richard and Irène Zambettakis : *Modélisation et identification des processus*. Vol. 1 , Edition Technip -Paris 1992.

[**KEK06**] Koutroulis E, Kolokotsa D, Potirakis A and Kalaitzakis K: *Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind-generator systems using genetic algorithms*, *Sol Energy*, Vol. 80, PP : 1072–1088, 2006.

[**KRH90**] K R Hoopingarner and F. R. Zaloudek : *Safety Implications of Diesel Generator Aging*, *Journal Of Nuclear Safety*, Vol. 31, N° 4, pp: 484- 489, October-December 1990.

[**LAr11**] Luis Arribas and al : *World-wide overview of design and simulation tools for hybrid PV systems*, *International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Program*, Report IEA-PVPS T11-01:2011 January 2011.

[**LDB08**] Luca D Benedettou and Jiri Kelmes : *LDB08 as environmental assessment tool in waste to energy and contribution to occupational health and safety*, *chemical engineering transactions*, Vol. 13, pp: 343-350, 2008.

[**NWT12**] National Wind Technology Center, National Energy Renewable Laboratory, http://www.nrel.gov/midc/nwtc_m2/. Visited in 2012.

[**MAT13**] M A Tankari, M B Camara, B. Dakyo and G Lefebvre : *Use of Ultraca-pacitors and Batteries for Efficient Energy Management in Wind-Diesel Hybrid System*, *IEEE Trans Sustainable Energy*. Vol. 4, PP : 414.424, 2013.

[MDA06] Matthias D, Andrew C, Sinclair G and McDonald J R: *Dynamic model of a lead acid battery for use in a domestic fuel cell system*, *J Power Sources*. pp: 161: 1400–1411, 2006.

[MMo09] Maxime Montaru : *Contribution a l'évaluation du vieillissement des batteries de puissance utilisées dans les véhicules hybrides selon leurs usages*, *Thèse doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble*, 2009.

[MMS06] Mahmood M Shokrieh and Roham Rafiee : *Simulation of fatigue failure in a full composite wind turbine blade*, *Journal of Composite Structures*, Vol. 74 332–342, 2006.

[MRK12] Md Ruhul Kabir, Braden Rooke, G.D. Malinga Dassanayake and Brian A. Fleck : *Comparative life cycle energy, emission, and economic analysis of 100 kW nameplate wind power generation*, *Renewable Energy*, Vol. 37, pp: 133-141, 2012.

[MSI11] M S Ismail, M Moghavvemi and T M I Mahlia : *Design of a PV/Diesel Stand Alone Hybrid System For a Remote Community in Palestine*, *Journal of Asian Scientific Research 2*, PP: 599-606, 2011.

[MZT15] Malek Zaibi, Toufik Madani LAYADI , Gérard CHAMPENOIS, Xavier Roboam, Bruno Sareni and Jamel Belhadj : *A Hybrid Spline Metamodel for Photovoltaic/Wind/Battery Energy Systems*, 6th International Renewable Energy Congress - IREC 2015, 24 March- Sousse, Tunisia.

[OEa10] Orhan Ekren and al : *Size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using simulated annealing*, *Applied Energy* Vol. 87, PP: 592–598, 2010.

[OJM10] Olivier Joliet, Myriam saadé, Pierre Crettaz and Shanna Shaked : *Analyse de cycle de vie comprendre et réaliser écobilan*, édition 2010.

[Pch13] *Profil de charge : Réseau de l'intelligence électrique*, <http://www.rte-france.com/fr/eco2mix/eco2mix-consommation>, 2013.

[PVa11] P Vasant : *Hybrid Mesh Adaptive Direct Search and Genetic Algorithms Techniques for industrial production systems*, *Archives of Control Sciences*, v. 21(LVII), No. 3, pages 299–312, 2011.

[PZE10] Pei Zhai , and Ericd Williams : *Dynamic Hybrid Life Cycle Assessment of Energy and carbon of Multicrystalline Silicon Photovoltaic Systems*, *Environmental Science & Technology*, Vol. PP: 447950–7955, 2010.

[QBa12] Quentin Badey : *Étude des mécanismes et modélisation du vieillissement des batteries lithium-ion dans le cadre d'un usage automobile* , *Thèse doctorat, Université Paris Sud*, 2012.

[**RDL05**] *R Dufo-Lopez and J L Bernal-Agustin : Design and control strategies of PV-Diesel systems using genetic algorithms, Solar Energy, vol. 79, pp. 33-46, 2005.*

[**RDT14**] *R Džiugaitė - T and G Streckienė : Solar Hot Water Heating System Analysis Using Different Software in Single Family House, The 9th International Conference, environmental engineering, 22–23 May 2014, Vilnius, Lithuania.*

[**RGV09**] *R Garcia-Valverde, C Miguel, R Martinez-Bejarand and A Urbina : Life cycle assessment study of a 4.2 kWp stand-alone photovoltaic system, Solar Energy, Vol. 83, PP: 1434–1445, 2009.*

[**RWW12**] *R W Wies, R A Johnson and A N Agrawal : Energy-Efficient Standalone Fossil-Fuel Based Hybrid Power Systems Employing Renewable Energy Sources, chapter 6, published by InTech, PP:122-142, 2012.*

[**SAP06**] *Selim Alkaner and Peilin Zhou : A comparative study on life cycle analysis of molten carbon fuel cells and diesel engines for marine application, J. Power Sources, Vol. 158, PP: 188–199, 2006.*

[**SBo15**] *Simulation Book for tlte3120, http://lipas.uwasa.fi/~timan/TLTE3120/Sim_wikibook.pdf, visited in July 2015.*

[**Ska04**] *S Karam : Application de la méthodologie des plans d'expériences et de l'analyse de données à l'optimisation des processus de dépôt, thèse doctorat, université de limoges, Ecole doctorale science – technologie – santé, France, 2004.*

[**SRW07**] *Stuart R Wenham, Martin A Green : Muriel E Watt and Richard Corkish, Applied Photovoltaics, USA 2007.*

[**STu04**] *Données météorologique : Site Tunisien, Sidi Daoud, <http://globalenergyobservatory.org/geoid/41575>, 2004.*

[**SSc11**] *S Schutte and al, : A Framework for Modular Simulation of Active Components in Smart Grids, IEEE First International Conference on Smart Grid Modeling and Simulation (SGMS), 2011.*

[**SVi02**] *S Vivier : Stratégie d'optimisation par la méthode des plans d'expérience et application aux dispositifs électrotechniques modélisés par éléments finis, thèse doctorat, Ecole Centrale de Lille, Université des sciences et Technologies de Lille, 2002.*

[**TBT02**] *Tom Beer, Tim Grant, David Williams and Harry Watson : Fuel-cycle greenhouse gas emissions from alternative fuels in Australian heavy vehicles, Atmospheric Environment, Vol. 36, PP: 753–763, 2002.*

[THo00] Tawanda Hove, *A method for predicting long-term average performance of photovoltaic systems*, *Renewable Energy*, Vol. 21, PP: 207-229, 2000.

[TLa06] Tom Lambert and al : *Micropower System Modeling With Homer*, chapter 15, John Wiley and Sons, Inc, 2006.

[TLZ13] Tao Li, Zhi-Chao Liu, Hong-Chao Zhang and Qiu-Hong Jiang : *Environmental emissions and energy consumptions assessment of a diesel engine from the life cycle perspective*, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 53, PP : 7-12, 2013.

[TML13] T M Layadi, M Mostefai, G Champenois. and D Abbes : *Dimensioning a hybrid electrification system (PV / WT / DG / battery) using a dynamic simulator*, *International Conference on Electrical Engineering and Software Applications conference (ICEESA)*; 21-23 March 2013, Tunisia.

[TML14] Toufik Madani Layadi, Gérard Champenois, Mohammed Mostefai et Dhaker Abbes: *Etude Du Vieillissement D.un Banc de Stockage Plomb-Acide Dans un Système Hybride Multi-Sources*, *Symposium de Génie Electrique*, Paris - France, 8,9 et 10 juillet 2014.

[TML15a] Toufik Madani Layadi, Gérard Champenois and Mohammed Mostefai : *Modeling and Design Optimization of an Autonomous Multisource System Under a Permanent Power-Supply Constraint*, *IEEE TRANSACTIONS ON SUSTAINABLE ENERGY*, Vol. 6, N° 03, PP : 872.880, JULY 2015.

[TML15b] Toufik Madani Layadi, Gérard Champenois, Mohammed Mostefai and Abbes Dhaker : *Lifetime Estimation Tool of Lead Acid Batteries for Hybrid Power Sources Design*. *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 54, PP: 36.48, 2015.

[TRe12] *Technical Report : Environmental Engineering: The use of alternative energy solutions in telecommunication installations*, FRANCE, 2012.

[UGu14] *User's Guide, energyPRO By EMD International A/S, December 2014*, <http://www.emd.dk/files/energypro/energyPROHlpEng-Dec2013.pdf>, visited July 2015.

[VGa11] V Gardeux : *Conception d'heuristiques d'optimisation pour les problèmes de grande dimension. Application à l'analyse de données de puces à ADN*, thèse doctorat, UNIVERSITÉ DE PARIS-EST CRÉTEIL, 30 Novembre 2011.

[VNa10] V Nayar : *High Renewable Energy Penetration Diesel Generator Systems*, chapter 25, PP: 512-536, Published in November 2010.

[VPS09] V P Singh : *System Modeling and Simulation*”, published by New Age International Limited Publisher, New Delhi, ISBN (13): : 978-81-224-2924-4, 2009.

[VRo04] Vincent Rogez : *Modélisation simplifiée de sources de production décentralisée pour des études de dynamique de réseaux : Application à l'intégration d'une production éolienne dans un réseau de distribution insulaire*, Thèse doctorat, université d'Artois, 2004.

[YRa12] Y Rafic and al : *Optimal Design of an Hybrid Wind-Diesel System with Compressed Air Energy Storage for Canadian Remote Areas*, chapter 12, published by InTech, 2012.

[YTh10] Yaël Thiaux : *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*, Thèse doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2010.

[ZWe07] Zhou Wei : *Simulation and Optimization and Optimum Design of Hybrid Solar-Wind and Solar-Wind-Diesel Power Generation Systems*, PhD Thesis, The Hong Cong Polytechnic university, 2007.

Abstract - Résumé - ملخص

Abstract: In this research work, a new methodology for the optimization and dimensioning of multi-source systems (MSS) has been developed. The principle of this methodology is based on three main steps:

The first step concerns the development of a Dynamic Simulator (DS) to simulate the functional behavior of the hybrid configuration (PV / WT / DG + Batteries). The DS uses the meteorological data of the isolated site and the design parameters of MSS as necessary vectors for its operation. During the second stage, by the exploitation of the database generated by the DS and by the application of the Design of Experiments approach (DoE) meta-models of the MSS have been determined. Finally, the design and operation optimization of the MSS has been realized efficiently using the Mesh Adaptive Direct Search Algorithm (MADSGA).

Keywords: Renewable Energy, Embodied Energy, Multi-Source Systems, Dynamic Simulation, Aging Models, Design of Experiments, Sizing, Optimization and MADSGA.

Résumé : Dans ce travail de recherche, une nouvelle méthodologie pour l'optimisation et le dimensionnement des systèmes multi-sources (SMS) a été développée. Le principe de cette méthodologie est basé sur trois étapes principales :

La première étape concerne le développement d'un simulateur dynamique (SD) pour simuler le comportement fonctionnel de la configuration hybride (PV/WT/DG + Batteries). Le SD utilise les données météorologiques du site isolé et les paramètres de conception du SMS comme des vecteurs nécessaires pour son fonctionnement. Pendant la deuxième étape, par l'exploitation de la base de donnée générée par le SD et par l'application de la méthode du Plan d'Expériences (PE), des méta-modèles pour le SMS ont été déterminés. En fin, l'optimisation du dimensionnement et l'optimisation de fonctionnement du SMS a été réalisée de manière fiable et efficace en utilisant les algorithmes adaptatifs directs de recherche avec motif (MADSGA).

Mots clés : Energies Renouvelables, Energie Grise, Systèmes Multi-Sources, Simulation Dynamique, Modèles de Vieillesse, Plan d'Expériences, Dimensionnement, Optimisation et MADSGA.

ملخص : في هذا العمل المقدم، تم وضع منهجية جديدة للتصميم الأمثل للأنظمة متعددة المصادر (SMS). مبدأ هذه المنهجية يستند على ثلاث مراحل رئيسية: المرحلة الأولى تهتم بتطوير نظام محاكاة ديناميكي (SD) يعمل على محاكاة السلوك الوظيفي للتشكيلة الهجينة يستعمل نظام المحاكاة الديناميكي معطيات الطقس لموقع معزول جغرافيا وخصائص التصميم للنظام متعدد المصادر كمدخل أساسية لعمله. أثناء المرحلة الثانية، باستغلال قاعدة المعطيات المولدة باستعمال المحاكى الديناميكي وتطبيق طريقة فضاء التجارب (PE) تم تحديد نماذج خاصة بالنظام متعدد المصادر. وأخيرا، تم تحقيق التصميم الأمثل للنظام متعدد المصادر باستعمال خوارزميات البحث المكيفة المباشرة بنموذج (MADSGA).

الكلمات المفتاحية: الطاقات المتجددة، الطاقة الرمادية، الأنظمة متعددة المصادر (SMS)، المحاكاة الديناميكية، نماذج الشيخوخة، فضاء التجارب (PE)، التحجيم و التصميم الأمثل و MADSGA.