REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTÉ DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ET INFORMATIQUE DEPARTEMENT D'ÉLECTRONIQUE

T H E S E DE DOCTORAT (3ème cycle LMD)

Spécialité : ÉLECTRONIQUE Présentée par :

HELLEL EL Kadi Sujet :

Fiabilité des systèmes énergétiques multi-sources

Soutenu le 07 octobre 2019

devant le jury composé de :

Mr AMEUR Soltane	Professeur à l'UMMTO	Président
Mr ZIANI REZKI	Professeur à l'UMMTO	Rapporteur
Mr LAGHROUCHE Mourad	Professeur à l'UMMTO	Examinateur
Mr ACHOUR Hakim	M.C.A à l'UMMTO	Examinateur
Mr HADJ ARAB Amar	D.R au CDER (Alger)	Examinateur
Mr HAMACI Samir	E.C à l'ECAM-EPMI (France)	Invité

Remerciements

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire a été effectue au sein du Laboratoire d'analyse et modélisation des phénomènes aléatoires de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou. Ce travail s'est fait en collaboration avec l'ECAM-EPMI (Cergy-Pontoise, FRANCE).

Je souhaite exprimer toute ma gratitude à M. Rezki Ziani , Professeur et chef de département d'électronique à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, pour sa grande disponibilité dans la direction de cette thèse. Il a éclairé ce travail de ses conseils judicieux, il m'a prodigué ses encouragements tout au long de la thèse et il a su me faire partager ses nombreuses connaissances, sa vision toujours claire et synthétique.

Je tiens à remercier vivement à M. Samir Hamaci, Enseignant Chercheur à l'ECAM-EPMI, pour ses conseils, son optimisme et pour la confiance accordée au cours de ces années. Grâce à ses collaborations fructueuses avec plusieurs laboratoires, il m'a permis de postuler pour cette thèse, de découvrir et de m'investir dans le monde de la recherche.

Je tiens à remercier à M. M. Karim Labadi, HDR à l'ECAM-EPMI, pour ses conseils toujours pertinents et attentifs, son dynamisme, sa disponibilité et son soutien pendant la thèse.

J'adresse tout particulièrement ma reconnaissance à M. Moumen DARCHERIF Directeur de l'ECAM-EPMI, ainsi que M. Jean Michel BRUCKER Directeur Scientifique, pour m'avoir permis de travailler au sein de leur laboratoire.

Je suis extrêmement reconnaissant à M. Ameur Soltane, Professeur à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou et directeur de laboratoire d'analyse et modélisation des phénomènes aléatoires (LAMPA), pour m'avoir permis de travailler au sein de laboratoire LAMPA, pour l'honneur qu'il m'a fait en présidant ce jury.

Je remercie sincèrement Mme.Ameur Zohra, Professeur à l'Université Mouloud Mammeri de Tiziouzou et ex directrice de laboratoire d'analyse et modélisation des phénomènes aléatoires (LAMPA), pour les remarques constructives et intéressantes.

Je remercie également Monsieurs Mourad Laghrouche, professeur à l'UMMTO, Hakim Achour, Maitre de conférences A à l'UMMTO, Amar Hadj Arab, Directeur de recherche au CDER(Alger). Mon amicale reconnaissance s'adresse à tous mes camarades thésards pour l'ambiance très sympathique et le climat d'entraide qu'ils ont su créer au sein du Laboratoire.

Je voudrais rendre hommage à tous ceux qui, plus ou moins récemment, de près ou de loin, à leur manière m'ont aidé à mener à bien cette thèse.

Dédicaces

A mes parents,

A ma sœur semhame et mes frères kamel et ahmed ainés,

A tous ceux qui m'aiment.

Table des matières

Re	emerc	tiements	i
Та	ble d	es matières	iii
Та	ble d	es figures	v
Li	ste de	es tableaux	ix
In	trodu	iction générale	1
1	Syst	èmes énergétiques	3
	1.1	Introduction	3
	1.2	Ressources renouvelables	3
	1.3	Description des différents types de systèmes de stockage	6
	1.4	Convertisseurs	7
	1.5	Bus de transmission	8
	1.6	Systèmes hybrides	8
	1.7	Conclusion	10
2	Sûre	eté de fonctionnement des systèmes énergétiques	13
	2.1	Introduction	13
	2.2	Sûreté de fonctionnement des systèmes	13
	2.3	Evolution de l'état d'un système dynamique au cours du temps	17
	2.4	Les principales lois de probabilité utilisées en Fiabilité	18
	2.5	Les mécanismes de défaillance	19
	2.6	Les méthodes d'analyse de sûreté	21
	2.7	Conclusion	30
3	Mod	lélisation des systèmes énergétiques avec les réseaux de Pétri stochastiques détermi-	
	nist	es	31
	3.1	Introduction	31
	3.2	Réseaux de Pétri	31
	3.3	Extensions des réseaux de Pétri	39

	3.4	Application des RdPs à la modélisation des systèmes énergétiques	39
	3.5	Conclusion	49
4	Mét	hodes d'estimation des performances des systèmes énergétiques mono et multi sourc	es
			51
	4.1	Introduction	51
	4.2	Evaluation des performances	51
	4.3	Calcul des temps de panne et temps d'attente	54
	4.4	Application	60
	4.5	Conclusion	72
Cor	nclu	sion générale	73
ann	iexe	Α	75
	A1	Connexion série	75
	A2	Connexion commutation	76
	A3	Connexion parallèle	77
ann	iexe	B : d'autres lois de probabilité	79
ann	exe	C	81
	C4	Cycle de développement d'un système	81
	C5	Les différents types de fiabilité	81
	C6	Les essais utilisés en fiabilité	82
Bib	liog	raphie	91

Table des figures

1.1	Les différentes technologies des modules photovoltaïques	4
1.2	Cellule monocristalline	5
1.3	Cellule polycristalline	5
1.4	La classification des systèmes énergétiques hybrides	9
2.1	Schéma des temps moyens	16
2.2	Evolution de l'etat d'un systeme dynamique au cours du temps	17
2.3	Diagramme des phases.	17
2.4	La forme baignoire	19
2.5	La courbe du taux défaillance d'un composant mécanique	21
2.6	Diagramme « bête à corne d'un système multi –sources à base des ressources renou-	
	velables (éolienne, solaire).	23
2.7	Diagramme de pieuvre pour un système multi –sources a base de ressources renou-	
	velables (solaire, éolienne).	23
2.8	Niveau A-0	24
2.9	Niveau A0	25
2.10	Niveau A2	26
2.11	Niveau A5	26
2.12	Un modèle Markovien	29
3.1	Incidence avant	32
3.2	Incidence arrière	32
3.3	Exemple de franchissement : Avant le franchissement de la transition T et après le	
	franchissement de la transition T	33
3.4	Graphe de marquage	33
3.5	Exemple d'un RdP.	34
3.6	Exemple de RdP	35
3.7	Exemple d'un conflit structurel	37
3.8	Exemple d'un conflit effectif	37
3.9	Exemple d'un graphe d'état	38
3.10	Exemple d'un graphe d'évènement	38

3.11	Système énergétique mono source (Eolienne)	40
3.12	DSPN du système illustré dans la Figure 3.11	41
3.13	Système énergétique mono-source (photovoltaïque).	42
3.14	RdPSD du système illustré dans la Figure 3.13.	44
3.15	Représentation globale de système énergétique multi sources	45
3.16	Système énergétiques multi sources.	45
3.17	RdPSD du système illustré dans la Figure 3.16	46
4.1	DSPN élémentaire d'un composant.	52
4.2	Description du comportement d'un composant.	53
4.3	Illustration des durées du temps de panne et du temps d'attente des différents com-	
	posants d'un système.	55
4.4	Système série.	56
4.5	Système parallèle	58
4.6	Système série/ parallèle.	60
4.7	Système parallèle/série.	61
4.8	La fiabilité prévisionnelle de chaque composant pour le système énergétique mono-	
	source, avec une éolienne seulement (système représenté dans la Figure 3.11 du	
	chapitre 3)	62
4.9	La fiabilité prévisionnelle de chaque composant pour le système énergétique mono-	
	source, avec le photovoltaïque seulement (système représenté dans la Figure 3.13)	
	du chapitre 3)	64
4.10	La fiabilité prévisionnelle globale du système énergétique mono-source avec une	
	éolienne seulement	65
4.11	La fiabilité prévisionnelle globale du système énergétique mono-source avec un	
	photovoltaïque seulement	66
4.12	La fiabilité prévisionnelle de chaque composant du système énergétique renouve-	
	lable multi-sources	66
4.13	La fiabilité prévisionnelle globale du système énergétique renouvelable multi-sources	
		67
4.14	La disponibilité prévisionnelle de chaque composant du système énergétique re-	
	nouvelable mono-source(photovoltaïque).	68
4.15	La disponibilité prévisionnelle de chaque composant du système énergétique re-	
	nouvelable mono-source(Éolienne)	69
4.16	La disponibilité prévisionnelle de chaque composant du système énergétique re-	
	nouvelable multisource	69
4.17	La disponibilité prévisionnelle globale du systeme mono-source (Eolienne)	70
4.18	La disponibilité prévisionnelle globale du systeme mono-source (Photovoltaïque) .	70
4.19	La disponibilité prévisionnelle globale du système énergétique renouvelable multi-	
	sources	71

A1.1 Système hybride isolé à connexion série	76
A2.1 Système hybride isolé à commutation	77
A3.1 Système hybride isolé à connexion parallèle	78
C4.1 L'emplacement des essais dans le cycle de développement d'un produit	82
C6.1 Profil d'essai aggravé	83
C6.2 Les zones caractéristiques du produit.	84

Liste des tableaux

3.1	Interprétation des places du modèle de la Figure 3.12.	41
3.2	Interprétation des Transitions du modèle de la Figure 3.12	42
3.3	Interprétation des places du modèle de la Figure 3.14	43
3.4	Interprétation des transitions du modèle de la Figure 3.14	43
3.5	Interprétation des places du modèle de la Figure 3.17	47
3.6	Interprétation des transitions du modèle de la Figure 3.17	49
4.1	Les paramètres des taux de franchissements associés à chaque transition des DSPN	67
		02
4.2	Les paramètres des taux de franchissement associé à chaque transition du DSPN	02
4.2	Les paramètres des taux de franchissement associé à chaque transition du DSPN représenté la Figure 3.17	63
4.2 4.3	Les paramètres des taux de franchissement associé à chaque transition du DSPN représenté la Figure 3.17 Les valeurs de TDp et TPC	63 71

Introduction

La consommation mondiale d'énergie ne cesse d'augmenter et cette demande énergétique est principalement couverte par le recours aux énergies fossiles. Cependant l'utilisation intensive de l'énergie fossile pousse à son épuisement et provoque des conséquences néfastes sur l'environnement.par l'émission de gaz à effet de serre, principale cause du réchauffement climatique. Aussi par souci de sauvegarder les réserves d'énergies fossiles pour les générations futures et de préserver l'environnement, des solutions alternatives, à savoir le recours aux énergies renouvelables ont été développées. Ces énergies renouvelables offrent plusieurs avantages, elles sont inépuisables et leur impact sur l'environnement est beaucoup plus faible que les sources d'énergie traditionnelles. Cependant, dépendantes de l'aspect météorologique et de leur lieu d'implantation, elles souffrent d'un inconvénient majeur qui est leur intermittence. Ce caractère intermittent diminue leur efficacité énergétique lorsqu'elles sont exploitées individuellement, d'où le recours à l'utilisation de systèmes hybrides (multi-sources) combinant plusieurs sources d'énergie renouvelables.

Différents types de systèmes énergétiques (systèmes énergétiques isolés, systèmes énergétiques connectés, systèmes énergétiques mono source, systèmes énergétiques multi-sources) ont été conçus. Toutefois, plusieurs problèmes ont apparu dans la fabrication, le fonctionnement, la commande et le contrôle de ces systèmes. En effet, ces systèmes associent différentes sources (éolien, photovoltaïque, biomasse, géothermie,...) et se caractérisent entre autre par la diversité des éléments qui les constituent : éléments mécaniques (pales, actionneurs,...), chimiques (batteries), électriques (générateurs, convertisseurs) et informatiques (programmes de commande et de supervision). Cette multitude de composants et de domaines qui interagissent entre eux, confère à ces systèmes un caractère complexe et rend leur étude difficile. En effet, cette complexité entraîne des problèmes critiques de performances, avec par exemple des problèmes de disponibilité et de productivité. Pour garantir les performances de ces systèmes, une évaluation et une analyse de leur comportement est nécessaire, l'ambition étant d'assurer une continuité de service et de limiter les risques de défauts ou d'incidents qui engendrent une indisponibilité du système, par conséquent une rupture des stocks et alimentation en énergie. Il est donc fondamental de disposer de méthodes et d'outils efficaces permettant la modélisation et l'évaluation des performances de tels systèmes.

C'est dans ce contexte de sûreté de fonctionnement des systèmes énergétiques que se situent nos travaux développés dans le cadre de cette thèse. Nous nous intéressons à la détermination des performances des systèmes d'énergie renouvelables multi-sources (M-SRES), liées à leur fiabilité Nous proposons une méthodologie basée sur une technique de modélisation à base des réseaux de Pétri stochastiques et déterministes (RdPSD ou DSPN), pour étudier le comportement dynamique de ces systèmes. Le choix de cet outil de modélisation est justifié par la nature discrète de la dynamique des systèmes d'énergie renouvelables. En utilisant le modèle développé pour analyser les comportements fonctionnels et dysfonctionnels des systèmes M-SRES, nous déterminons les instants de passage d'un état de fonctionnement à un état de panne, afin de calculer leur fiabilité et disponibilité. Ensuite, le temps de production global de ces systèmes est évalué en développant des modèles mathématiques permettant de calculer la durée de défaillance et le temps d'attente de chaque composant.

Le mémoire est structuré en quatre chapitres

Dans le premier chapitre, nous présentons les différentes sources d'énergie renouvelables, telles que l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne et nous résumons les différentes technologies utilisées dans le stockage de l'énergie. Ensuite nous présentons quelques configurations de systèmes d'énergie renouvelables allant des systèmes mono sources aux systèmes multi sources avec ou sans système de stockage.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons un état de l'art sur la sûreté de fonctionnement des systèmes. Nous donnons les définitions et les concepts utilisés et nous citons les principales méthodes d'analyse de sûreté existantes, les méthodes d'analyse fonctionnelles (analyse fonctionnelle interne et analyse fonctionnelle externe) et les méthodes d'analyse dysfonctionnelles (méthodes statiques et méthodes dynamiques).

Le troisième chapitre est consacré aux réseaux de Pétri (RdP). Nous commençons par un bref rappel des notions essentielles des Rdp. Ensuite nous passons en revue leurs différentes extensions, telles que les réseaux de Pétri stochastiques généralisés (RdPSG) et les réseaux de Pétri stochastiques déterministes (RdPSD). Enfin nous décrivons la modélisation à l'aide des RdPSDs de trois exemples de systèmes d'énergie renouvelable que nous avons choisi d'étudier. Les deux premiers sont des systèmes mono sources (système photovoltaïque et système éolien) et le troisième est un système multi sources.

Le quatrième chapitre propose une application de la méthodologie proposée. Nous développons d'abord les modèles mathématiques permettant d'évaluer les performances du système étudié. Ensuite, afin d'illustrer notre méthodologie, nous avons choisi de traiter les trois exemples de systèmes d'énergie renouvelable présentés dans le chapitre précédent. La simulation des systèmes étudiés sera réalisée avec le logiciel GRIF commercialisé par l'entreprise TOTAL. Ce logiciel permet de modéliser les RdPs pour l'estimation de la fiabilité, de la disponibilité, et de la productivité des systèmes. Les résultats de simulation obtenus pour les différentes configurations étudiées sont analysés et discutés.

Chapitre 1

Systèmes énergétiques

1.1 Introduction

Dans ce chapitre, afin de mieux comprendre les enjeux liés aux systèmes énergétiques, nous présentons d'abord les sources renouvelables. Ensuite, nous résumons les différentes technologies utilisées dans le stockage de l'énergie, les convertisseurs et les bus de transmission. Puis nous nous intéressons aux systèmes hybrides combinant des sources d'énergie multiples et nous donnons quelques configurations utilisées.

1.2 Ressources renouvelables

Les énergies renouvelables sont des formes d'énergie qui proviennent d'une source renouvelable, c'est à-dire une source inépuisable qui se renouvelle de telle sorte que l'utilisation actuelle n'ait pas d'impact sur la disponibilité future. Ces ressources renouvelables sont des sources d'énergie issues de phénomènes naturels provoqués par les astres, principalement le soleil (rayonnement) et la terre (énergie géothermique). Elles représentent une alternative intéressante pour les énergies classiques (fossiles). Les quatre principales sources d'énergies renouvelables sont : le solaire, l'éolien, l'hydraulique et la géothermie.

1.2.1 L'énergie solaire

L'énergie solaire est le produit d'une conversion du rayonnement solaire en électricité et ce grâce à des panneaux photovoltaïques. Il existe deux façons d'exploiter l'électricité produite par photovoltaïque, soit sur sites isolés, soit dans le réseau électrique. Dans le premier cas, on dit que le système photovoltaïque est autonome. L'énergie produite par les panneaux photovoltaïques [1], [2] au cours de la journée peut être utilisée immédiatement ou stockée dans des batteries pour qu'elle soit exploitée la nuit ou dans le cas d'insuffisance d'énergie ou pendant un ciel partiellement couvert. Dans le deuxième cas, on parle de système connecté. L'énergie produite est acheminée directement vers le réseau électrique qui se charge de la distribuer aux consommateurs. Ce cas de configuration ne nécessite pas la présence d'un système de stockage.

1.2.1.1 Champ photovoltaïque

Un champ photovoltaïque est constitué d'un ensemble de modules élémentaires associés en série et ou parallèle afin d'obtenir un meilleur rendement. L'association série augmente la tension d'utilisation et l'association parallèle augmente le courant.

Un module photovoltaïque est composé d'un ensemble de cellules photovoltaïques.

1.2.1.2 Cellule photovoltaïque

C'est l'unité fondamentale du système de conversion d'énergie solaire en électricité. Cette électricité produite est de type continue mais elle peut être convertie en électricité de type alternative. Ce processus est basé sur le phénomène physique qui consiste à établir une force électromotrice pendant que la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

La tension fournie oscille entre 0.3 V et 0.6 V en fonction du semi conducteur employé ainsi que de sa température et du vieillissement de la cellule.

De nombreuses technologies sont utilisées pour la fabrication ces cellules photovoltaïques [3], [4] (Figure 1.1). Deux technologies principales sont : la technologies à base du silicium monocris-



Module monocristallin Module polycristallin Module silicium amorphe Module couche mince

FIGURE 1.1 – Les différentes technologies des modules photovoltaïques

tallin (Figure 1.2) avec un rendement de 14 à 18 % et la technologie à base du silicium polycristallin (Figure 1.3) offrant un rendement de 13 à 16 %. Les cellules silicium polycristallin sont les plus utilisées grâce à leur bon rapport qualité : prix.

1.2.2 L'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une énergie qui utilise le vent. L'éolienne est un dispositif destiné à transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique puis en énergie électrique. L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire, elle est dû au déplacement de masses d'air lie à l'ensoleillement de la terre. Le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres crée une différence de pression qui provoque des masses d'air en perpétuel déplacement [5].



FIGURE 1.2 – Cellule monocristalline



FIGURE 1.3 – Cellule polycristalline

L'utilisation du vent ne date pas d'aujourd'hui, c'est l'une des premières ressources naturelles à avoir été utilisée par l'homme.

Les eoliennes doivent être installées dans des espaces dégagés pour améliorer leur rendement et par mesure de sécurité elles sont éloignées des zones urbaines. Elles sont parfaitement adéquates pour une structure isolée, comme une ferme, où l'espace est disponible. Les différents éléments d'une éolienne sont conçus de manière à maximiser la conversion énergétique, pour avoir une bonne adéquation entre les caractéristiques couple /vitesse de la turbine et de la génératrice électrique[6]. Généralement, on classe les capteurs éoliens selon l'orientation de leur axe de rotation par rapport à la direction du vent. On distingue de cette manière deux types d'éolienne :

- l'éolienne à axe horizontal.

- l'éolienne à axe vertical.

1.2.3 L'énergie hydraulique

L'énergie hydraulique est l'énergie générée par le mouvement de l'eau (chutes, rivières, marées, courants marins, vagues...). La production de l'électricité à partir de la force de l'eau est une technique très ancienne et il existe différents types d'installations hydrauliques : les centrales marémotrices qui utilisent le mouvement des marées pour faire tourner des turbines, les centrales hydroélectriques qui utilisent l'énergie des cours d'eau, les hydroliennes qui se servent de l'énergie des courants marins, et l'énergie houlomotrice qui utilise l'énergie des vagues. Dans le cas d'une centrale hydraulique, le mouvement de l'eau fait tourner une turbine, qui elle-même actionne un alternateur qui produit un courant électrique alternatif.

1.2.4 L'énergie géothermique

L'idée principale du développement de cette technologie est d'exploiter l'énergie géothermique emmagasinée dans le sol afin de l'utiliser pour générer de l'électricité ou pour les besoins de chauffage. Par rapport aux autres sources d'énergie renouvelable, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (pluie, soleil, vent). En plus, la cogénération, c'està-dire la production de l'électricité en même temps que la chaleur, peut encore augmenter l'intérêt de la géothermie.

1.3 Description des différents types de systèmes de stockage

Les systèmes de stockage d'énergie sont des éléments essentiels dans les systèmes énergétiques et notamment ceux qui se situent dans les sites isolés[7], [8]. Lorsque les sources d'énergies produisent plus que la demande, l'excédent d'énergie sera stocké dans les systèmes de stockage. L'énergie stockée sera exploitée lorsque les sources d'énergie sont hors service ou en état de production insuffisante, il existe différents types de système de stockage (batteries, supercondensateurs, piles à combustible et volants d'inertie).

1.3.1 Batteries

Les batteries d'accumulateurs sont les composants les plus connus et les plus utilisés pour un stockage électrochimique de faibles dimensions[9]. Ils offrent des technologies matures et à des prix raisonnables et sont fabriqués à base d'une réaction d'oxydoréduction selon le principe de la pile afin d'emmagasiner une charge d'énergie électrique, qui peut être restituée pendant une décharge. Le rendement des batteries accumulateurs est autour de 85 % selon les types d'accumulateurs utilisés. Ces batteries sont composées de deux électrodes, l'anode et la cathode, plongées chacune dans une solution ionique et sous l'effet d'un courant de charge, une oxydation se produit au niveau des molécules de la cathode.

Il existe plusieurs technologies dans la fabrication des batteries se résumant à trois grandes familles [10], [11].

- 1. La batterie Plomb-acide : c'est le plus ancien type de stockage électrochimique rechargeable et le moins cher.
- 2. La batterie Nickel-Cadmium : elle utilise deux électrodes en oxyhydroxyde de nickel et cadmium immergées dans un électrolyte alcalin.
- La batterie Lithium : elle est couramment utilisée dans l'électronique embarquée et dans les produits de grande consommation tels que les ordinateurs, les téléphones portables et les tablettes.

1.3.2 Supercondensateurs

Les supercondensateurs s'apparentent à des condensateurs possédant une très grande capacité [12]. Un supercondensateur est constitué d'un électrolyte séparant deux électrodes fabriquées par un matériau poreux comme le charbon actif, afin d'en démultiplier la surface spécifique. Les électrodes sont connectées chacune à un collecteur d'électrons qui se charge de les faire transiter de l'une à l'autre dans le circuit électrique et ce suivant le courant de charge ou décharge. Face au déficit d'électrons dans une des électrodes et de l'excédent dans l'autre, les ions respectivement négatifs et positifs de l'électrolyte viennent s'agglomérer contre l'électrode de charge complémentaire, formant ainsi une double couche en équilibre statique à chaque électrode avec une différence de potentiel au sein de l'électrolyte.

1.3.3 Piles à combustible

La pile à combustible est considéré comme étant une solution de stockage d'avenir[13], [14]. Les piles à combustible sont utilisées dans les systèmes petite et moyenne puissance. Elles offrent un rendement autour de 60%.

1.3.4 Volants d'inertie

le volants d'inertie est considéré comme l'un des plus anciens systèmes [15]. Il est constitué d'un cylindre massif monté à l'extrémité d'une machine tournante. En mode stockage, la machine se met en mode moteur et fait tourner le volant pour emmagasiner l'énergie électrique sous forme d'énergie cinétique. En mode destockage ou restitution, la machine se comporte en génératrice et produit un courant qui va freiner le volant.

1.4 Convertisseurs

Les convertisseurs sont utilisés pour l'adaptation des sources énergétiques et sont composés de hacheur, onduleur et redresseur[16]. Un hacheur fait la conversion DC-DC, il couramment utilisé pour maximiser l'énergie délivrée par les panneaux photovoltaïques grâce à un contrôle MPPT.

C'est utilisé aussi pour adapter le niveau de tension du générateur PV à celui du bus DC. L'onduleur fait la conversion DC-AC. Il est utilisé pour adapter l'énergie produite par le photovoltaïque vers le bus AC. Redresseur fait la conversion AC-DC. Il est Utilisé pour adapter l'énergie produite par l'éolienne vers le bus DC.

1.5 Bus de transmission

Deux types de bus servent dans les systèmes énergétiques.

1.5.1 Bus AC

C'est un composant utilisé pour le transport de la puissance alternative dans les systèmes électriques[17]. L'utilisation d'un bus AC est impératif dans le cas où le système électrique est constitué d'une source d'énergie de type alternative comme l'éolienne.

1.5.2 Bus DC

Il est utilisé dans le cas où les systèmes énergétiques sont constitués de sources d'énergie qui produisent une puissance continue, le cas des photovoltaïques et des batteries[18].

1.6 Systèmes hybrides

Les systèmes énergétiques hybrides (SEH) sont des systèmes complexes à multi technologies. Ils combinent et exploitent des sources renouvelables comme des photovoltaïques, des éoliennes ou des systèmes hydrauliques. Ils peuvent également contenir des sources classiques comme des générateurs diésel ou des micro turbines à gaz. Il existe plusieurs combinaisons de systèmes hybrides selon leur structure et leur mode de fonctionnement.(Figure 1.4).

Le mode de fonctionnement

Les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes. Dans le premier groupe, on trouve les systèmes, travaillant en parallèle avec le réseau électrique. Ils sont appelés systèmes énergétiques hybrides connectés. Les systèmes hybrides du deuxième groupe fonctionnent en régime isolé ou en mode autonome. Ils répondent aux besoins des consommateurs situés dans des sites éloignés du réseau électrique.

La structure du système hybride

Trois critères peuvent être pris en compte dans le classement en fonction de la structure du système. Le premier critère est la présence ou non d'une source d'énergie classique. Un second critère est la présence ou non d'un dispositif de stockage. La dernière classification possible est celle relative au type de sources d'énergie renouvelables utilisées. La structure du système peut



FIGURE 1.4 – La classification des systèmes énergétiques hybrides.

contenir un système photovoltaïque, une éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique ou une combinaison de ces sources.

1.6.1 Systèmes hybrides avec une source classique

Nous citons trois configurations de système hybride avec une source classique.

1.6.1.1 La structure photovoltaïque / source classique

Cette structure est surtout utilisée dans les régions caractérisées par un climat chaud, comme par exemple le Maroc [19] ou les Maldives [20]. Son intérêt est de récupérer le maximum d'énergie solaire et d'assurer sans coupure la fourniture d'énergie électrique aux habitants installés dans des régions isolées [21],[22],[23],[24] (l'annexe A).

1.6.1.2 La structure éolienne / source classique

Ces systèmes sont plus répandus sur les îles ou près de la mer, où le vent favorise l'utilisation de l'énergie éolienne [25],[26],[27],[28].

1.6.1.3 La structure photovoltaïque / éolienne / diesel

Le but de ce type de structure est de minimiser l'exploitation des sources classiques en utilisant plusieurs sources énergétiques renouvelables [29],[30], [31],[32].

1.6.2 Systèmes hybrides sans source classique

Ces systèmes hybrides fonctionnent surtout en mode autonome dans des sites où l'approvisionnement en carburant diesel ou le raccordement au réseau électrique est difficile, voire même impossible. Nous présentons quatre configurations de système hybride avec ou sans stockage.

1.6.2.1 La structure photovoltaïque / système de stockage

Cette structure est utilisée dans les régions chaudes et elle est simple à installer. Cependant son inconvénient majeur réside dans son incapacité à assurer la production d'énergie électrique dans le cas où les conditions météorologiques ne sont pas favorables (la nuit, temps nuageux), d'où l'intérêt de disposer d'un système de stockage qui pourra prendre le relais en cas de non production d'énergie par le photovoltaïque. Ces structures sont généralement installées dans des maisons ou dans des villes [33],[34].

1.6.2.2 La structure éolienne / système de stockage

La combinaison entre les éoliennes et les systèmes de stockages donne des structures très efficaces dans la production et le stockage de l'énergie électrique. Un grand nombre de travaux ont été développés autour de cette structure. Nous citons à titre d'éxemple les travaux de (Nouni et all)[35], (Zhou)[36], (Zini et all)[37], (Ntziachristos et all)[38] et de (Kasseris et all)[39].

1.6.2.3 La structure photovoltaïque / éolienne / système de stockage

Contrairement ou structures précédentes, cette structure permet d'exploiter le maximum de sources renouvelables. L'objectif de cette structure est d'assurer une production sans interruption. Beaucoup de travaux ont été développé à base de cette structure. Nous citons à titre d'éxemple les travaux de (Diaf et all)[40], (Bitterlin)[41], (Dali et all)[42] et de (Azbe et all)[43].

1.6.2.4 La structure éolienne / sans système de stockage

Ce type de structure est rarement utilisé car elle n'assure pas une production d'énergie électrique d'une manière continue. Nous citons à titre d'éxemple les travaux de (Pecen et all)[44], (Tina et all)[45] et de (Urli et all)[46].

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les sources renouvelables (photovoltaïque, éolienne et station hydraulique). Ensuite, nous avons rappelé les différentes technologies utilisées dans le sto-

ckage de l'énergie, les convertisseurs et les bus de transmission. Puis nous allons intéresser aux systèmes hybrides dans le domaine dynamique et dans le domaine énergétique.

Chapitre 2

Sûreté de fonctionnement des systèmes énergétiques

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les définitions et les concepts généraux de la sûreté de fonctionnement. Plusieurs méthodes utiles à l'étude de la sûreté de fonctionnement des systèmes seront exposées.

2.2 Sûreté de fonctionnement des systèmes

Après la révolution industrielle, les systèmes deviennent de plus en plus complexes et la sûreté de fonctionnement (SdF) devient alors un domaine incontournable dans le développement de tout type de système industriel. Si auparavant, la sûreté de fonctionnement n'était utilisée que dans des secteurs à haut risque tels que l'aéronautique et le nucléaire, actuellement un grand nombre d'industriels, tous secteurs confondus, l'intègre dans leur processus de développement afin d'avoir l'assurance du respect des critères pour lesquels leur système/équipement est conçu.

Plusieurs définitions peuvent être données pour la sûreté de fonctionnement [47],[48],[49]. On peut la définir comme étant l'aptitude d'une entité à satisfaire à une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données.

Au sens large, la sûreté de fonctionnement peut également être considérée comme la science des défaillances. Elle inclut leur connaissance, leur évaluation, leur prévision, leur mesure et leur maîtrise.

La SdF désigne à la fois un ensemble de moyens et un ensemble de résultats produits par ces moyens[50]. Elle est basée sur :

- a) Des méthodes et des outils servant à caractériser et à maitriser les effets des aléas, des pannes et des erreurs.
- b) La quantification des caractéristiques des composants et des systèmes pour exprimer la conformité dans le temps de leurs comportements et de leurs actions.

2.2.1 Les composantes de la sûreté de fonctionnement

La sûreté de fonctionnement regroupé quatre composantes fondamentales : la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et la sécurité.

2.2.1.1 La fiabilité

La fiabilité notée R (Reliability) représente un concept d'aptitude à la non défaillance ou de continuité du service. Elle est caractérisée par la probabilité R(t) qu'une entité E puisse accomplir une fonction requise, dans des conditions données et pendant un intervalle de temps donné. Ainsi à l'instant t:

$$\mathbf{R}(\mathbf{t}) = \mathbf{Prob}\{ \mathbf{E} \text{ non défaillante sur } [\mathbf{0}, \mathbf{t}] \}$$
(2.1)

$$\mathbf{R}(\mathbf{t}) = \mathbf{Prob}(\mathbf{T} > \mathbf{t}) \tag{2.2}$$

Avec *T* : temps de la panne.

Son expression mathématique est donnée par l'Équation 2.3 :

$$\mathbf{R}(\mathbf{t}) = \mathbf{e}^{-\int_0^t \lambda(\mathbf{u}) d\mathbf{u}}$$
(2.3)

Qui dans le cas de la loi exponentielle ($\lambda(t) = constante$):

$$\mathbf{R}(\mathbf{t}) = \mathbf{e}^{-\lambda \mathbf{t}} \tag{2.4}$$

Où :

t : temps de mission en heure.

 λ : taux de défaillance, égal au nombre de défaillances par heure.

2.2.1.2 La disponibilité

La disponibilité notée*A* (Availability) représente un concept d'aptitude à l'emploi ou d'être prêt à l'utilisation. Elle est caractérisée par la probabilité A(t) qu'une entité *E* soit en état, à l' instant *t*, d'accomplir les fonctions requises dans des conditions données.

$$A(t) = Prob\{ E \text{ non défaillante à l' instant t} \}.$$
(2.5)

Sur le plan mathématique son expression est donnée par l'Équation 2.6 :

$$\mathbf{A}(\mathbf{t}) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \mathbf{e}^{-(\lambda + \mu)\mathbf{t}}$$
(2.6)

Où (μ) est le taux de réparation.

2.2.1.3 La maintenabilité

La maintenabilité notée M (Maintainability) représente un concept d'aptitude à la réparation. Elle est caractérisée par la probabilité M(t) que la réparation de l'entité E soit achevée au temps t, sachant que l'entité est défaillante au temps t = 0:

$$\mathbf{M}(\mathbf{t}) = \mathbf{Prob}\{ \mathbf{E} \text{ est réparable sur } [\mathbf{0}, \mathbf{t}] \}$$
(2.7)

Sur le plan mathématique son expression est donnée par l'Équation 2.8 :

$$\mathbf{M}(\mathbf{t}) = \mathbf{1} - \mathbf{e}^{-\mu \mathbf{t}} \tag{2.8}$$

2.2.1.4 La sécurité

La sécurité notée S(Safety) représente un concept d'aptitude à ne pas provoquer des accidents inacceptables. Elle est caractérisée par la probabilité S(t) que l'entité E ne laisse pas apparaître dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques.

$$S(t) = Prob\{ E \text{ évite des événements critiques sur } [0, t] \}$$
 (2.9)

2.2.2 Les métriques de la sûreté de fonctionnement

Les différents temps caractérisant la Sdf se définissent en fonction de leur état de fonctionnement : avant défaillance, entre défaillance et réparation,..., etc. La Figure 2.1 décrit ces paramètres sous forme graphique. Ces temps dépendent des probabilités d'occurrence des divers événements comme les défaillances et les réparations des composants[49]. Ce sont des variables aléatoires que l'on cherche à caractériser par leurs espérances mathématiques.

- 1 : **MTTF** (Mean Time To Failure) : est le temps moyen de bon fonctionnement avant la première défaillance.
- 2: MTBF (Mean Time Between Failure) : est le temps moyen entre deux défaillances.
- 3 : **MDT** (Mean Down Time) : est la durée moyenne de défaillance à partir de l'instant de défaillance. Comprend le temps de détection de la panne, le temps de la réparation et le temps de remise en service.
- 4: MTTR (Mean Time To Repair) : est le temps moyen de réparation.
- 5: MUT (Mean Up Time) :est la durée moyenne de bon fonctionnement après réparation.

$$\mathbf{MTTF} = \int_0^\infty \mathbf{R}(\mathbf{t}) \mathbf{dt} \tag{2.10}$$



FIGURE 2.1 – Schéma des temps moyens.

$$\mathbf{MTTR} = \int_0^\infty [\mathbf{1} - \mathbf{M}(\mathbf{t})] \mathbf{dt}$$
(2.11)

$$\mathbf{MTBF} = \mathbf{MDT} + \mathbf{MUT} \tag{2.12}$$

2.2.3 Taux de défaillance ou taux de panne

Le taux de défaillance instantané $\lambda(t)$ d'une entité E est défini comme la probabilité d'occurrence d'une défaillance de l'entité dans l'intervalle]t, t+dt] sachant qu'elle n'a pas eu de défaillance sur l'intervalle [0, t]. On peut montrer que :

$$\lambda(\mathbf{t}) = \frac{\mathbf{f}(\mathbf{t})}{\mathbf{R}(\mathbf{t})} = -\frac{1}{\mathbf{R}(\mathbf{t})} \cdot \frac{\mathbf{d}\mathbf{R}(\mathbf{t})}{\mathbf{d}\mathbf{t}}$$
(2.13)

Où f(t) est la fonction de densité de probabilité.

2.2.4 Taux de réparation

Le taux de réparation instantané $\mu(t)$ d'une entité E est défini comme la probabilité que l'entité soit réparée dans l'intervalle]t, t+dt] sachant qu'elle a été en panne sur l'intervalle [0, t]. On peut montrer que :

$$\mu(\mathbf{t}) = \frac{1}{1 - \mathbf{M}(\mathbf{t})} \cdot \frac{\mathbf{d}\mathbf{M}(\mathbf{t})}{\mathbf{d}\mathbf{t}}$$
(2.14)

2.3 Evolution de l'état d'un système dynamique au cours du temps

Tout système passe par trois états de performance au cours de son cycle de vie : état de bon fonctionnement, état dégradé, état de panne. Par mesure de simplification, l'état dégradé, dans lequel le système n'assure pas correctement sa fonction, mais n'est pas en panne est assimilé à un état de bon fonctionnement (Figure 2.2). On se ramène ainsi à un système binaire où l'état fonctionnel sera noté M et l'état de panne P(Figure 2.3).



FIGURE 2.2 – Evolution de l'etat d'un systeme dynamique au cours du temps



FIGURE 2.3 – Diagramme des phases.

2.4 Les principales lois de probabilité utilisées en Fiabilité

La durée de vie des systèmes se traduit par des lois de probabilité[51]. Deux lois sont particulièrement utilisées, la loi exponentielle et la loi de Weibull.

2.4.1 Loi exponentielle

C'est une loi continue caractérisée par un seul paramètre λ (taux de défaillance) constant[51],[52]. Cette loi est fréquemment utilisée, notamment pour les composants électroniques, car elle permet de simplifier les calculs.

La fiabilité à l'instant t, la densité de probabilité, le taux de défaillance et le MTTF sont donnés respectivement par Équation 2.15, Équation 2.16, Équation 2.17 et Équation 2.18

$$\mathbf{R}(\mathbf{t}) = \mathbf{e}^{-\lambda \mathbf{t}} \tag{2.15}$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{t}) = \lambda \mathbf{e}^{-\lambda \mathbf{t}} \tag{2.16}$$

$$\lambda(\mathbf{t}) = \lambda \tag{2.17}$$

$$\mathbf{MTTF} = \frac{1}{\lambda} \tag{2.18}$$

2.4.2 Loi de Weibull

Cette loi est bien adaptée à l'étude statistique des défaillances, en particulier de jeunesse et d'usure. Elle est utilisée dans plusieurs domaines et plus particulièrement en mécanique. C'est une loi continue caractérisée par trois paramètres β , η et γ [51].

Avec :

- a) β : le paramètre de forme ($\beta \ge 0$). Généralement (varie de 0 à 4).
- b) η : le paramètre d'échelle ($\eta \ge 0$).
- c) γ : le paramètre de position ($\gamma \ge 0$).

Elle est caractérisée par :

- La fiabilité

$$\mathbf{R}(\mathbf{t}) = \mathbf{e}^{-\left(\frac{\mathbf{t}-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}}$$
(2.19)

- La densité de probabilité

$$\mathbf{f}(\mathbf{t}) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{\mathbf{t} - \gamma}{\eta}\right)^{\beta - 1} \exp\left(-\left(\frac{\mathbf{t} - \gamma}{\eta}\right)^{\beta}\right)$$
(2.20)

- Le taux de défaillance

$$\lambda(\mathbf{t}) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{\mathbf{t} - \gamma}{\eta}\right)^{\beta - 1} \tag{2.21}$$

- La durée de vie moyenne ou MTTF

$$\mathbf{MTTF} = \gamma + \eta \cdot \Gamma \Big(\frac{1}{\beta} + 1 \Big) \tag{2.22}$$

Où Γ représente la fonction gamma définie par :

$$\Gamma = \int_0^\infty e^{-x} x^{n-1} dx \tag{2.23}$$

Cette loi a un grand avantage en sûreté de fonctionnement, du fait de ses trois paramètres qui lui permettent de s'ajuster sur des lois différentes. D'ailleurs la loi exponentielle est un cas particulier de la loi de Weibull ($\beta = 1$). Il existe d'autres lois de probabilité(Annexe B).

2.5 Les mécanismes de défaillance

L'indicateur principal du cycle de vie d'un composant est le taux de défaillance[53],[54]. Des études statistiques ont montré que d'une façon générale, le taux de défaillance suit une courbe dite « en baignoire » comme le montre la Figure 2.4.



FIGURE 2.4 – La forme baignoire

Cette courbe montre 3 phases distinctes :

- Phase 1 : période dite de jeunesse, ou de mortalité infantile. Elle se caractérise par un taux de défaillance élevé et décroissant. L'occurrence de défaillances durant cette période n'est pas aléatoire au cours du temps mais elle est plutôt le résultat de défauts de fabrication. En principe, aucun composant ne devrait être livré aux utilisateurs sans avoir au moins fonctionné pendant une durée *T j* (rodage en usine).
- 2. Phase 2 :période de vie utile. Elle est caractérisée par un taux de défaillance faible et sensiblement constant. Elle correspond à une période d'utilisation normale où les composants sont affectés par l'apparition de défauts aléatoires. Certains composants ont une courte durée de vie utile. D'autres au contraire, peuvent présenter une durée de vie de plusieurs milliers d'heures.
- 3. **Phase 3 :** période dite de vieillesse ou d'usure. Elle est caractérisée par un taux de défaillance croissant. L'occurrence de défaillances durant cette période est due à l'usure critique des composants. Aucun composant n'échappe à ce type de pannes et en principe, aucun composant ne devrait être laissé en service au-delà d'un temps Tv, car on est certain de l'imminence d'une panne.

D'une manière générale, on peut s'affranchir de l'étude dans la période de jeunesse par des tests de déverminage ou rodage (vieillissement du composant) et de l'étude dans la période d'usure, car on estime que le composant devient obsolète avant d'y arriver (soit il tombe en panne avant d'atteindre cette zone, soit il est remplacé avant).

Le déverminage est utilisé en phase de fabrication pour éliminer certains défauts de conception et a pour but de faire apparaître les pannes en usine plutôt qu'en exploitation. Deux types de déverminage sont utilisés :

- Le déverminage classique (Burn in) qui consiste à accélérer l'échelle des temps pour raccourcir le temps de jeunesse au maximum
- Le déverminage HASS [55] qui consiste à soumettre le composant à des contraintes (mécaniques, électriques, climatiques) aggravées pour éliminer ses faiblesses

Les études de sûreté de fonctionnement sont alors menées dans la période de vie utile et ceci justifie l'utilisation de la loi exponentielle. Cependant si cette loi convient bien pour les composants électroniques, elle n'est pas réaliste pour les composants mécaniques. Pour ce type de composants, il est préférable d'utiliser la loi de Weibull. Les trois périodes de la courbe en baignoire sont réduites à deux périodes comme le montre la Figure 2.5

Les Données de fiabilité

Afin de pouvoir évaluer la sûreté de fonctionnement d'un système, il nous faut connaître les données de base concernant les composants. Ce sont les probabilités de défaillance et les probabilités de réparation ou les taux de défaillance et taux de réparation. L'ensemble de ces données constituent les données de fiabilité. Ces données sont généralement obtenues par les essais et l'exploitation (retour d'expérience)(l'annexe C).



FIGURE 2.5 – La courbe du taux défaillance d'un composant mécanique

Mais il faut dire que les données de fiabilité des composants font défaut le plus souvent. En effet, peu nombreux sont les exploitants qui se donnent les moyens de recueillir et stocker ces données et encore moins de les traiter par des techniques statistiques qui peuvent fournir de précieux renseignements (taux de défaillance constant, croissant ou décroissant, ...). La plupart du temps, ce traitement se limite à l'obtention d'un taux de défaillance constant. Néanmoins, un effort a été fait pour mettre en place des bases de données de fiabilité opérationnelles. Les référentiels de prévision de fiabilité les plus répandus sont :

- Le Military Handbook (MIL-HDBK-217) : norme militaire américaine créée en 1962, conçue pour estimer la fiabilité des équipements électroniques et électromécaniques.
- Le Recueil de Fiabilité (RDF 70 puis RDF 2000 ou CNET 2000) : recueil de fiabilité construit à partir d'un retour d'expérience de France Télécom. Aujourd'hui, ce recueil a été transformé en une norme dénommée UTE C 80-810.
- Le Guide FIDES 2008 : guide de fiabilité prévisionnelle construit sur la base des recueils précédemment cités à partir du retour d'expérience d'un consortium d'industriels français. Aujourd'hui, ce recueil a été transformé en une norme dénommée UTE C 80-811.

2.6 Les méthodes d'analyse de sûreté

Lors de l'étude de sûreté de fonctionnement d'un système, l'étape de modélisation est essentielle car elle conditionne les méthodes qui seront ensuite utilisées pour analyser ses propriétés. Selon la complexité du système, on utilisera des méthodes de modélisation différentes. Ces méthodes sont selon la technique de raisonnement, soit inductives, soit déductives ou un mélange des deux.

- les méthodes inductives sont des méthodes ascendantes (bottom to top). Elles partent des causes des défaillances et remontent jusqu'aux conséquences que l'on souhaite éviter. Ce sont des approches du type " Que ce passe-t-il si? ...".
- les méthodes déductives sont au contraire des méthodes descendantes (top to bottom). On part de l'événement indésirable et on recherche toutes les causes susceptibles d'entraîner cet événement. Ce sont des approches du type " Quelle peut être la cause de?...".

Ces méthodes peuvent être également soit statiques, soit dynamiques :

- elles sont dites statiques, si le système est étudié à partir de sa structure et de sa logique de fonctionnement sans tenir compte de son évolution possible dans le temps
- elles sont dites dynamiques, si le système est étudié à partir de sa structure en tenant compte de son évolution au cours du temps.

2.6.1 Les méthodes d'analyse fonctionnelle

On distingue deux types d'analyse fonctionnelle : l'analyse fonctionnelle externe et l'analyse fonctionnelle interne.

2.6.1.1 Analyse fonctionnelle externe

L'analyse fonctionnelle externe ou l'analyse fonctionnelle du besoin (AFE) est un outil qui décrit de façon exhaustive les fonctions entre le système étudié et son environnement [56]. L'une des méthodes utilisée est la méthode APTE[57]. Cette méthode assez simple et très utilisée dans l'industrie propose un outil graphique appelé **Bête à cornes** qui donne une expression graphique du besoin et un **diagramme Pieuvre** qui permet de classer les fonctions du système.

La méthode Bête à cornes repose sur trois questions :

- a) A qui rend-il service? : il définit les bénéficiaires de système étudié.
- b) *Sur quoi agit-il?* : il définit l'environnement dans lequel le système va évoluer.
- c) *dans quel but*? : cette question doit préciser l'objet du système étudié.

La méthode **diagramme Pieuvre** classe les fonctions du système en fonction principale et fonctions contraintes. La fonction principale comprend les services qui sont sa raison d'être. Les fonctions contraintes sont les services imposés.

- FP1 : transformation de l'énergie solaire en énergie électrique.
- FP2 : conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.
- FC1 : adaptation à l'environnement (écologique).


FIGURE 2.6 – Diagramme « bête à corne d'un système multi –sources à base des ressources renouvelables (éolienne, solaire).



FIGURE 2.7 – Diagramme de pieuvre pour un système multi –sources a base de ressources renouvelables (solaire, éolienne).

- FC2 : la complexité de maintenance du système.
- FC3 : répondu aux normes mondiales de sécurité.
- FC4 : la résistance au changement climatique et aux intempéries.
- FC5 : l'entretien du système.

- FC6 : extraction de l'électricité à partir du vent.
- FC7 : le choix de position de l'installation.
- FC8 : adaptation de l'énergie produite aux matériels électriques.
- FC9 :l'entretien du système.

2.6.1.2 Analyse fonctionnelle interne

L'objectif de l'analyse fonctionnelle externe (AFI) est de déterminer toutes les fonctions internes du système. Deux méthodes sont utilisées : la méthode SADT et la méthode FAST.

La méthode SADT (Structured Analysis for Design and Technic) est une méthode descendante, dans laquelle les systèmes complexes sont considérés comme des structures composées de systèmes plus simples en interaction [58],[59]. Elle propose deux formes de représentation, les actigrammes et les datagrammes. Nous nous intéresserons uniquement aux actigrammes, forme la plus utilisée.

Le premier diagramme met en évidence la fonction globale du système appelé niveau A-0, qui est la production de l'énergie à partir des sources renouvelables (cinétique, solaire) à l'aide d'un système multi sources.(voir la Figure 2.8)



FIGURE 2.8 - Niveau A-0.

Le deuxième diagramme appelé le niveau A0, est le résultat de la décomposition du premier diagramme (niveau A - 0) en huit boites. (voir la Figure 2.9)

- a. Boite A1 : transformer les rayons solaires en énergie électrique à l'aide d'un photovoltaïque.
- b. Boite A2 : transformer l'énergie cinétique en énergie électrique à l'aide d'une éolienne.
- c. **Boite A3** : améliorer la productivité de l'énergie produite en cherchant le MTTP à l'aide d'un hacheur.
- d. Boite A4 : convertir l'énergie électrique(AC) en une énergie électrique(DC).



FIGURE 2.9 – Niveau A0.

- e. **Boite A5** : acquérir, traiter et analyser les données (données du système, données météorologiques) à l'aide d'un PC et appareils de mesure.
- f. **Boite A6** : convertir l'énergie électrique(DC) en une énergie électrique (AC) à l'aide d'un onduleur.
- g. **Boite A7** : transmettre l'énergie électrique (DC) vers l'entré d'un modulateur à l'aide d'un bus DC.
- h. Boite A8 : stocker l'énergie électrique (DC) à l'aide d'une batterie.

Le troisième diagramme appelé niveau *A*2, est le résultat de décomposition de la boite*A*2 en cinq autres boites. (voir la Figure 2.10).

- a. **Boite A21** : capter l'énergie cinétique (vent) à l'aide de pales puis la transformer en portance en couple pour acquérir de l'énergie mécanique non adapté.
- b. **Boite A22** : transmission et multiplication de la cadence dans le but d'avoir une énergie adaptée à l'aide d'un rotor
- c. **Boite A23** : convertir l'énergie mécanique adaptée en énergie électrique à l'aide d'une génératrice.
- d. **Boite A24** : acquérir les informations sur la vitesse et l'orientation du vent à l'aide d'une girouette et d'un anémomètre.
- e. **Boite A25** : analyser et traiter les données reçues par la boite A24. Il sert à commander les pales et la nacelle.



FIGURE 2.10 – Niveau A2.

Le quatrième diagramme appelé niveau *A*5, est le résultat de décomposition de la boite*A*5 en cinq boites. (voir la Figure 2.11)



FIGURE 2.11 – Niveau A5

- a. **Boite A51** : joue un rôle important, elle permet de contrôler et de surveiller le bon fonctionnement du système de production d'énergie à laide d'un PC.
- b. Boite A52 : sert à acquérir des informations et obtenir des données sur l'état météorologique.
- c. Boite A53 : permet la lecture des données.
- d. Boite A54 : sert à faire un traitement des données selon l'ordre, le besoin et la priorité.
- e. **Boite A55** : permet de donner des instructions pour avoir une production dans de bonnes conditions.

En dépit de l'explication détaillée des deux analyses fonctionnelles (interne et externe)du comportement du système, nous avons reçu aucune information sur les défaillances du système, d'où la nécessité de réaliser une analyse dysfonctionnelle qualitative qui permet de compléter les informations manquantes.

2.6.2 Les méthodes d'analyse dysfonctionnelle

Après avoir étudié le fonctionnement du système à l'aide de l'analyse fonctionnelle, laquelle il faut le noter n'apporte aucune information sur les défaillances potentielles du système, l'analyse dysfonctionnelle va nous permettre de déterminer et d'évaluer les défaillances du système. Il existe un grand nombre de méthodes d'analyse dysfonctionnelle classées en deux grandes familles : les méthodes statiques et les méthodes dynamiques.

2.6.2.1 Les méthodes statiques

Comme mentionné ci-dessus, ces méthodes ne tiennent pas compte de l'évolution possible du système dans le temps. Deux méthodes principales sont utilisées, l'arbre de défaillance et le diagramme bloc de fiabilité.

Arbre de Défaillance

L'arbre de défaillance noté AdD, appelé aussi arbre des fautes, est une méthode de type déductif, qui consiste à se fixer un évènement particulier qualifié d'indésirable ou de redouté (car on ne souhaite pas le voir se réaliser), puis à rechercher les causes et toutes les combinaisons d'évènements qui conduisent à la réalisation de cet événement. L'événement indésirable est au sommet de l'arbre d'où sa dénomination d'événement-sommet. Il s'agit de diagrammes logiques utilisant une structure arborescente[60],[61]. L'AdD permet de modéliser le système par ses ensembles minimaux (coupes minimales ou chemins minimaux). On peut dire de cette méthode que c'est une technique majeure en sûreté de fonctionnement[62],[63].

Diagramme Bloc de Fiabilité

Le diagramme bloc de fiabilité noté DBF est une méthode naturelle et simple car elle est proche de la structure physique du système. C'est la méthode la plus anciennement connue pour le calcul de la fiabilité des systèmes non réparables. Bien qu'elle puisse aussi s'appliquer aux systèmes réparables, son usage y reste limité. Elle consiste à construire un diagramme composé de blocs, chacun d'eux représentant une entité (composant ou sous-système) reliés par des lignes orientées. Un bloc qui entraîne la défaillance du système est monté en série, un bloc dont la défaillance ne provoque la défaillance du système qu'en combinaison avec d'autres blocs est monté en parallèle avec ces derniers. L'analyse d'un DBF consiste à rechercher les chemins de succès, chemins permettant d'aller de l'extrémité gauche à l'extrémité droite du diagramme, symbolisant ainsi que la fonction du système est réalisée[64],[65].

Analyse préliminaire des risques (APR)

L'analyse préliminaire des risques est une démarche dont l'objectif est d'identifier les risques inhérents au système étudié dès les premières phases de la conception. Elle est notamment utilisée dans le domaine de la sécurité des systèmes. Elle est généralement complétée par une analyse de type AMDEC.

Analyse des modes de défaillances, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC)

L'AMDEC identifie les problèmes auxquels exposent les défaillances internes du système étudié [66],[67]. Elle consiste en une analyse qualitative du système (analyse des causes et des modes de défaillance) et une évaluation quantitative (fréquence d'apparition des défaillances, gravité des défaillances)[68].

Le résultat et le contenu de l'analyse AMDEC se représentent habituellement sous la forme d'un tableau qui comporte les colonnes suivantes :

- composant ou sous-ensemble.
- modes potentiels de défaillance
- causes possibles de chaque mode de défaillance
- effets de chaque mode de défaillance sur le système
- indice de fréquence F ou probabilité d'occurrence
- indice de gravité G
- les mesures mises en place pour détecter la défaillance
- actions recommandées et/ou remarques (suggestions éventuelles...)

La criticité C est la caractéristique du couple (Probabilité d'occurrence, Gravité)[69]. On l'évalue par le produit C = FxG. Plus C est grand, plus le mode de défaillance est critique. Cette notion permet de hiérarchiser les situations entre elles et d'orienter les actions correctives.

2.6.2.2 Les méthodes dynamiques

On les appelles aussi les méthodes à temps réel dont on distingue les chaines de Markov et les réseaux de Petri.

La méthode de l'espace des états ou graphe de Markov

La méthode de l'espace des états notée MEE consiste à considérer le système comme un ensemble de composants pouvant se trouver dans un nombre fini d'états de fonctionnement et de panne. Elle consiste alors à construire un graphe formé de sommets et d'arcs. Les sommets représentent les différents états du système. Les arcs représentent les transitions entre les états, caractérisés par deux paramètres, le taux de défaillance λ et le taux de réparation μ . A chaque transition, de l'état Ei vers l'état Ej, est associé un taux de transition *Lij* défini de telle sorte que *Lij.dt* est égal à la probabilité de passer de *Ei* vers *Ej* entre deux instants très proches t et t + dt sachant qu'à l'instant t'on est en Ei.

Les chaînes de Markov à paramètre continu (CdM) sont particulièrement utilisées. Cette méthode s'appuie sur la théorie des processus stochastiques. Son principal intérêt réside dans la possibilité de pouvoir faire les calculs en fonction du temps et de modéliser certaines formes de dépendances. Cependant cette méthode souffre de l'explosion combinatoire du nombre d'états, car le processus de modélisation implique l'énumération de tous les états possibles et de toutes les transitions entre ces états [70],[71],[72]. Par exemple, le graphe de Markov associé à un système avec N composants à deux états (fonctionnement et panne) peut contenir jusqu'à 2^N états. Pour pallier ce problème, il est possible de s'orienter vers les réseaux de Pétri.



FIGURE 2.12 – Un modèle Markovien

Réseaux de Pétri

Les Réseaux de Pétri sont basés sur la théorie des automates. Ils permettent de représenter le comportement du système dans les conditions de fonctionnement normal ou de défaillances de ses composants. Ce type de modélisation est très utilisé dans les études de sûreté de fonctionnement des systèmes dynamiques. Cette méthode sera étudiée plus en détail dans le troisième chapitre.

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'état d'art de la sureté de fonctionnement des systèmes, l'évaluation des lois de probabilités, les méthodes d'analyse fonctionnelle et les mécanismes de défaillances Dans le chapitre suivant, nous allons proposer une présentation détaillée des réseaux de Petri et leurs extensions.

Chapitre 3

Modélisation des systèmes énergétiques avec les réseaux de Pétri stochastiques déterministes

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous donnons la définition et les principales caractéristiques des réseaux de Pétri. Ensuite nous présentons les réseaux de Pétri stochastiques et leurs extensions, les réseaux de Pétri stochastiques généralisés et les réseaux de Pétri stochastiques et déterministes. Enfin nous présentons trois configuration de systèmes énergétiques, qui seront utilisés dans le chapitre quatre pour illustrer notre méthodologie.

3.2 Réseaux de Pétri

3.2.1 Définition

Un réseau de Pétri (RdP) est un outil de modélisation à la fois mathématique et graphique. Comme outil mathématique, il permet d'analyser les propriétés du système et de le caractériser par un ensemble d'équations d'état. En tant qu'outil graphique, c'est un graphe constitué de places et de transitions représentées respectivement par des cercles et par des traits reliés par des arcs. Les RdP ont été développés en 1962 par le mathématicien allemand Carl Adam Pétri[73]. Aujourd'hui, ils sont particulièrement utilisés dans le domaine de la modélisation et l'étude des systèmes à évènements discrets [74],[75],[76]. L'état du système modélisé par un RdP est représenté par le marquage du réseau qui est un vecteur qui donne la distribution des jetons dans les places du réseau. L'évolution de l'état du RdP, et donc du système qu'il représente, correspond à une évolution de son marquage. Le nouveau marquage M' est défini par l'Équation 3.1.

Le RdP est décrit par un 7-Tuplé (P, T, A, M0, W, Pr, Post), [77], [78], [79] où :

- 1. $P = P1, P2, \dots, Pm$ est l'ensemble des places.
- 2. T = T1, T2, ..., Tn est l'ensemble des transitions.
- A = a1, a2,..., ai est l'ensemble des arcs. Il existe deux types d'arcs, l'arc directe présenté par le symbole (→) et l'arc inhibiteur représenté par le symbole (→).
- 4. $W = w1, w2, \dots, wi$ est l'ensemble des poids associés aux arcs.
- 5. M_0 est le marquage initial. Dans le modèle RdP d'un système, le marquage initial est déterminé par le nombre de jetons M (P) dans chaque place P.
- 6. $Pre(p_i, t_i)$ est l'application d'incidence avant, de type $P \times T \rightarrow N$. Elle correspond aux arcs allant d'une place vers une transition, comme cela est décrit par la Figure 3.1.



FIGURE 3.1 – Incidence avant

7. $Post(p_i, t_i)$ est l'application d'incidence arrière, de type $T \times P \rightarrow N$. Elle correspond aux arcs allant d'une transition vers une place, comme cela est décrit par la Figure 3.2.



FIGURE 3.2 – Incidence arrière

Les jetons, qui matérialisent l'état du réseau, peuvent passer d'une place à l'autre par franchissement d'une transition.

3.2.2 Franchissement d'une Transition

Pour rendre compte de l'évolution du système, les réseaux de Pétri intègrent un formalisme permettant de passer d'un marquage à un autre, c'est le franchissement des transitions. Le franchissement (ou le tir) d'une transition ne peut s'effectuer que si chacune des places en amont (en entrée) de cette transition contient suffisamment de jetons (supérieur ou égal au poids de l'arc correspondant). Le franchissement consiste alors à enlever à chaque place d'entrée le nombre de jetons égal au poids de l'arc d'entrée et à déposer dans les places de sortie le nombre de jetons de leurs arcs d'entrée (Figure 3.3).



FIGURE 3.3 – Exemple de franchissement : Avant le franchissement de la transition T et après le franchissement de la transition T.

$$\forall \mathbf{p} \in \mathbf{P}, \mathbf{M}'(\mathbf{p}) = \mathbf{M}(\mathbf{p}) - \mathbf{Pr}\acute{\mathbf{e}}(\mathbf{p}, \mathbf{t}) + \mathbf{Post}(\mathbf{p}, \mathbf{t})$$
(3.1)

3.2.3 Séquence de Franchissement

Une suite de franchissement pour passer d'un marquage M à un marquage M' constitue une séquence de franchissement notée S. On définit Vs le vecteur caractéristique de la séquence S en précisant pour chaque transition le nombre de fois où la transition a été franchie dans la séquence.

A titre d'exemple, on considère le réseau de Pétri de la Figure 3.5. Le marquage initial est $M_0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$. Le graphe de marquage est

$$\begin{array}{c}
T_{3} \\
M_{5} = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0] \\
T_{2} \\
M_{1} = [0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0] \\
T_{3} \\
M_{2} = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0] \\
T_{4} \\
M_{3} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1] \\
T_{5} \\
T_{1} \\
\end{array}$$



La séquence S est $(T_2, T_3, T_4, T_5, T_1)$. Le vecteur caractéristique Vs est[1, 1, 1, 1, 1].



FIGURE 3.5 – Exemple d'un RdP.

3.2.4 Représentation matricielle

En plus de la représentation graphique, le RdP dispose d'un autre outil de représentation qui est la description matricielle. Celle ci est décrite par une matrice d'incidence $W_{m\times n}$, où m et n sont respectivement le nombre de places et le nombre de transitions dans le RdP. (voir l'Équation 3.2).

$$\mathbf{W} = \mathbf{W}^+ - \mathbf{W}^- = [\mathbf{w}_{ij}] \tag{3.2}$$

Avec :

 W^+ : est la matrice d'incident avant.

$$\mathbf{W}^{+} = [\mathbf{w}_{ij}^{+}] = \begin{cases} \operatorname{Post}(\mathbf{P}_{i}, \mathbf{T}_{j}) &, & \operatorname{si} \quad \mathbf{T}_{j} \in {}^{\circ}\mathbf{P}_{i} \\ 0 &, & \operatorname{sinon} \end{cases}$$
(3.3)

 W^- : est la matrice d'incident arrière.

$$\mathbf{W}^{-} = [\mathbf{w}_{ij}^{-}] = \begin{cases} \mathbf{Pr}\dot{\mathbf{e}}(\mathbf{P}_{i}, \mathbf{T}_{j}) &, \quad \mathbf{si} \quad \mathbf{T}_{j} \in \mathbf{P}_{i}^{\circ} \\ \mathbf{0} &, \quad \mathbf{sinon} \end{cases}$$
(3.4)

Avec les notions suivantes :

- . $^{\circ}T_j = \{p_i \in P | Pre(p_i, T_j)\} > 0 = \text{ensemble des places d'entrées de } T_j$
- . $T_j^{\circ} = \{p_i \in P | Post(p_i, T_j)\} > 0 = ensemble des places de sorties de T_j$
- . ° $p_i = \{T_j \in T | Post(p_i, T_j)\} > 0$ = ensemble des transitions d'entrées de p_i
- . $p_i^{\circ} = \{T_j \in T | Pré(p_i, T_j)\} > 0 = \text{ensemble des transitions de sorties de } p_i$

On calcule la matrice d'incidence de l'exemple donné dans la Figure 3.6.

$$\mathbf{W}^{-} = \left(\begin{array}{ccc} 1 & 0 \\ 3 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{array} \right)$$

$$\mathbf{W}^{+} = \left(\begin{array}{ccc} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 2 & 0 \\ 1 & 0 \end{array} \right)$$

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ -3 & 0 \\ 2 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$



FIGURE 3.6 – Exemple de RdP .

3.2.5 Equation fondamentale

L'équation fondamentale permet de calculer le nouveau marquage (M) à partir du marquage initial (M_0), du vecteur caractéristique (V_s) et de matrice incidente (W).

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_0 + \mathbf{W}\mathbf{V}_\mathbf{S} \tag{3.5}$$

3.2.6 Propriétés de base d'un RdP

Nous distinguons deux types de propriétés des réseaux de Pétri, les propriétés comportementales qui sont dépendantes du marquage et les propriétés structurelles qui sont indépendantes du marquage.

3.2.6.1 Propriétés comportementales

Ces propriétés dépendent à la fois du marquage initial M_0 et de la structure du réseau. Il s'agit ici de faire ressortir les propriétés dynamiques du système, et si nous changeons ce marquage rien ne garantit que les propriétés tiennent encore.

RdP borné

Avant de parler de RdP borné (Équation 3.6), nous définir la place bornée. Une place P_i est dite bornée pour un marquage initial M_0 si pour tout marquage accessible à partir de M_0 le nombre de jetons dans P_i est fini.

$$\forall \mathbf{p}_i \in \mathbf{P}, \qquad \exists \mathbf{k} \in \mathbf{N} \qquad \text{telque} \qquad \forall \mathbf{M} \in \mathbf{A}(\mathbf{R}, \mathbf{M}_0), \qquad \mathbf{M}(\mathbf{p}_i) \leq \mathbf{k} \tag{3.6}$$

Avec : $A(R, M_0)$ est le nombre de marquage accessible. Un RdP est borné pour un marquage initial M0 si toutes ses places sont bornées pour M0.

RdP vivant

Une transition T est vivante pour un marquage initial M_0 si pour tout marquage M accessible à partir de M_0 , il existe une séquence de franchissement qui utilise T. Un RdP est vivant (sans blocage) pour un marquage initial M_0 lorsque toutes ses transitions sont vivantes pour M_0 . D'une autre manière, aucune transition ne sera pas définitivement infranchissable (Équation 3.7).

$$\forall \mathbf{p}_i \in \mathbf{P}, \qquad \exists \mathbf{S} : \mathbf{M}_0 \xrightarrow{\mathbf{S}} \mathbf{M} \qquad \text{telque} \qquad \mathbf{M} \subset \mathbf{S} \tag{3.7}$$

RdP quasi vivant

Une transition T est quasi vivante pour un marquage initial M_0 quand il existe une séquence de franchissements à partir de M_0 contenant T (Équation 3.8.

$$\exists \mathbf{S}, \exists \mathbf{M} \in \mathbf{A}(\mathbf{R}, \mathbf{M}_0) \quad \text{telque}: \quad \mathbf{M}_0 \stackrel{\mathbf{S}}{\longmapsto} \mathbf{M} \quad \mathbf{T} \in \mathbf{S}$$
(3.8)

0



FIGURE 3.7 – Exemple d'un conflit structurel



FIGURE 3.8 – Exemple d'un conflit effectif

Un RdP est quasi vivant pour un marquage initial M_0 si toutes ses transitions sont quasi vivantes pour ce marquage initial.

RdP pseudo-vivant

Un RdP est dit pseudo vivant si son évolution à partir de marquage initial, est telle qu'il existe au moins une transition T qui puisse être tirée.

RdP sauf (ou binaire)

Un RdP est un RdP sauf pour un marquage initial M_0 si pour un marquage accessible, chaque place contient au plus un jeton. Un RdP sauf est borné.

RdP réinitialisable

Un RdP est considéré réinitialisable si pour tout marquage M accessible à partir du marquage initial M_0 il existe une séquence S de franchissements qui permet de revenir au marquage initial M_0 (Équation 3.9).

$$\forall \mathbf{M} \in \mathbf{A}(\mathbf{R}, \mathbf{M}_0), \exists \mathbf{S} \qquad \text{telque} \qquad \mathbf{M} \stackrel{\mathbf{S}}{\longmapsto} \mathbf{M}_0 \tag{3.9}$$

c

Conflit

Un réseau de Pétri est dit sans conflit si et seulement si toute place a au plus une transition de sortie. Un conflit structurel correspond à l'existence d'une place Pi qui a au moins deux transitions de sortie Ti et Tj (Figure 3.7). Dans ce cas, le tir de l'une des transitions va bloquer le tir de l'autre transition(Figure 3.8).



FIGURE 3.9 – Exemple d'un graphe d'état

3.2.6.2 Propriétés structurelles

Les propriétés structurelles dépendent uniquement de la structure du réseau et sont indépendantes du marquage. Il s'agit ici de faire ressortir les propriétés statiques du système.

Graphe d'états

Un RdP est un graphe d'états si toute transition *T* du RdP a une place d'entrée et une place de sortie, comme représenté dans la Figure 3.9.

Graphe d'événements

Le graphe d'événements semblable à un graphe d'états à la seule différence qu'ici on parle et non de transition. Un RdP est un graphe d'événements lorsque toute place a une transition d'entrée et une transition de sortie, comme présenté dans la Figure 3.10



FIGURE 3.10 – Exemple d'un graphe d'évènement

RdP simple

Dans ce type de RdP, toutes les transitions ne peuvent être concernées que par un conflit au plus.

RdP pur

Un RdP est pur s'il n'existe aucune transition telle qu'une des places d'entrée soit également place de sortie.

RdP sans boucle

RdP sans boucle est le contraire de RdP tel qu'il existe une transition T_j et une place P_i qui est à la fois place d'entrée et place de sortie de T_j , alors T_j à au moins une autre place d'entrée.

3.3 Extensions des réseaux de Pétri

Les Rdp ont fait l'objet de plusieurs développements depuis leur apparition, intégrant particulièrement l'aspect stochastique. Nous présentons dans les paragraphes suivants quelques extensions.

3.3.1 Réseaux de Pétri stochastiques (SPN)

Les réseaux de Pétri stochastiques sont le fruit des travaux de Molloy [80], à l'Université de Californie (Etats Unis) et de Natkin [81], au Conservatoire National des Arts et Métiers de Paris (France). Les réseaux de Pétri stochastiques sont caractérisés par l'étude des phénomènes aléatoires et représentés par des transitions stochastiques dont les délais associés aux transitions sont aléatoires avec une distribution exponentielle.

De nombreuses classes de réseaux de Pétri stochastiques ont été développées. Nous citons les réseaux de Pétri stochastiques généralisés (GSPN) et les réseaux de Pétri stochastiques et déterministes (DSPN)[82].

3.3.2 Réseaux de Pétri stochastiques généralisés (GSPN)

Cette classe a été introduite par Ajmone Marsan [83], [84]. Le réseau se compose de transitions avec une temporisation nulle dites transitions immédiates et de transitions avec une temporisation aléatoire distribuée exponentiellement dites transitions stochastiques.

3.3.3 Réseaux de Pétri stochastiques et déterministes (RdPSD ou DSPN)

Cette classe a été également introduite par Ajmone Marsan [85], [86]. C'est une extension des réseaux de Pétri stochastiques généralisés. Le réseau contient des transitions immédiates (Ti), des transitions à temporisations déterministes (Td) et des transitions à temporisations stochastiques (Te) distribuées suivant des lois exponentielles.

3.4 Application des RdPs à la modélisation des systèmes énergétiques

Dans ce paragraphe, nous décrivons la modélisation à l'aide des RdPSDs de trois exemples de systèmes d'énergie renouvelable que nous avons choisi d'étudier. Les deux premiers sont des systèmes mono sources (système photovoltaïque et système éolien) et le troisième est un système multi sources [87],[88].

3.4.1 Un système énergétique mono source (Eolienne)

Ce système est composé d'une éolienne, reliée à un bus DC par un convertisseur AC/DC. Le bus DC est relié à une charge par un redresseur ou un onduleur (voir la Figure 3.11). Le modèle fonctionnel et dysfonctionnel du système à base d'un RdPSD est décrit dans la Figure 3.12.



FIGURE 3.11 – Système énergétique mono source (Eolienne)

L'interprétation des places et des transitions de ce DSPN est donnée respectivement dans le Tableau 3.1 et le Tableau 3.2. Dans la Figure 3.12, nous montrons qu'un système mono source (éolienne) est dans un état d'attente(p1) ou de panne (p3), le convertisseur AC / DC, l'onduleur et le bus DC stagnent dans leurs états d'attente (p4, p10) et dans leur état libre (p7), la charge reste déconnectée (p14). Le franchissement de la transition T1 permettra de passer des jetons de place p1 vers la place p2, ce qui signifie que l'éolienne passe de l'état d'attente vers l'état de fonctionnement, représenté par la place (p2). Le convertisseur AC / DC, l'onduleur et le bus DC les transmettront également à la condition de fonctionnement dans un état occupé p5, p11, p8 respectivement. Ce passage va influencer directement la charge qui va passer vers l'état connecté p13. Si l'éolienne est en état d'attente (repos) ou de panne et que le bus DC est en panne ou si le convertisseur AC / DC, est en panne, la charge sera automatiquement déconnectée.

3.4.2 Un système énergétique mono source (Photovoltaïque)

Pour ce système le photovoltaïque est relié directement au bus DC lui même relié à une charge par un onduleur (Figure 3.13). Le modèle fonctionnel et dysfonctionnel du système est représenté par le DSPN de la Figure 3.14. L'interprétation des places et des transitions de ce DSPN est donnée respectivement dans le Tableau 3.3 et le Tableau 3.4. Dans la Figure 3.14, le jeton qui se trouve dans la place (P0) indique l'état d'attente du photovoltaïque. Le bus DC et l'onduleur sont respectivement dans l'état libre (P5) et l'état d'attente (P6). La charge reste dans l'état déconnectée (P10). L'activation de la transition T1 va pousser le photovoltaïque à l'état de fonctionnement (P1). Ce fonctionnement va influer sur le bus DC et ion du ler qui passent respectivement vers l'état occupé (P4) et l'état de fonctionnement (P7).Aprés le tir de la transition (T14), la charge passe vers l'état connecté (P9). Si l'un des composants suivants : Le photovoltaïque, le bus DC ou l'onduleur sont en état de panne représentés par les places P2, P3, P8, la charge restera dans la situation déconnectée.



FIGURE 3.12 – DSPN du système illustré dans la Figure 3.11.

Place	Signification		
P1	L'état d'attente de l'éolienne		
P2	L'état de fonctionnement de l'éolienne		
Р3	L'état de panne de l'éolienne		
P4	L'état d'attente du convertisseur (AC/DC)		
P5	L'état de fonctionnement du convertisseur (AC/DC)		
P6	L'état de panne du convertisseur (AC/DC)		
P7	Le bus DC est libre		
P8	Le bus DC est occupé		
Р9	Le bus DC est en panne		
P10	L'état d'attente de l'onduleur		
P11	L'état fonctionnel de l'onduleur		
P12	L'état de panne de l'onduleur		
P13	La charge est à l'état connecté		
P14	La charge est à l'état déconnecté		

 TABLE 3.1 – Interprétation des places du modèle de la Figure 3.12.

Transition	Туре	Signification	
T1	Stochastique	Passage de l'état d'attente vers l'état fonctionnel de l'éo-	
		lienne	
T2	Stochastique	Retour de l'éolienne de l'état fonctionnel vers l'état d'at-	
		tente	
T3	Stochastique	Passage de l'éolienne de l'état fonctionnel vers l'état de	
		panne	
T4	Stochastique	Réparation de l'éolienne	
T5	Stochastique	Passage de l'état d'attente vers l'état fonctionnel du conver-	
		tisseur (AC/DC)	
T6	Stochastique	Retour du convertisseur (AC/DC) de l'état fonctionnel vers	
		l'état d'attente	
Τ7	Stochastique	Passage du convertisseur (AC/DC) de l'état fonctionnel	
		vers l'état de panne	
T8	Stochastique	Réparation du convertisseur (AC/DC)	
Т9	Stochastique	Passage de bus DC de l'état fonctionnel vers l'état de panne	
T10	Stochastique	Réparation de bus DC	
T11	Stochastique	Retour du bus DC de l'état occupé vers l'état libre	
T12	Stochastique	Passage du bus DC de l'état libre vers l'état occupé	
T13	Stochastique	Passage de l'onduleur vers l'état fonctionnel	
T14	Stochastique	Retour de l'onduleur vers l'état d'attente	
T15	Stochastique	Passage de l'onduleur de l'état fonctionnel vers l'état de	
		panne	
T16	Stochastique	Réparation de l'onduleur	
T17	Immédiate	Déconnection de la charge	
T18	Immédiate	Connexion de la charge	

 TABLE 3.2 – Interprétation des Transitions du modèle de la Figure 3.12.



FIGURE 3.13 – Système énergétique mono-source (photovoltaïque).

Place	Signification		
P0	L'état d'attente de photovoltaïque		
P1	L'état de fonctionnement de photovoltaïque		
P2	L'état de panne de photovoltaïque		
P3	Le bus DC est en panne		
P4	Le bus DC est occupé		
P5	Le bus DC est à l'état libre		
P6	L'onduleur est en attente		
P7	L'onduleur est en état de fonctionnement		
P8	Etat de panne de l'onduleur		
Р9	La charge est connectée		
P10	La charge est déconnectée		

TABLE 3.3 – Interprétation des places du modèle de la Figure 3.14.

Transition	Туре	Signification		
T1	Stochastique	Passage de l'état d'attente vers l'état fonctionnel du photo-		
		voltaïque		
T2	Stochastique	Retour du photovoltaïque de l'état fonctionnel vers l'état		
		d'attente		
Т3	Stochastique	Passage du photovoltaïque de l'état fonctionnel vers l'état		
		de panne		
T4	Stochastique	Réparation du photovoltaïque		
T5	Stochastique	Passage vers l'état de panne du bus DC		
Τ6	Stochastique	Réparation du bus DC		
Τ7	Stochastique	Retour du bus DC de l'état occupé vers l'état libre		
T8	Stochastique	Passage du bus DC de l'état libre vers l'état occupé		
Т9	Stochastique	Retour de l'onduleur vers l'état d'attente		
T10	Stochastique	Passage de l'onduleur de l'état d'attente vers l'état fonction-		
		nel		
T11	Stochastique	Passage de l'onduleur vers l'état de panne		
T12	Stochastique	Réparation de l'onduleur		
T13	Immédiate	Passage vers l'état déconnecté de la charge		
T14	Immédiate	Passage vers l'état connecté de la charge		

 TABLE 3.4 – Interprétation des transitions du modèle de la Figure 3.14.

3.4.3 Système énergétique multi sources

D'une façon générale, un système énergétique multi sources est constitué de quatre blocs (Figure 3.15). Le premier bloc comprend les différentes sources d'énergies liées à la production



FIGURE 3.14 – RdPSD du système illustré dans la Figure 3.13.

d'énergie électrique. Le second bloc est constitué des dispositifs de transmission, tels que le bus de transmission et l'onduleur. Le troisième bloc est constitué des différents types de stockage d'énergie telle que la batterie. Le quatrième bloc est le bloc de consommation qui rassemble les consommateurs.

La Figure 3.16 décrit le système d'énergie renouvelable multi-sources à étudier. Il est constitué d'un module photovoltaïque, d'une éolienne, d'un onduleur, d'un convertisseur (AC / DC), d'un bus DC et d'un système de stockage d'énergies (batterie). Tous ces composants sont connectés à une charge.

Le DSPN correspondant à ce système est donné en Figure 3.17. Les Tableau 3.5 et Tableau 3.6 donnent l'interprétation des places et des transitions.

La Figure 3.17 monte qu'avant le début de la production, le module photovoltaïque, l'éolienne, le convertisseur AC / DC et l'onduleur sont en état d'attente, représenté par la présence d'un jeton



FIGURE 3.15 – Représentation globale de système énergétique multi sources.



FIGURE 3.16 – Système énergétiques multi sources.

aux places (p0), (p3), (p6), (p12) respectivement, de telle sorte que le bus DC est à l'état libre (p9) et la batterie dans l'état d'attente (p22). Cette situation empêche la charge de se connecter. Lorsque l'une ou les deux transitions (T1), (T5) sont activées, l'éolienne et le photovoltaïque passent à l'état de production, représenté par (p1) et (p4). Cette opération aura une influence direte sur les autres composants du système. Le bus DC qui passe vers l'état occupé (p10) après le tir des transitions (T13, T14, T15, T16, T17, T18, T19, T20, T21, T22 et T23), Le convertisseur AC / DC et l'onduleur passent également vers l'état fonctionnel (p7, p13). La charge passe de l'état déconnecté (p16) à l'état connecté (p15) après le déclenchement de la transition T42. Le fonctionnement du module photovoltaïque et de léolien séparément ou des deux en même temps, permet le passage de la



FIGURE 3.17 – RdPSD du système illustré dans la Figure 3.16.

batterie à l'état de charge représenté par p21, afin de stocker l'énergie supplémentaire. Lorsque le jeton est en place (p17), la charge de la batterie atteint sa valeur maximale. La batterie arrête de charger (p20) lors du passage du module photovoltaïque et de l'éolienne à l'état de panne (p2, p5) ou à l'état d'attente (p0, p3). Dans ce cas, la batterie assure l'alimentation en énergie.

Place	Signification
P0	L'état d'attente du photovoltaïque
P1	L'état de fonctionnement du photovoltaïque
P2	L'état de panne du photovoltaïque
Р3	L'état d'attente de l'éolienne
P4	L'état de fonctionnement de l'éolienne
Р5	L'état de panne de l'éolienne
P6	L'état d'attente du convertisseur (AC/DC)
P7	L'état de fonctionnement du convertisseur (AC/DC)
P8	L'état de panne du convertisseur (AC/DC)
Р9	Le bus DC est libre
P10	Le bus DC est occupé
P11	Le bus DC est en panne
P12	L'état d'attente de l'onduleur
P13	L'état de fonctionnement de l'onduleur
P14	L'état de panne de l'onduleur
P15	La charge est à l'état connecté
P16	La charge est à l'état déconnecté
P17	Valeur max de charge de la batterie (<i>V max</i>)
P18	Valeur <i>Vmin</i> < <i>V</i> 0 < <i>Vmax</i>
P19	Valeur min de décharge de la batterie (Vmin)
P20	Arrêt de l'état de charge de la batterie
P21	L'état de charge de la batterie
P22	L'état d'attente de la batterie
P23	Arrêt de l'état de décharge de la batterie
P24	L'état de décharge de la batterie
P25	L'état de panne de la batterie

TABLE 3.5 – Inter	prétation d	es places	du modèle	e de la	Figure 3.	17.
-------------------	-------------	-----------	-----------	---------	-----------	-----

Transition	Туре	Signification	
T1	Stochastique	Passage de l'état d'attente vers l'état fonctionnel du photo-	
		voltaïque	
T2	Stochastique	Retour du photovoltaïque de l'état fonctionnel vers l'état	
		d'attente	
T3	Stochastique	Passage du photovoltaïque de l'état fonctionnel vers l'état	
		de panne	
Τ4	Stochastique	Réparation du photovoltaïque	

Transition	Туре	Signification		
T5	Stochastique	Passage de l'état d'attente vers l'état fonctionnel de l'éo-		
		lienne		
T6	Stochastique	Retour de l'éolienne de l'état fonctionnel vers l'état d'at-		
		tente		
T7	Stochastique	Passage de l'éolienne de l'état fonctionnel vers l'état de		
		panne		
T8	Stochastique	Réparation de l'éolienne		
Т9	Stochastique	Passage de l'état d'attente vers l'état fonctionnel du conver-		
		tisseur AC/DC		
T10	Stochastique	Retour du convertisseur (AC / DC) de l'état fonctionnel		
		vers l'état d'attente		
T11	Stochastique	Passage du convertisseur (AC / DC) de l'état fonctionnel		
		vers l'état de panne		
T12	Stochastique	Réparation du convertisseur (AC / DC)		
T13,,T23	Stochastique	Passage du bus DC de l'état libre vers l'état occupé		
T24	Stochastique	Retour du bus DC de l'état occupé vers l'état libre		
T25	Déterministe	Passage de la batterie de l'état de charge vers l'état d'arrêt		
T26	Stochastique	Réparation de la batterie		
T27	Stochastique	Passage de la batterie vers l'état de panne		
T28	Stochastique	Passage de la batterie vers l'état de charge		
T29	Stochastique	Retour de la batterie vers l'état d'attente		
T30	Stochastique	Retour de la batterie vers l'état d'attente		
T31	Stochastique	Passage de la batterie vers l'état de décharge		
T32	Stochastique	Passage de la batterie vers l'état de panne		
T33	Stochastique	Réparation de la batterie		
T34	Immédiate	Retour de la batterie vers l'état de décharge		
T35	Déterministe	Passage de la batterie de l'état de décharge vers l'état arrêté		
T36	Immédiate	Retour vers l'état de charge de la batterie		
T37	Stochastique	Passage de la valeur de la charge (V) de Vmin vers <i>Vmin</i> <		
		V < V max		
T38	Stochastique	Retour de la valeur de la charge (V) de $Vmin < V < Vmax$		
		vers Vmin		
T39	Stochastique	Passage de la valeur de la charge (batterie) (V) de Vmin <		
		V < V max vers $V max$		
T40	Stochastique	Retour de la valeur de la charge (batterie) (V) de <i>V max</i> vers		
		Vmin < V < Vmax		
T41	Immédiate	Désactivation de la charge		
T42	Immédiate	Activation de la charge		

Transition	Туре	Signification	
T43	Stochastique	Réparation de l'onduleur	
T44	Stochastique	Passage de l'onduleur de l'état fonctionnel vers l'état de	
		panne	
T45	Stochastique	Retour de l'onduleur vers l'état d'attente	
T46	Stochastique	Passage de l'onduleur vers l'état fonctionnel	
T47	Stochastique	Passage du bus DC vers l'état de panne	
T48	Stochastique	Réparation du bus DC	

TABLE 3.6: Interprétation des transitions du modèle de la Fi-gure 3.17.

3.5 Conclusion

Après avoir présenté les réseaux de Pétri et leurs extensions, nous avons montré comment modéliser des systèmes énergétiques à l'aide des réseaux de Pétri stochastiques et déterministes.

Chapitre 4

Méthodes d'estimation des performances des systèmes énergétiques mono et multi sources

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous développons d'abord les modèles mathématiques permettant de calculer la durée de défaillance et le temps d'attente de chaque composant, afin d'estimer la fiabilité, la disponibilité et le temps de production global du système étudié. Ensuite, afin d'illustrer notre méthodologie, nous traitons à l'aide du logiciel de simulation GRIF les trois exemples de systèmes d'énergie renouvelable étudiés dans le chapitre précédent et nous présentons les résultats de simulation obtenus.

4.2 Evaluation des performances

4.2.1 Evaluation de la fiabilité et de la disponibilité

Nous représentons le comportement d'un composant élémentaire par trois états (attente, fonctionnel, panne) et le passage d'un état à un autre est décrit par le franchissement de transitions. Ce comportement est schématisé par le DSPN de la Figure 4.1. Si le temps t1 représente l'instant de la première panne, le passage du composant d'un état fonctionnel ou état d'attente (=1 binaire) à un état de panne (=0 binaire) et d'un état de panne à un état fonctionnel est illustré par laFigure 4.2. La fiabilité R(t) d'un système composé de n composants de fiabilité Ri est donnée par l'Équation 4.1.

La fiabilité R(LD) et la disponibilité A(LD) à tout instant LD sont données par les Équation 4.2 et l'Équation 4.3.

- **P** w : État d'attente (état de repos).
- **Pf** : État fonctionnel.



FIGURE 4.1 – DSPN élémentaire d'un composant.

- **Pb** : État de panne.
- T1 : Passage de l'état d'attente vers l'état fonctionnel
- T2 : Retour à l'état d'attente.
- T3 : Passage de l'état fonctional à l'état de panne.
- T4 : Réparation.

Évaluation de la fiabilité

La fiabilité R (t) d'un système composé de n composants de fiabilité (r_i) , est donnée par l' Équation 4.1 et Équation 4.2.

$$\mathbf{R}(t) = \begin{cases} \prod_{i=1}^{n} \mathbf{r}_{i}(t) ; & \text{système série} \\ 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - \mathbf{r}_{i}(t)) ; & \text{système parallèle} \end{cases}$$
(4.1)

$$\mathbf{R}(\mathbf{L}\mathbf{D}) = \begin{cases} \mathbf{1} & ; & \mathbf{s}\mathbf{i} & \mathbf{L}\mathbf{D} < \mathbf{t}_1 \\ \left(\frac{\mathbf{t}_1}{\mathbf{L}\mathbf{D}}\right) & ; & \mathbf{s}\mathbf{i} & \mathbf{L}\mathbf{D} \ge \mathbf{t}_1 \end{cases}$$
(4.2)

Évaluation de la disponibilité

La disponibilité A(t) d'un système composé de n composants est donnée par l'Équation 4.3.



FIGURE 4.2 – Description du comportement d'un composant.



4.2.2 Evaluation du temps de production

Le temps de production est lié au temps de fonctionnement total, à la durée de la panne et au temps d'attente. Ce paramètre est un facteur important dans l'étude des performances d'un système; il permet de donner une lecture très détaillée de l'état de production de chaque composant. Le temps de production (TdP) d'un composant et le temps de production total (Pt) du système sont calculés comme suit :

$$TdP = O_t - (T_{panne} + T_{attente})$$
(4.4)

$$\mathbf{P}_{\mathbf{t}} = \mathbf{O}_{\mathbf{t}} - (\mathbf{D}_{\mathbf{f}} + \mathbf{D}_{\mathbf{w}}) \tag{4.5}$$

où O_t est le temps de fonctionnement, correspondant au temps de simulation du système étudié; T_{panne} est la durée de défaillance du composant.

 $T_{attente}$ est le temps d'attente du composant.

 D_f est la durée totale de défaillance du système.

 D_w est le temps total d'attente du système.

4.2.3 Evaluation du taux de productivité

Le taux de productivité est le rapport entre le temps de production et le temps d'exploitation. Le taux de productivité (TPC) d'un composant et le taux de productivité global (TPG) du système sont calculés par les Équation 4.6 et Équation 4.7.

$$\Gamma PC = \frac{TdP}{O_t}$$
(4.6)

$$TPG = \frac{P_t}{O_t}$$
(4.7)

4.3 Calcul des temps de panne et temps d'attente

Le calcul de la durée totale de défaillance (Df) et du temps d'attente total (Dw) dépend de l'architecture du système à étudier (série, parallèle,....). A cet effet, nous utilisons les notations suivantes :

- 1. Ψ_{z_n} : est la durée de panne du composant z_n , elle correspond à la longueur de l'intervalle du temps de séjour du jeton dans la place de panne dans le DSPN qui modélise ce composant.
- 2. χ_{z_n} : est la durée d'attente du composant z_n , elle correspond à la longueur de l'intervalle du temps de séjour du jeton dans la place d'attente dans le DSPN qui modélise ce composant.

- i : 1,..., n est le nombre de composants en série.

- u : 1,..., m est le nombre de composants en parallèle.

- j : 1,..., w est le énième état de panne du composant.
- k : 1,..., l est le énième état d'attente du composant.

La Figure 4.3 décrit la durée du temps de panne et la durée du temps d'attente des différents composants d'un système donné.

Ce graphique est divisé en deux sous-ensembles. Le premier sous-ensemble représente le cas où il n'y a pas de chevauchement entre les différentes durées de panne (ou attente)des composants

CHAPITRE 4. MÉTHODES D'ESTIMATION DES PERFORMANCES DES SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES MONO ET MULTI SOURCES



Avec intersection

FIGURE 4.3 – Illustration des durées du temps de panne et du temps d'attente des différents composants d'un système .

, c'est à dire sans intersection. Dans ce sous-ensemble, il n'ya qu'une seule panne(ou attente) pour un temps donné.

Le deuxième sous-ensemble représente le cas où il y a un chevauchement entre les différentes durées de panne (ou attente) des composants, c'est à dire avec intersection. Ce chevauchement est divisé en deux parties : la première est le chevauchement complet où une durée de panne domine les autres durées de panne. La seconde est le chevauchement par croisement et il y a une seule intersection entre les durées de panne.

4.3.1 Cas d'un système série

Dans un système à topologie série (Figure 4.4), les composants sont dépendants l'un de l'autre, la panne d'un composant affectera le fonctionnement du système. Nous distinguons deux cas possibles.

- Le premier est le cas où il n'ya pas de panne ou d'attente pendant la période de fonctionnement.
 Dans ce cas, le temps total de panne ou le temps total d'attente est égal à zéro; le système est fonctionnel pendant toute la durée de fonctionnement.
- Dans le second cas, la durée totale de panne (ou temps total d'attente) est égale à l'union des

durées de panne (ou temps d'attente) des différents composants.



FIGURE 4.4 – Système série.

Exemple 1 d'application

On considère un système composé de trois composants placés en série. Dans le cas sans intersection, le temps de panne et le temps d'attente du système sont calculés comme suit :

- Dans le cas sans intersection, le temps de panne ou d'attente du système est :

$$D_f = (\Psi_{Z_{11}} + \Psi_{Z_{21}} + \Psi_{Z_{31}}) + (\Psi_{Z_{12}} + \Psi_{Z_{22}} + \Psi_{Z_{32}})$$
$$= \bigcup_{i=1}^{3} \Psi_{Z_{i,1}} + \bigcup_{i=1}^{3} \Psi_{Z_{i,2}}$$
$$= \sum_{k=1}^{2} \bigcup_{i=1}^{3} \Psi_{Z_{i,k}}$$

$$D_w = (\chi_{Z_{11}} + \chi_{Z_{21}} + \chi_{Z_{31}}) + (\chi_{Z_{12}} + \chi_{Z_{22}} + \chi_{Z_{32}})$$
$$= \bigcup_{i=1}^3 \chi_{Z_{i,1}} + \bigcup_{i=1}^3 \chi_{Z_{i,2}}$$
$$= \sum_{k=1}^2 \bigcup_{i=1}^3 \chi_{Z_{i,k}}$$

- Dans le cas avec intersection, le temps de panne et le temps d'attente du système sont calculés comme suit :

$$D_w = (\chi_{Z_{21}} + \chi_{Z_{32}})$$
$$= \sum_{j=1}^2 \bigcup_{i=1}^3 \chi_{Z_{i,j}}$$

$$D_f = (\Psi_{Z_{21}} + \Psi_{Z_{32}})$$
$$= \sum_{j=1}^2 \bigcup_{i=1}^3 \Psi_{Z_{i,j}}$$

Dans le cas général d'un système série à composants multiples, nous obtenons les Équation 4.8 et Équation 4.9.

$$\mathbf{D}_{f} = \begin{cases} 0 ; & \text{si } j = 0. \\ \sum_{j=1}^{w} \bigcup_{i=1}^{n} \Psi_{z_{i,j}} , & \text{si } j = 1, \cdots, w \end{cases}$$
(4.8)

$$\mathbf{D}_{\mathbf{w}} = \begin{cases} \mathbf{0} & ; \quad \mathbf{si} \quad \mathbf{k} = \mathbf{0}. \\ \sum_{k=1}^{l} \bigcup_{i=1}^{n} \chi_{\mathbf{z}_{i,j}} & , \quad \mathbf{si} \quad \mathbf{k} = \mathbf{1}, \cdots, \mathbf{l} \end{cases}$$
(4.9)

4.3.2 Cas d'un système parallèle

Dans un système parallèle (Figure 4.5), les composants sont indépendant les uns des autres, de façon à ce que la panne d'un composant ne bloque pas le fonctionnement du système. Nous distinguons deux cas :

- Le premier cas : quand les durées de pannes ou d'attentes ne sont pas simultanées, toute la durée de panne ou d'attente du système est égale à zéro.
- Dans le deuxième cas : où la durée de panne ou d'attente des composants est simultanée. A ce moment, toute la durée de panne ou d'attente est égale à la somme des temps d'intersection pour la panne ou l'attente.

Exemple 2 d'application

On considère un système composé de trois composants placés en parallèle.

- Dans le cas sans intersection : le temps de panne ou attente du système est :

$$D_f = 0$$
 s
 $D_w = 0$ s



FIGURE 4.5 – Système parallèle.

- Dans le cas avec intersection : le temps de panne ou attente du système est :

$$D_f = \sum_{j=1}^2 \bigcap_{u=1}^3 \Psi_{Z_{j,u}}$$

$$D_w = \sum_{k=1}^2 \bigcap_{u=1}^3 \chi_{Z_{k,u}}$$

Dans le cas général d'un système parallèle à composants multiples, nous obtenons les Équation 4.10 et Équation 4.11.

$$\mathbf{D}_{\mathbf{f}} = \begin{cases} \mathbf{0} \quad ; \quad \mathbf{si} \quad \bigcap_{u=1}^{m} \Psi_{Z_{u}} = \emptyset. \\ \mathbf{Y} = \sum_{j=1}^{w} \bigcap_{u=1}^{m} \Psi_{Z_{u,j}} \quad ; \quad \mathbf{si} \quad \bigcap_{u=1}^{m} \Psi_{Z_{u}} = \mathbf{a}_{j} \quad \mathbf{et} \quad \mathbf{Y} = \sum_{j=1}^{w} \mathbf{y}_{j} \end{cases}$$
(4.10)
$$\mathbf{D}_{\mathbf{w}} = \begin{cases} \mathbf{0} \quad ; \quad \mathbf{si} \quad \bigcap_{u=1}^{m} \chi_{Z_{u}} = \emptyset. \\ \mathbf{Y} = \sum_{k=1}^{l} \bigcap_{u=1}^{m} \chi_{Z_{u,k}} \quad ; \quad \mathbf{si} \quad \bigcap_{u=1}^{m} \chi_{Z_{u}} = \mathbf{q}_{k} \quad \text{et} \quad \mathbf{Q} = \sum_{k=1}^{l} \mathbf{q}_{k} \end{cases}$$
(4.11)

4.3.3 Cas d'un système série / parallèle

Un système série / parallèle est constitué de m étages en parallèle, chaque étage Ej étant constitué d'un nombre nj d'éléments en série (voir Figure 4.6). Pour calculer le temps de panne et le temps d'attente, nous décomposons le système, ensuite nous évaluons le bloc série à l'aide des Équation 4.8 et Équation 4.9 et le bloc parallèle à l'aide des Équation 4.10 et Équation 4.11.

Deux cas sont possibles : Le premier cas se présente lorsque l'intersection de l'union des durées de panne ou d'attente des composants n'est pas simultanée; cela implique que la durée totale de panne du système est égale à zéro.

Le second cas se présente lorsque ces durées de panne ou d'attente sont simultanées de sorte que la durée globale de panne ou d'attente du système est égale à l'intersection de l'union des durées de panne ou d'attente.

Les expressions de la durée totale de défaillance Df et du temps total d'attente Dw du système sont données par les Équation 4.12 et Équation 4.13.

$$D_{f} = \begin{cases} 0 ; si \bigcap_{u=1}^{m} \bigcup_{i=1}^{n} \Psi_{Z_{i,u}} = \emptyset. \\ A = \sum_{j=1}^{w} \bigcap_{u=1}^{n} \bigcup_{i=1}^{u} \Psi_{Z_{i,u,j}} ; si \bigcap_{u=1}^{m} \bigcup_{i=1}^{n} \Psi_{Z_{i,u}} = a_{j} et A = \sum_{j=1}^{w} a_{j} \end{cases}$$
(4.12)
$$D_{w} = \begin{cases} 0 ; si \bigcap_{u=1}^{m} \bigcup_{i=1}^{n} \chi_{Z_{i,u}} = \emptyset. \\ A = \sum_{k=1}^{l} \bigcap_{u=1}^{m} \bigcup_{i=1}^{n} \chi_{Z_{i,u,j}} ; si \bigcap_{u=1}^{m} \bigcup_{i=1}^{n} \chi_{Z_{i,u}} = a_{j} et A = \sum_{k=1}^{w} a_{l} \end{cases}$$
(4.13)

4.3.4 Cas d'un système parallèle / série

Un système parallèle / série est constitué de m étages en série, chaque étage Ej étant constitué d'un nombre nj d'éléments en parallèle (voir figure Figure 4.7). Pour calculer le temps de panne et le temps d'attente, nous décomposons le système, ensuite nous évaluons le bloc parallèle à l'aide des Équation 4.10 et Équation 4.11 et le bloc série à l'aide des Équation 4.8 et Équation 4.9.

Il existe deux cas possibles : Dans le premier cas, il n'y a pas d'état de panne ou d'attente des composants. la durée totale de panne ou d'attente du système est alors égale à zéro. Dans le



FIGURE 4.6 – Système série/ parallèle.

deuxième cas, il existe des états de panne ou d'attente des composants. La durée totale de panne ou d'attente du système est égale à l'union des intersections des durée de panne ou d'attente des composants..

Les expressions de la durée totale de défaillance Df et du temps total d'attente Dw du système sont données par les Équation 4.14 et Équation 4.15.

$$\mathbf{D}_{\mathbf{f}} = \begin{cases} \mathbf{0} \quad ; \quad \mathbf{si} \quad \mathbf{j} = \mathbf{0}. \\ \sum_{j=1}^{\mathbf{w}} \bigcup_{i=1}^{n} \bigcap_{\mathbf{u}=1}^{m} \Psi_{Z_{\mathbf{u},i,j}} \quad ; \quad \mathbf{si} \quad \mathbf{j} = \mathbf{1}, \dots, \mathbf{w}. \end{cases}$$
(4.14)

$$\mathbf{D}_{\mathbf{w}} = \begin{cases} \mathbf{0} ; & \mathbf{si} \quad \mathbf{k} = \mathbf{0}. \\ \sum_{k=1}^{l} \bigcup_{i=1}^{n} \bigcap_{\mathbf{u}=1}^{m} \chi_{\mathbf{Z}_{\mathbf{u},i,k}} ; & \mathbf{si} \quad \mathbf{k} = \mathbf{1}, ..., \mathbf{l}. \end{cases}$$
(4.15)

4.4 Application

Pour illustrer notre méthodologie, nous avons choisi d'étudier les trois exemples de systèmes d'énergie renouvelable présentés dans le chapitre précédent et afin de réaliser la simulation de ces systèmes, nous avons implémenté l'ensemble des formulations présentées dans ce chapitre dans le logiciel de simulation GRIF.



FIGURE 4.7 – Système parallèle/série.

4.4.1 Données de simulation

Nous allons effectuer une simulation pendant 83220 heures (9.5 ans). Notons que, les paramètres choisis pour les réseaux de Petri de la Figure 3.12, Figure 3.14 et la Figure 3.17 qui sont représentées dans le chapitre 3 sont décrits dans les Tableau 4.1 et Tableau 4.2[88].

Nous avons utilisé le logiciel de simulation (**Grif**) pour obtenir les instants de passage de chaque composant à partir de l'état fonctionnel à l'état de panne. Plus tard, les équations développées serons employées pour évaluer la fiabilité prévisionnelle et d'autres indicateurs d'exécution présentés dans ce travail.

4.4.2 Résultats de la simulation

La Figure 4.8 montre que la fiabilité prévisionnelle du bus DC et du convertisseur AC/DC reste à 100% pendant toute la durée de la simulation. Quant aux deux autres composants (éolienne et onduleur), ils voient leur fiabilité diminuer en raison du franchissement des transitions représentant le passage vers l'état de panne à t = 11986, 7 h (1, 37 ans) pour l'éolienne et t= 35232, 1 h (4, 02 ans) pour l'onduleur.

Dans la Figure 4.9 , la fiabilité prévisionnelle du bus DC reste à 100% durant toute la durée de la simulation, alors que la fiabilité des deux autres composants (onduleur et photovoltaïque) reste stable à 100% jusqu'à t= 20353.7 h (2.32 ans) pour l'onduleur et t = 67195.4 h (7.67 ans) pour le photovoltaïque. Ensuite elle diminue en raison du franchissement des transitions du passage vers l'état de panne.

CHAPITRE 4. MÉTHODES D'ESTIMATION DES PERFORMANCES DES SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES MONO ET MULTI SOURCES

Figure 3.12	Figure 3.14	
$\lambda 1: 0,9 occ \cdot h^{-1}$	$\lambda 1: 5 occ \cdot h^{-1}$	
$\lambda 2: 0, 1 occ \cdot h^{-1}$	$\lambda 2:$ 0,05 $occ \cdot h^{-1}$	
T3 paramtres d'chelle et forme: 9,987.10 ³ et 3,9	$\lambda 3: 1,985.10^{-5}$ 0,05 $occ \cdot h^{-1}$	
$\mu4: 0,00211855 \ occ \cdot h^{-1}$	μ 4: 8,33.10 ⁻³ occ · h ⁻¹	
$\lambda 5: 10 occ \cdot h^{-1}$	$\lambda 5:$ 4,83.10 ⁻⁸ occ · h ⁻¹	
$\lambda 6: 2 occ \cdot h^{-1}$	$\lambda 6:$ 5,21.10 ⁻³ occ · h ⁻¹	
$\lambda 7: 9,51.10^{-6} occ \cdot h^{-1}$	$\lambda 7:$ 2,2 $occ \cdot h^{-1}$	
$\mu 8:$ 2,78.10 ⁻³ occ $\cdot h^{-1}$	$\lambda 8:$ 12 $occ \cdot h^{-1}$	
$\lambda 9:$ 4,83.10 ⁻⁸ occ · h ⁻¹	$\lambda 9:$ 2 $occ \cdot h^{-1}$	
$\mu 10:$ 5, 21.10 ⁻³ occ $\cdot h^{-1}$	$\lambda 10: 10 occ \cdot h^{-1}$	
$\lambda 11:$ 2,2 $occ \cdot h^{-1}$	$\lambda 6: 9,51.10^{-6} occ \cdot h^{-1}$	
$\lambda 12:$ 12 $occ \cdot h^{-1}$	$\mu 12:$ 2,78.10 ⁻³ $occ \cdot h^{-1}$	
$\lambda 13: 10 occ \cdot h^{-1}$		
$\lambda 14:$ 2 $occ \cdot h^{-1}$		
$\lambda 15:$ 9,51.10 ⁻⁶ occ $\cdot h^{-1}$		
$\mu 16:$ 2,78.10 ⁻³ $occ \cdot h^{-1}$		

TABLE 4.1 – Les paramètres des taux de franchissements associés à chaque transition des DSPNreprésentés sur les Figure 3.12 et Figure 3.14



FIGURE 4.8 – La fiabilité prévisionnelle de chaque composant pour le système énergétique monosource, avec une éolienne seulement (système représenté dans la Figure 3.11 du chapitre 3)

Figure 3.17 $\lambda 1: 5 occ \cdot h^{-1}$ $\lambda 2: 0,09 \quad occ \cdot h^{-1}$ $\lambda 3: 1,985.10^{-5} occ \cdot h^{-1}$ μ 4: 8,33.10⁻³ occ · h^{-1} $\lambda 5: 0,9 \quad occ \cdot h^{-1}$ $\lambda 6: 0, 1 \quad occ \cdot h^{-1}$ (T7) paramtres d'chelle et forme: $9,987.10^3$ et 3,9 $\mu 8: 0,00211855 \ occ \cdot h^{-1}$ $\lambda 9: 10 \quad occ \cdot h^{-1}$ $\lambda 10: 2 \text{ occ} \cdot h^{-1}$ $\lambda 11: 9,51.10^{-6} occ \cdot h^{-1}$ $\lambda 12:$ 2,78.10⁻³ $occ \cdot h^{-1}$ $\lambda 1 3 \cdots \lambda 2 3$: 12 $occ \cdot h^{-1}$ $\lambda 24: 2,2 \quad occ \cdot h^{-1}$ $(T25) \cdot d = 2$ h $\lambda 26:$ 5, 2.10⁻³ occ · h⁻¹ $\lambda 27: 5.10^1 \ occ \cdot h^{-1}$ $\lambda 28: \quad 0,1 \quad occ \cdot h^{-1}$ $\lambda 29: 0.3 \quad occ \cdot h^{-1}$ 0,4 $occ \cdot h^{-1}$ $\lambda 30:$ $\lambda 31: 0,1 \quad occ \cdot h^{-1}$ $\lambda 32: 5.10^1 \ occ \cdot h^{-1}$ μ 33: 5,2.10⁻³ occ · h^{-1} (T35) = 3 h $\lambda 37: 0.5 \quad occ \cdot h^{-1}$ $\lambda 38: 0,7 \quad occ \cdot h^{-1}$ $\lambda 39: 0,9 \quad occ \cdot h^{-1}$ $\lambda 40: 0, 8 \quad occ \cdot h^{-1}$ $\mu 43: 2,78.10^{-3} occ \cdot h^{-1}$ $\lambda 44: 9,51.10^{-6} occ \cdot h^{-1}$ $\lambda 45: \quad 2 \quad occ \cdot h^{-1}$ $\lambda 46: 10 \quad occ \cdot h^{-1}$ $\lambda 47:$ 4.83.10⁻⁸ occ · h⁻¹ $\mu 48:$ 5, 21.10⁻³ occ $\cdot h^{-1}$

TABLE 4.2 – Les paramètres des taux de franchissement associé à chaque transition du DSPN re-présenté la Figure 3.17



FIGURE 4.9 – La fiabilité prévisionnelle de chaque composant pour le système énergétique monosource, avec le photovoltaïque seulement (système représenté dans la Figure 3.13) du chapitre 3)

La fiabilité prévisionnelle globale du système énergétique mono-source avec éolienne, représentée dans la Figure 4.10, est stable à la valeur 100% pendant la durée de 1.37 années. Ensuite elle diminue pour atteindre la valeur de 6% après 9.5 ans de fonctionnement (83220 h). Sur la Figure 4.11 on voit que la fiabilité prévisionnelle globale du système énergétique monosource avec photovoltaïque est stable à la valeur 100% pendant la durée de 2.32 années, ensuite elle diminue pour atteindre la valeur de 19,75% après 9.5 ans de fonctionnement.

La Figure 4.12 correspondant au systemes muti sources indique que la fiabilité prévisionnelle du bus DC, du module photovoltaïque et de la batterie est de 100% durant toute la durée de simulation en raison de l'absence de franchissement des transitions modélisant le passage vers l'état de panne, par contre les autres composants sont stables à la valeur 100% jusqu'à t = 16293h (1.86ans) pour l'éolienne, t =19622.4 h (2.24 ans) pour l'onduleur, et t = 77438.4h (8.84 ans) pour l'AC/DC. Ces valeurs correspondent au point où la fiabilité de ces composants devient décroissante en raison du franchissement des transitions qui indiquent le passage vers des états de panne de ces composants.

Si nous voulons, par exemple calculer la fiabilité prévisionnelle de l'éolienne à t = 6 ans (52560h), le graphique de simulation de la Figure 4.12 nous donne 31% et nous pouvons montrer que retrouvons le même résultat à l'aide de l'Équation 4.2.



FIGURE 4.10 – La fiabilité prévisionnelle globale du système énergétique mono-source avec une éolienne seulement

Pour la fiabilité prévisionnelle globale du système, représentée dans la Figure 4.13, elle est à 100% jusqu'à t = 1.86 ans, puis, en raison de l'absence de panne pour cette période, elle diminue jusqu'à ce qu'elle atteigne une fiabilité de 5.05% après 9.5 ans de fonctionnement (83220 h). En ce qui concerne la disponibilité :

La Figure 4.14 correspondant au système mono source (photovoltaïque) indique que la disponibilité prévisionnelle du bus DC est de 100% durant toute la durée de simulation en raison de l'absence de franchissement des transitions modélisant le passage vers l'état de panne, par contre le photovoltaïque subit deux états de panne à t=67195,4 h et 72573,5 h suivis respectivement de deux états de réparation à 67220,4 h et 72681,6 h. L'onduleur présente une disponibilité prévisionnelle égale à 100% jusqu'à t=20353,7 h (2,32 ans), correspondant au franchissement de la première transition de panne, sa disponibilité descend jusqu'à 95,85%, puis remonte après réparation pour atteindre la valeur de 99,1% à t= 9.5 ans de fonctionnement.

La Figure 4.15 correspondant au système mono source (éolienne) indique que la disponibilité prévisionnelle du bus DC et de redresseur AC/DC est de 100% durant toute la durée de simulation en raison de l'absence de franchissement des transitions modélisant le passage vers l'état de panne, par contre l'éolienne subit sept états de panne à t= 11986,7 h, 24702,1 h, 37772,4 h, 45563,1 h, 54988,5 h, 68401,3 h et 81449,9 h suivis respectivement de sept états de réparation à t= 12356,5



FIGURE 4.11 – La fiabilité prévisionnelle globale du système énergétique mono-source avec un photovoltaïque seulement



FIGURE 4.12 – La fiabilité prévisionnelle de chaque composant du système énergétique renouvelable multi-sources



FIGURE 4.13 – La fiabilité prévisionnelle globale du système énergétique renouvelable multisources

h, 25057,4 h, 37908,5 h, 46685,9 h, 55459,2 h, 69165,3 h et 81676,1 h. L'onduleur subit deux états de panne à t=35232,1 h et 82157 h suivis de deux états de réparation à t=35821,9 h et t= 82798,9 h.

La Figure 4.16 La montre que d'une part, la disponibilité prévisionnelle du module photovoltaïque, du bus DC et de la batterie est stable (égale à 100%) pendant toute la durée de simulation. Cela est du à l'absence de franchissement des transitions modélisant le passage vers l'état de panne. D'autre part, l'éolienne subit quatre états de panne à t=16253 h, t=32903,6 h, 48823 h et t=68026,6 h suivis respectivement de quatre états de réparation à t=16450,9 h, t=34051,6 h, 48839,1 h et t=69435 h. Le convertisseur AC/DC présente une disponibilité prévisionnelle égale à 100% jusqu'à t=77439,9 h (8,84 ans), correspondant au franchissement de la première transition de panne, sa disponibilité descend alors jusqu'à 99,45%. Il est ensuite réparé à t= 77853,3 h (8,88 ans), correspondant au franchissement de la transition de réparation. L'onduleur présente une disponibilité prévisionnelle égale à 100% jusqu'à t=19639,4 h (2,24 ans), correspondant au franchissement de la première transition de panne, sa disponibilité descend jusqu'à 99,2%, puis remonte après réparation pour atteindre la valeur de 99,8% à t= 9.5 ans de fonctionnement.

La disponibilité prévisionnelle globale du système énergétique mono-source avec éolienne, représentée dans la Figure 4.17, est stable à la valeur 100% pendant la durée de 1,37 années. Ensuite elle diminue accuse de la présence de la panne dans les instants t= 1,37 ans, 2,82 ans, 4,31 ans, 5,2 ans, 6,28 ans, 7,81 ans, 9,3 ans et 9,38 ans. Puis elle va connaître une augmentation à chaque instant de réparation t=1,41 ans, 2,86 ans, 4,33 ans, 5,33 ans, 6,33 ans, 7,9 ans, 9,33 ans et 9,45 ans.



FIGURE 4.14 – La disponibilité prévisionnelle de chaque composant du système énergétique renouvelable mono-source(photovoltaïque).

La disponibilité prévisionnelle globale du système énergétique mono-source avec photovoltaïque, représentée dans la Figure 4.18, est stable à la valeur 100% pendant la durée de 2,32 années. Ensuite elle diminue accuse de la présence de la panne dans les instants t=2,32 ans, 7,67 ans et 8,28 ans. Puis elle va connaître une augmentation à chaque instant de réparation t=2,41 ans, 7,68 ans et 8,3 ans.

La disponibilité prévisionnelle globale du système énergétique mono-source avec éolienne, représentée dans la Figure 4.19, est stable à la valeur 100% pendant la durée de 1,86 années. Ensuite elle diminue accuse de la présence de la panne dans les instants t= 1,86 ans, 2,24 ans,3,67 ans, 5,57 ans, 7,77 ans et 8,84 ans. Ensuite elle diminue accuse de la présence de la panne dans les instants t=1,88 ans, 2,26 ans, 3,89 ans, 5,58 ans, 7,93 ans et 8,89 ans.

4.4.3 Evaluation des performances à 8760 h

Nous allons nous intéresser au fonctionnement du système multi-sources durant la première année et nous déterminons le temps de production (TdP) et le taux de productivité (TPC) de chaque composant ainsi que le temps de production global (Pt) et le taux de productivité global (TPG) du système. En utilisant la simulation et les équations 4.1 à 4.16 proposées précédemment, nous obtenons les résultats suivants(sous-section 4.4.3 et Tableau 4.4.3) :



FIGURE 4.15 – La disponibilité prévisionnelle de chaque composant du système énergétique renouvelable mono-source(Éolienne).



FIGURE 4.16 – La disponibilité prévisionnelle de chaque composant du système énergétique renouvelable multisource



FIGURE 4.17 – La disponibilité prévisionnelle globale du systeme mono-source (Eolienne)



FIGURE 4.18 – La disponibilité prévisionnelle globale du systeme mono-source (Photovoltaïque)



FIGURE 4.19 – La disponibilité prévisionnelle globale du système énergétique renouvelable multisources

Composant	(TdP)	(TPC)
Module photovoltaïque	7494.74 h	85.58 %
Eolienne	6046.26 h	69.02%
Bus DC	8423.25 h	96.16%
AC/DC	6251.89 h	71.37%
Onduleur	8473.43 h	96.73%
Batterie	1178.62 h	13.45%

TABLE 4.3 – Les valeurs de TDp et TPC

Système	(Pt)	(TPG)
Système énergétique renouvelable multi- sources Figure 3.16	8268.63 h	94.4 %

TABLE 4.4 – Les valeurs de Pt et TPG

4.4.4 Analyse des résultats

L'analyse des différents résultats de la simulation nous permettent de déduire que d'une part, le système mono-source photovoltaïque présente une meilleure fiabilité et une meilleure disponibilité que le système mono-source éolien et que d'autre part, la fiabilité des composants est plus grande que la fiabilité globale du système pour chacun des systèmes étudiés. La présence de plusieurs composants dans un système énergétique influe négativement sur la fiabilité et la disponibilité globales. De ce fait, le système mono-source photovoltaïque constitué d'un nombre de composants inférieur par rapport aux système mono-source éolienne et systèmes mulisources (photovoltaïque et éolienne) donne une meilleure fiabilité et disponibilité.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la méthodologie que nous avons développée pour déterminer la fiabilité, la disponibilité et le temps de production des trois configurations étudiées. Ensuite, afin d'illustrer notre méthodologie, nous avons traité à l'aide du logiciel de simulation GRIF les trois exemples de systèmes d'énergie renouvelable étudiés dans le chapitre précédent et nous avons présenté les résultats de simulation obtenus.

Conclusion générale

Les travaux que nous avons menés dans le cadre de cette thèse constituent une contribution au domaine de la sureté de fonctionnement des systèmes énergétiques. Après avoir décrit les différentes sources d'énergies renouvelables pour la production de l'électricité et donné les concepts généraux de la sureté de fonctionnement, nous avons proposé une méthodologie basée sur les réseaux de Pétri stochastiques et déterministes, pour évaluer la fiabilité, la disponibilité et le temps de production global d'un système industriel d'énergie renouvelable.

La méthodologie est basée tout d'abord sur une analyse qualitative comprenant une analyse fonctionnelle et une analyse dysfonctionnelle, permettant la mise en évidence des modes de défaillance, vient ensuite l'analyse quantitative pour l'évaluation des performances.

Afin d'illuster notre méthodologie, nous avons choisi d'étudier trois exemples de systèmes d'énergie renouvelable. Les deux premiers sont des systèmes mono sources (systèmes photovoltaïque et système éolien) et le troisième est un système multi sources combinant un système photovoltaïque et un système éolien. Les systèmes ont été traités avec le logiciel de simulation GRIF commercialisé par l'entreprise TOTAL. Les résultats de simulation obtenus pour les différentes configurations étudiées montrent que le système énergétique mono-source photovoltaïque a une meilleure fiabilité et disponibilité par rapport aux système énergétique mono-source éolienne et système énergétique multi-sources(photovoltaïque et éolienne).

La fiabilité des composants est plus importante comparativement à celle de la fiabilité globale. Aussi, la disponibilité globale des composants est plus performante par rapport à la disponibilité globale.

La présence de plusieurs composants dans un système énergétique influe négativement sur la fiabilité et la disponibilité globales. De ce fait, le système mono-source photovoltaïque constitué d'un nombre de composants inférieur par rapport aux système mono-source éolienne et systèmes mulisources (photovoltaïque et éolienne) donne une meilleure fiabilité et disponibilité.

Perspectives

Dans notre travail, nous nous sommes limités à la simulation. La méthodologie que nous avons développée permet d'estimer la fiabilité prévisionnelle et la disponibilité prévisionnelle. Il serait utile de la compléter par une étude de la fiabilité opérationnelle et de la disponibilité opérationnelle qui sera faite sur un système réel. Nous nous sommes focalisés uniquement sur deux composants de la sureté de fonctionnement (la fiabilité et la disponibilité). Les autres composantes de la sureté de fonctionnement (la maintenabilité, la durabilité,...) devraient être étudiées afin de réaliser une étude complète des systèmes énergétiques à base des sources renouvelables (photovoltaïque et éolienne).

Annexe A Les différentes structures des systèmes photovoltaïques hybrides

Les systèmes autonomes contiennent souvent des dispositifs de stockage (généralement des batteries). Les batteries et le champ photovoltaïque produisent du courant continu. Par contre, les moteurs diesel peuvent entrainer des générateurs continus ou alternatifs. Mais la consommation domestique exige le plus souvent du courant alternatif. C'est pour cette raison il est souvent nécessaire d'ajouter au système un onduleur. On distingue les structures suivantes : connexion série et connexion commutation et connexion parallèle.

A1 Connexion série

Dans cette structure, l'énergie produite par le générateur diesel est fournie à la charge. La connexion peut être directe (dans le cas d'un générateur de courant continu) ou à travers un redresseur. Lorsque l'énergie produite par le champ photovoltaïque et l'énergie stockée sont suffisantes pour répondre à la demande de la charge, le générateur diesel est hors service. La structure de principe d'un systèmes avec une telle configuration est représenté dans la figure(A1.1).

Les avantages de cette structure de système sont :

- Grâce à l'onduleur, on peut obtenir différentes forme du courant (sinusoïdal, carré,...).
- L'interruption de l'alimentation de la charge ne dépend pas de la mise en marche du générateur diesel.
- Le système électrique est simplifié à cause d'une absence de commutation des sources d'énergie en courant alternatif.

Les inconvénients sont :

- L'onduleur ne peut pas travailler en parallèle avec le générateur diesel.
- La durée de vie de la batterie est diminuée à cause le grand nombre des cycles charge décharge.
- La grande capacité de la batterie.
- Le rendement total du système est faible à cause des pertes de conversion.



FIGURE A1.1 – Système hybride isolé à connexion série

• La panne de l'onduleur provoque l'arrêt complet de l'alimentation.

A2 Connexion commutation

Cette structure est souvent utilisée malgré ses limitations opérationnelles. Le consommateur peut être alimenté soit par le générateur diesel, soit par l'onduleur alimenté par le photovoltaïque ou la batterie mais le fonctionnement en parallèle n'est pas encore possible pour l'instant. La batterie peut être chargée par le photovoltaïque et le générateur diesel. Comme cette structure est complexe il faut utiliser une gestion automatique. La structure du système est présenté sur la figure(A2.1). Les avantages sont :

- L'onduleur peut fournir une tension de différentes formes.
- Le générateur diesel peut alimenter directement la charge, ce qui augmente le rendement du système.

Les inconvénients sont :

- L'apparition d'une coupure instantanée de l'alimentation lors de la commutation des sources.
- Une construction complexe.
- Le générateur et l'onduleur sont dimensionnés pour la consommation maximale de la charge, ce qui réduit leurs rendements en fonctionnement à faible charge.



FIGURE A2.1 – Système hybride isolé à commutation

A3 Connexion parallèle

Dans la configuration parallèle, toutes les sources peuvent alimenter la charge séparément à faible et moyenne demande. L'onduleur bi-directionnel peut fonctionner avec plusieurs formes, soit comme un redresseur lorsqu'il y a un excès d'énergie produite par le diesel pour charger la batterie, soit comme un onduleur, pour transférer l'énergie fournie par le champ photovoltaïque ou par la batterie vers la charge. Le schéma d'une telle structure est représenté sur la figure(A3.1).

Les avantages sont :

- Une avarie d'onduleur bi-directionnel ne provoque pas de coupure de l'alimentation de la charge.
- Le besoin d'une maintenance du diesel est réduit.
- Les composants du système ne doivent pas être dimensionnés pour la charge totale, parce que la charge peut être alimentée par les deux sources en même temps.

Les inconvénients sont :

- Le contrôle automatique est nécessaire pour le fonctionnement du système.
- L'onduleur bi-directionnel doit fournir une tension sinusoïdale, pour que la synchronisation avec le générateur diesel soit possible.
- Les batteries vieillissent rapidement.
- Il faut des personnes qualifiées.



FIGURE A3.1 – Système hybride isolé à connexion parallèle.

Annexe B D'autres lois de probabilité

B3.1 Loi normale ou loi de GAUSS

La loi normale (ou loi gaussienne) est très répandue parmi les lois de probabilité car elle s'applique à de nombreux phénomènes. En fiabilité, la distribution normale est utilisée pour représenter la distribution des durées de vie dans la partie de vieillissement car le taux de défaillance est toujours croissant. La loi normale est définie par deux paramètres : la moyenne (μ) et l'écart type (σ).

1. La densité de probabilité :

$$\mathbf{f}(\mathbf{t}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \mathbf{e}^{-\frac{1}{2}(\frac{\mathbf{t}-\mu}{\sigma})^2}$$
(B3.1)

2. La fonction de répartition :

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{t} e^{-\frac{1}{2}(\frac{t-\mu}{\sigma})^{2}} \cdot \mathbf{dx}$$
(B3.2)

3. La durée de vie moyenne ou MTTF :

$$\mathbf{MTTF} = \mu \tag{B3.3}$$

4. La fiabilité est calculée de la manière suivante :

$$\mathbf{R}(\mathbf{t}) = \mathbf{1} - \mathbf{\Phi}(\frac{(\mathbf{t} - \mu)}{\sigma})$$
(B3.4)

D'où Φ est la fonction de répartition de la loi normale, $u = \frac{t-\mu}{\sigma}$, centrée $\mu = 0$ réduite $\sigma = 1$:

$$\mathbf{\Phi} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{\mathbf{u}} e^{-\frac{1}{2} (\frac{\mathbf{t} - \mu}{\sigma})^2} \cdot \mathbf{dx}$$
(B3.5)

B3.2 Loi Uniforme

Utilisable en générale pour la fiabilité dans les essais bayésiens en l'absence de connaissances pour construire l'information a priori. La densité de probabilité d'une loi uniforme sur un intervalle [a, b] s'écrit :

$$f(t) = \frac{1}{b-a} \tag{B3.6}$$

La fonction de répartition :

$$F(t) = \frac{t-a}{b-a} \tag{B3.7}$$

B3.3 Loi Gamma

C'est une loi qui mesure le temps d'attente avant la survenance de N événements aléatoires dans un processus de poison. Elle généralise l'exponentielle.

1. La densité de probabilité :

$$f(t) = \frac{t^{n-1}e^{-\frac{t}{b}}}{b^n\Gamma(n)}$$
(B3.8)

2. Le taux de défaillance :

$$\lambda(t) = \frac{t^{n-1}e^{-\frac{t}{b}}}{b^n \int_t^\infty \Gamma(n)f(u)d(u)}$$
(B3.9)

Annexe C Les différents cycles de vie et les essais d'un système

C4 Cycle de développement d'un système

La construction d'un système énergétique multi sources se réalise selon une séquentielle d'étapes (la Figure C4.1). Toutes les étapes sont reliées entres elles selon un certaine ordre. Cette séquence est composée de cinq phases [89], [90] La première phase est l'analyse qui consiste à analyser les besoins du système. Elle présente les différentes fonctionnalités des interfaces, les contraintes et les besoins du système. La deuxième phase est la conception qui sert à développer le fonctionnement et le plan de tests d'essais du système étudié. La troisième phase est celle de la réalisation : après la phase d'analyse et la phase de conception, cette phase consiste à aller vers l'activité d'industrialisation. La quatrième phase est la vérification : après la phase réalisation, vient la phase vérification qui consiste à vérifier les sous systèmes puis le système en général. La dernière phase est la validation. à la fin de ce processus vient cette phase qui sert à valider le fonctionnement du système final par rapport aux besoins et exigences souhaités.

C5 Les différents types de fiabilité

L'analyse de la fiabilité d'un système pendant sa durée de vie se fait en trois phases (estimation prévisionnelle, estimation expérimentale et estimation opérationnelle)[91].

C5.1 Estimation prévisionnelle de la fiabilité

Cette phase consiste, dès le début de chaque projet, d'étudier la fiabilité à travers des analyses qualitatives (APR, AMDEC, ...) et quantitatives (Arbre de défaillance, Diagramme de fiabilité, ...)[92],[93]. Mais dans le cas des systèmes complexes, il est possible de modéliser la fiabilité par des réseaux de Petri (RdP) ou chaînes de Markov.



FIGURE C4.1 – L'emplacement des essais dans le cycle de développement d'un produit

C5.2 Estimation expérimentale de la fiabilité

Dès que le développement du produit est suffisamment avancé et après avoir obtenu les premiers prototypes,nous commençons à réaliser des essais de robustesse (appelés aussi essais aggravés) afin de connaître les faiblesses et les marges de conception du système. Une fois que le système est mature (marges suffisantes), une campagne d'essai peut être menée pour estimer sa fiabilité. A la fin, lors de la production,nous procèderons aux essais de déverminage pour éliminer tous les défauts de jeunesse.

C5.3 Estimation opérationnelle de la fiabilité

Une fois que le système est en exploitation, une estimation de la fiabilité est réalisée à partir des données de retour d'expériences.

C6 Les essais utilisés en fiabilité

C6.1 Les essais utilisés dans le cycle de développement d'un système

Pour calculer la fiabilité d'un composant ou d'un système, nous avons besoins de récupérer certain paramètres par deux manières différentes : le retour d'expérience et les essais.

- Le retour d'expérience : a pour but de créer une base de données à partir des données récupérées pendant le cycle de vie du système.
- Les essais de fiabilité : sont destinés à compléter les données de la fiabilité dans le cas où elles existent déjà et dans le cas contraire,elles les remplacent.

Il existe plusieurs forme d'essais de la fiabilité dont on cite : les essais de déverminage, les essais aggravés, les essais accélérés et les essais bayésiens.

1. Les essais aggravés

Sont employés pendant la phase de conception dans le but d'aboutir à un produit mature. Améliorer aussi leur robustesse par la prise en évidence d'un certain nombre de faiblesses aux quelles on doit apporter des corrections. Tout cela, dans le but d'accélérer la croissance de leur fiabilité au moment d'obtention des premiers prototypes en temps raisonnable.Ces essais aggravés sont très utilisés dans l'industriel particulièrement dans les entreprises qui fabriquent les produits électroniques, mécaniques,..., etc.

Le principe de fonctionnement des essais aggravés est un principe qui consiste de soumettre un système à un certain nombre de contraintes (échelonnées, progressives et croissantes) jusqu'à son épuisement pour nous montrer ses défaillances. Puis nous procéderons à l'analyse qui permettra d'apporter les corrections nécessaires à ces défaillances afin d'augmenter la fiabilité de ce système.

Plusieurs types de contrainte peuvent être utilisés et parmi les plus connues sont : contrainte mécanique, contrainte électronique et contrainte climatique .

- Contrainte mécanique : On cite les chocs mécanique, torsion, vibration,.., etc.
- Contrainte électronique : On cite les surtensions, intensité de courant,..., etc.
- Contrainte climatiques : On cite température, humidité, etc .

Pour détecter la nature des défaillances d'un système on la soumettre à des testes. S'il s'avère que c'est une faiblesse du système (limite fonctionnelle où le fonctionnement du système est dégradé), on va effectuer les corrections nécessaires et s'il est du à la limite technologique (le système est en état de panne)on doit impérativement arrêter l'essai.(voir la Figure C6.1).





Encore, les essais aggravés nous nous permettent de découvrir et de classer les zones de fonctionnement du système. Selon (McLean, H) [94], nous dénombrons quatre zones (zone de spécification, zone de fonctionnement optimal, zone de fonctionnement dégradé et zone de destruction (défaillance)).(voir la Figure C6.2)

- **Zone de spécification du système :** Définir le domaine de définition du système, elle est limitée par le client et le constructeur. C'est le domaine de définition du produit.
- Zone de fonctionnement optimal : Définir la zone où le système réalise sa mission selon les objectif souhaités.
- **Zone de fonctionnement dégradé :** Définir la zone où le système ne remplisse pas sa mission d'une manière correcte.
- **Zone de destruction (défaillance) :** Définir la zone où le système est hors service(état de panne).



(Température +Vibration)

FIGURE C6.2 – Les zones caractéristiques du produit.

Plusieurs versions d'essais aggravées sont disponibles et exploitables, les plus connues sont : STRIFE (STREss for lIFE en anglais) et HALT (Highly Accelerated Life Test en anglai) [94].

2. Les essais d'estimation de la fiabilité

Servent à mesurer et à vérifier si les objectifs de fiabilité sont respectés, ils interviennent dans

la phase de conception et la phase de production. Ces essais sont basés sur deux grandes stratégies. La première stratégie consiste à déterminer les paramètres de la loi de mortalité d'un système ou les valeurs caractéristiques comme le MTTF et probabilité de défaillance,..., etc. Les essais se basant sur ces paramètres sont appelés essais de détermination. La deuxième stratégie consiste à tester si la valeur des caractéristiques de la fiabilité d'un système est identique ou non aux objectifs fixés. Les essais qui s'appuient sur ces paramètres sont appelés essais de démonstration. Dans le cas d'un système très fiable, il sera nécessaire d'attendre très longtemps pour obtenir un nombre suffisant de taux de défaillance. Dans une application industrielle, il est inconcevable d'avoir une durée d'essai aussi importante, mais les essais accélérés et bayésiens permettent de contourner cette difficulté.

a) Les essais de détermination et de démonstration

i : Les essais de détermination

Le but de ce type d'essai est de déterminer les paramètres de mortalité d'un système ainsi que la détermination d'un taux de défaillance lorsqu'il est constant ou d'un MTTF avec (la durée cumulée (T), le nombre de défaillances k).

$$\widehat{MTTF} = \frac{T}{k} \qquad \widehat{\lambda} = \frac{k}{T}$$
 (C6.1)

ii : Les essais de démonstration

servent à vérifier la conformités des valeurs des caractéristiques de la fiabilités obtenues après leurs applications sur un système par rapport aux objectifs fixés auparavent. Pour bien conduire ces essais en évitant des couts excessifs, il est important de construire le plan d'échantillonnage ou d'essai à mettre en œuvre [91],[95], [96].

b) Les Essais Accélérés

Utilisés dans le cas d'un système caractérisé par une très faible fréquence d'apparition de défaillances et par un retour d'expérience ne permettant pas d'obtenir un échantillon comportant des défaillances. Utilisés aussi pour réduire la durée d'essai.

Le principe des essais accélérés est de soumettre le système testé à des sollicitations d'utilisation ou d'environnement amplifiées par rapport aux valeurs attendues. Nous employons l'utilisation opérationnelle dans le but d'estimer les caractéristiques comportementales (loi de fiabilité, performances opérationnelles, ...) du système dans les conditions normales à partir des conditions accélérées d'utilisation et cela dans des délais compatibles avec les contraintes calendaires associées à la phase de développement. Le passage de conditions accélérées aux conditions normales, en ce qui concerne la durée de vie, se fait par l'application d'une loi appelée : loi d'accélération [97],[98],[99],[100],[101].

Il existe plusieurs conditions à respecter afin de réaliser les essais accélérés dont on cite :

- **Première condition :**le choix des contraintes et leurs niveaux.
- **Deuxième condition :** la valeur des paramètres intervenant dans ces modèles.
- **Troisième condition :** la connaissance des mécanismes de défaillances provoqués qui doivent être représentatifs des conditions normales d'emploi.
- Quatrième condition : la connaissance de la loi d'accélération du système.

c) Les Essais Bayésiens

visent à réduire la taille de l'échantillon des essais d'estimation et l'amélioration de l'estimation des paramètres de la fiabilité du produit par l'intégration du passé (données disponibles sur le produit concerné).

Il existe de nombreux travaux qui traitent des techniques bayésiennes dont Nous pouvons citer les travaux de : (Congdon et all)[102], (Ibrahim et all) [103] et les travaux concernant les applications à la fiabilité :

(Ringler)[104], (Procaccia et al.)[105], (Procaccia et all)[106], (Lannoy et all)[107], (Sander et all)[108] et (Ross)[109].

Dans un plan d'essai bayésien, les résultats d'essais réalisés au cours du cycle de développement sont combinés avec un modèle de fiabilité a priori pour obtenir un modèle a posteriori et ce en s'appuyant sur la loi de Bayes.

Dans le cas d'une variable aléatoire continue, la formule de Bayes est présentée de la manière suivante :

$$g(\frac{\theta}{T}) = \frac{f(\frac{T}{\theta}) \cdot g(\theta)}{\int_{D(\theta)} f(\frac{T}{\theta}) \cdot g(\theta)}$$
(C6.2)

Où :

- θ :Vecteur des paramètres inconnus de la loi de durée de vie qui peuvent êtres le taux de défaillance, taux de réparation,..., etc.
- T : Résultats d'essai (instants de défaillance, ...).
- $g(\theta)$: Densité de probabilité a priori du paramètre θ ,
- $(\frac{T}{2})$: Fonction de vraisemblance de l'échantillon.
- $(\frac{\theta}{T})$: Densité de probabilité a posteriori du paramètre θ (c'est une densité de probabilité conditionnelle qui dépend de l'information disponible).
- $D(\theta)$: Domaine de définition de la variable aléatoire θ .

Dans le cas d'une variable aléatoire discrète, la formule de Bayes est présentée de la manière suivante :

$$P(\frac{A}{B}) = \frac{P(A) \cdot P(\frac{B}{A})}{\sum [P(A) \cdot P(\frac{B}{A})]}$$
(C6.3)

- A : événement étudié.

- B : événement(s) observé(s).
- P(A) : probabilité a priori de réalisation de l'événement A.
- $P(\frac{B}{A})$: vraisemblance de l'occurrence de l'événement A_i sachant que A a été observé.
- $P(\frac{A}{B})$: : probabilité a postériori de réalisation de l'événement A sachant que B a été observé.

3. Les essais de déverminage

Le déverminage appartient à la catégorie des tests qualitatifs, leur objectif consiste à éliminer tous les défauts latents de la période de jeunesse (composant faible, défauts latents de fabrication, faiblesses de conception si elles n'ont pas été éliminées auparavant) [110]. Pour atteindre ces objectifs, nous soumettons les produits sortant de fabrication à des sollicitations d'environnement (climatiques, vibratoires,) pendant une durée donnée de manière à faire apparaître les défauts de jeunesse.A la fin de cette opération de déverminage, tous les produits obtenus de la production passerons à la période utile (voir figure).

le but de cet essai consiste à tronquer le seuil de résistance aux stress(température, vibration,...), afin d'obtenir une intervalle fonctionnelle optimale.

Il existe plusieurs techniques inspirées de l'essai de déverminage dont : Burn-in, ESSEnvironmental Stress Screen, HASS- Highly Accelerated Stress Screen, HASA- Highly Accelerated Stress Audit [100],[110].

Bibliographie

- Petibon, S. (2009). Nouvelles architectures distribuées de gestion et conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques (Doctoral dissertation, Université Paul Sabatier-Toulouse III).
- [2] Labouret, A., Villoz, M. (2006). Energie solaire photovoltaïque (Vol. 4). Dunod.
- [3] Würfel, P., Würfel, U. (2016). Physics of solar cells : from basic principles to advanced concepts. John Wiley Sons.
- [4] Goetzberger, A., Knobloch, J., Voss, B. (1998). Crystalline silicon solar cells. editorial John Wiley Sons Ltd, 1.
- [5] Tran, D. H. (2010). Conception Optimale Intégrée d'une chaîne éolienne" passive" : analyse de robustesse, validation expérimentale (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT).
- [6] Abdelli, A. (2007). Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT).
- [7] Pipattanasomporn, M. (2004). A study of remote area internet access with embedded power generation (Doctoral dissertation, Virginia Tech).
- [8] Boyette, A. (2006). Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne (Doctoral dissertation, Université Henri Poincaré-Nancy 1).
- [9] MOSDALE, R. (2003). Transport électrique routier : Batteries pour véhicules électriques. Techniques de l'ingénieur. Génie électrique, 12(D5565), D5565-1.
- [10] Urbain, M. (2009). Modélisation électrique et énergétique des accumulateurs Li-Ion. Estimation en ligne de la SOC et de la SOH (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Lorraine).
- [11] Ferrari, F. (2008). Bref comparatif des technologies de batteries.
- [12] Gualous, H., Gallay, R., Berthon, A. (2004). Utilisation des supercondensateurs pour le stockage de l'energie embarquee : applications transport. Revue de l'Electricité et de l'Electronique, (8), 83-90.
- [13] Labbé, J. (2006). L'Hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés (Doctoral dissertation, École Nationale Supérieure des Mines de Paris).

- [14] Saisset, R. (2004). Contribution à l'étude systémique de dispositifs énergétiques à composants électrochimiques. Formalisme Bond Graph appliqué aux piles à combustible, accumulateurs Lithium-Ion, Véhicule Solaire (Doctoral dissertation).
- [15] Faure, F. (2003). Suspension magnetique pour volant d'inertie (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG).
- [16] Wang, C., Nehrir, M. H. (2008). Power management of a stand-alone wind/photovoltaic/fuel cell energy system. IEEE transactions on energy conversion, 23(3), 957-967.
- [17] Dali, M. (2009). Commande er gestion énergétique des systèmes hybrides photovoltaïqueéolien (Doctoral dissertation, Ph. D. thesis, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis).
- [18] Onar, O. C., Khaligh, A. (2012). A novel integrated magnetic structure based DC/DC converter for hybrid battery/ultracapacitor energy storage systems. IEEE transactions on smart grid, 3(1), 296-307.
- [19] Munoz, J., Narvarte, L., Lorenzo, E. (2004, June). First operating year of two village PV-diesel plants in the south of Morocco. In 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference (pp. 7-11).
- [20] Van Sark, W. G. J. H. M., Lysen, E. H., Cocard, D., Beutin, P., Merlo, G. F., Mohanty, B., ... Shaheed, A. (2006, September). The first PV-diesel hybrid system in the Maldives installed at Mandhoo Island. In 21st European photovoltaic solar energy conference (pp. 4-8).
- [21] Muselli, M., Notton, G., Poggi, P., Louche, A. (2000). PV-hybrid power systems sizing incorporating battery storage : an analysis via simulation calculations. Renewable Energy, 20(1), 1-7.
- [22] Shaahid, S. M., Elhadidy, M. A. (2003). Opportunities for utilization of stand-alone hybrid (photovoltaic+ diesel+ battery) power systems in hot climates. Renewable Energy, 28(11), 1741-1753.
- [23] Gourbi, A., Bousmaha, I., Brahami, M., Tilmatine, A. (2016). Numerical study of a hybrid photovoltaic power supply system. Journal of Power Technologies, 96(2), 137-144.
- [24] Klinghammer, W., Nörenberg, K. (2006, May). Constructing Village PV Hybrid Power Systems on a Wide-Scale in Western China : Experience Gained. In 3rd European PV-hybrid mini-grid conference. Aix en Provence.
- [25] Carta, J. A., González, J., Gómez, C. (2003). Operating results of a wind-diesel system which supplies the full energy needs of an isolated village community in the Canary Islands. Solar Energy, 74(1), 53-63.
- [26] Bowen, A. J., Cowie, M., Zakay, N. (2001). The performance of a remote wind-diesel power system. Renewable energy, 22(4), 429-445.
- [27] Elhadidy, M. A., Shaahid, S. M. (2004). Role of hybrid (wind+ diesel) power systems in meeting commercial loads. Renewable energy, 29(1), 109-118.

- [28] Garcia, R. S., Weisser, D. (2006). A wind-diesel system with hydrogen storage : Joint optimisation of design and dispatch. Renewable energy, 31(14), 2296-2320.
- [29] Phuangpornpitak, N., Kumar, S. (2007). PV hybrid systems for rural electrification in Thailand. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11(7), 1530-1543.
- [30] Dufo-López, R., Bernal-Agustín, J. L. (2008). Multi-objective design of PV-wind-diesel-hydrogen-battery systems. Renewable energy, 33(12), 2559-2572.
- [31] Bhave, A. G. (1999). Hybrid solar–wind domestic power generating system—a case study. Renewable energy, 17(3), 355-358.
- [32] El-Tamaly, H. H., Mohammed, A. A. E. (2006). Impact of interconnection photovoltaic/wind system with utility on their reliability using a fuzzy scheme. Renewable Energy, 31(15), 2475-2491.
- [33] McConnell, R. D., Lasich, J. B., Elam, C. (2005). Hybrid Solar Concentrator PV System for the Electrolytic Production of Hydrogen. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
- [34] Conibeer, G. J., Richards, B. S. (2007). A comparison of PV/electrolyser and photoelectrolytic technologies for use in solar to hydrogen energy storage systems. International Journal of Hydrogen Energy, 32(14), 2703-2711.
- [35] Nouni, M. R., Mullick, S. C., Kandpal, T. C. (2007). Techno-economics of small wind electric generator projects for decentralized power supply in India. Energy Policy, 35(4), 2491-2506.
- [36] Zhou, T. (2009). Commande et Supervision Energétique d'un Générateur Hybride Actif Eolien incluant du Stockage sous forme d'Hydrogène et des Super-Condensateurs pour l'Intégration dans le Système Electrique d'un Micro Réseau (Doctoral dissertation, Ecole centrale de Lille).
- [37] Zini, G., Tartarini, P. (2010). Wind-hydrogen energy stand-alone system with carbon storage : Modeling and simulation. Renewable Energy, 35(11), 2461-2467.
- [38] Ntziachristos, L., Kouridis, C., Samaras, Z., Pattas, K. (2005). A wind-power fuel-cell hybrid system study on the non-interconnected Aegean islands grid. Renewable Energy, 30(10), 1471-1487.
- [39] Kasseris, E., Samaras, Z., Zafeiris, D. (2007). Optimization of a wind-power fuel-cell hybrid system in an autonomous electrical network environment. Renewable Energy, 32(1), 57-79.
- [40] Diaf, S., Notton, G., Belhamel, M., Haddadi, M., Louche, A. (2008). Design and technoeconomical optimization for hybrid PV/wind system under various meteorological conditions. Applied Energy, 85(10), 968-987.
- [41] Bitterlin, I. F. (2006). Modelling a reliable wind/PV/storage power system for remote radio base station sites without utility power. Journal of power sources, 162(2), 906-912.
- [42] Dali, M., Belhadj, J., Roboam, X. (2010). Hybrid solar-wind system with battery storage operating in grid-connected and standalone mode : control and energy management-experimental investigation. Energy, 35(6), 2587-2595.

- [43] Azbe, V., Mihalic, R. (2006). Distributed generation from renewable sources in an isolated DC network. Renewable energy, 31(14), 2370-2384.
- [44] Pecen, R., Salim, M. D., Zora, A. (2004). A labview based instrumentation system for a windsolar hybrid power station. Journal of Industrial Technology, 20(3), 1-8.
- [45] Tina, G., Gagliano, S., Raiti, S. (2006). Hybrid solar/wind power system probabilistic modelling for long-term performance assessment. Solar energy, 80(5), 578-588.
- [46] Urli, N. B., Kamenski, M. (1998). Hybrid photovoltaic/wind grid-connected power plants in Croatian renewable energy program. Renewable Energy, 15(1-4), 594-597.
- [47] Mortureux, Y. (2005). La sûreté de fonctionnement : méthodes pour maîtriser les risques.
- [48] Procaccia, H., Morilhat, P., Carle, R., Menjon, G. (1996). Reliability of structures of industrial installations. Theory and applications of probabilistic mechanics.
- [49] Villemeur, A. (1988). Sureté de fonctionnement des systèmes industriels : fiabilité-facteurs humains, informatisation.
- [50] O'Connor, P., Kleyner, A. (2012). Practical reliability engineering. John Wiley Sons.
- [51] Desroches, A. (1995). Concepts et méthodes probabilistes de base de la sécurité.
- [52] Lyonnet, P. (2006). Ingénierie de la fiabilité. TEC DOC.
- [53] Mihalache, A. G. (2007). Modélisation et évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques : application sur système embarqué (Doctoral dissertation, Université d'Angers).
- [54] Vais, V., Racek, S. (2011, November). Experimental evaluation of regular events occurrence in continuous-time markov models. In Proceedings of the Eleventh International Conference on Informatics, Košice, Slovakia (pp. 143-146)..
- [55] Hobbs, G. K. (2000). Accelerated reliability engineering : HALT and HASS. New York : Wiley.
- [56] Moncelet, G. (1998). Application des Réseaux de Petri à l'évaluation de la sûreté de fonctionnement des systèmes mécatroniques du monde automobile (Doctoral dissertation, Toulouse 3).
- [57] Zwingelstein, G. (1996). La maintenance basée sur la fiabilité. Hermès, 199.
- [58] Cazaubon, C., Gramaccia, G., Massard, G. (1997). Management de projet technique. Ellipses, Paris.
- [59] Tollenaere, M., Aoussat, A., Le Coq, M. (1998). Conception de produits mécaniques : méthodes, modèles et outils. Hermes.
- [60] Mortureux, Y. (2002). Arbres de défaillance, des causes et d'événement.
- [61] Clement, E., Rauzy, A., Thomas, T. (2014). Arbre Analyste : un outil d'arbres de défaillances respectant le standard Open-PSA et utilisant le moteur XFTA. Congrès Lambda Mu 19 de Maîtrise des Risques et Sûreté de Fonctionnement, Dijon, 21-23 Octobre 2014.
- [62] PERILHON, P. (2003). MOSAR-Présentation de la méthode.
- [63] Arquès, P. (2009). Diagnostic prédictif et défaillances des machines : théorie, traitement, analyse, reconnaissance, prédiction. Editions Technip.
- [64] Cocozza-Thivent, C. (1997). Processus stochastiques et fiabilité des systèmes (Vol. 28). Springer Science Business Media.
- [65] Gaudoin, O., Ledoux, J. (2007). Modélisation aléatoire en fiabilité des logiciels. Hermès Science.
- [66] Garin, H. (1994). AMDEC, AMDE, AEEL : l'essentiel de la méthode. AFNOR.
- [67] Gauthier, R. (1995). QUALITE EN CONCEPTION DE PRODUITS NOUVEAUX" proposition d'une méthode de fiabilisation du processus de management de l'information" (Doctoral dissertation, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers-ENSAM).
- [68] Martin, C., Bocquet, J. C. (1999, April). Conception intégrée. Interopérativité des méthodes : AF, QFD, AMDEC dans le cadre du projet PIRAMID. In 6ème Colloque national sur la conception mécanique intégrée. La Plagne, France : PRIMECA (pp. 247-54).
- [69] Parrennes, F. (2002). Analyse de sûreté du logiciel par interprétation abstraite et contraintes (Doctoral dissertation, Paris 6).
- [70] Schoenig, R., Aubry, J. F., Cambois, T., Hutinet, T. (2006). An aggregation method of Markov graphs for the reliability analysis of hybrid systems. Reliability Engineering System Safety, 91(2), 137-148.
- [71] Bon, J. L. (1995). Fialibité des systèmes : méthodes mathématiques. Masson.
- [72] Zwingelstein, G. (1996). La maintenance basée sur la fiabilité. Hermès, 199.
- [73] Petri, C. A. (1962). Kommunikation mit Automaten (PhD Thesis). Institut f
 ür Instrumentelle Mathematik, Bonn, Germany.
- [74] Khalfaoui, S., Guilhem, E., Demmou, H., Valette, R. (2002, March). Une méthode pour obtenir des scénarios critiques dans les systèmes mécatroniques. In 13-ESREL2002 European Conférence, Lyon-France-18 au (Vol. 21).
- [75] Khalfaoui, S. (2003). Méthode de recherche des scénarios redoutés pour l'évaluation de la sûreté de fonctionnement des systèmes mécatroniques du monde automobile (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT).
- [76] Moncelet, G. (1998). Application des Réseaux de Petri à l'évaluation de la sûreté de fonctionnement des systèmes mécatroniques du monde automobile (Doctoral dissertation, Toulouse 3).
- [77] Dutuit, Y., Châtelet, E., Signoret, J. P., Thomas, P. (1997). Dependability modelling and evaluation by using stochastic Petri nets : application to two test cases. Reliability Engineering System Safety, 55(2), 117-124.
- [78] Girault, C., Valk, R. (2013). Petri nets for systems engineering : a guide to modeling, verification, and applications. Springer Science Business Media.

- [79] Choquet-Geniet, A., Vidal-Naquet, G. (1993). Réseaux de Petri et systèmes parallèles. Editions Armand Colin.
- [80] Molloy, M. K. (1982). Performance analysis using stochastic Petri nets. IEEE Transactions on computers, (9), 913-917.
- [81] Natkin, S. O. (1980). Les reseaux de Petri stochastiques et leur application a l'evaluation des systemes informatiques. Conservatoire National des Arts et Metiers.
- [82] Zijal, R. (1995). Discrete Time Deterministic and Stochastic Petri Nets. In Quality of Communication-Based Systems (pp. 123-136). Springer, Dordrecht.
- [83] Marsan, M. A., Conte, G., Balbo, G. (1984). A class of generalized stochastic Petri nets for the performance evaluation of multiprocessor systems. ACM Trans. Comput. Syst., 2(2), 93-122.
- [84] Marsan, M. A., Balbo, G., Conte, G., Donatelli, S., Franceschinis, G. (1994). Modelling with generalized stochastic Petri nets. John Wiley Sons, Inc.
- [85] Marsan, M. (1986). On Petri nets with deterministic and exponential transition firing times. In Proc. 7th European Workshop on Application and Theory of Petri Nets, 1986 (pp. 151-165).
- [86] Marsan, M. A., Chiola, G. (1986, June). On Petri nets with deterministic and exponentially distributed firing times. In European Workshop on Applications and Theory in Petri Nets (pp. 132-145). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [87] Thiaux, Y. (2010). Optimisation des profils de consommation pour minimiser les coûts économique et énergétique sur cycle de vie des systèmes photovoltaïques autonomes et hybrides-Evaluation de la technologie Li-ion (Doctoral dissertation, École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan).
- [88] Laronde, R. (2011). Fiabilité et durabilité d'un système complexe dédié aux énergies renouvelables-Application à un système photovoltaïque (Doctoral dissertation, Université d'Angers).
- [89] Cazals, F., Meizel, D. (2005). Projects in the pedagogy of mechatronics in engineering education. In The 6th International Workshop on Research and Education in Mechatronics REM (pp. 453-458).
- [90] Dutuit, Y., Rauzy, A. (2005). Approximate estimation of system reliability via fault trees. Reliability engineering system safety, 87(2), 163-172.
- [91] Ligeron, J. C., Lyonnet, P. (1992). La Fiabilité en exploitation : Organisation et traitement des données : Suivi de'' Le cercle des fiabilistes disparus. Lavoisier Tec Doc.
- [92] FIDES, G. (2009). Méthodologie de fiabilité pour les systèmes électroniques. Guide FIDES.
- [93] Center, N. S. W. (1998). NSWC-98/LE1. Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment, Naval Surface Warfare Center, Carderock Division, West Bethesda.
- [94] Doganaksoy, N. (2001). HALT, HASS and HASA Explained : Accelerated Reliability Techniques.

- [95] Pagès, A., Gondran, M. (1980). Fiabilité des systèmes (Vol. 39). Eyrolles.
- [96] Bon, J. L. (1995). Fialibité des systèmes : méthodes mathématiques. Masson.
- [97] Nelson, W. B. (2009). Accelerated testing : statistical models, test plans, and data analysis (Vol. 344). John Wiley Sons.
- [98] O'Connor, P. (2003). Testing for reliability. Quality and Reliability Engineering international, 19(1), 73-84.
- [99] Caruso, H., Dasgupta, A. (1998). A fundamental overview of accelerated testing analytical models. Journal of the IEST, 41(1), 16-20.
- [100] Vassiliou, P., Mettas, A. (2001). Understanding accelerated life-testing analysis. In Annual Reliability and Maintainability symposium, Tutorial Notes (pp. 1-21).
- [101] Guerin, F., Dumon, B., Hambli, R. (2001). Determining the shape parameter of a Weibull distribution from mechanical damage models. In Annual Reliability and Maintainability Symposium. 2001 Proceedings. International Symposium on Product Quality and Integrity (Cat. No. 01CH37179) (pp. 156-160). IEEE.
- [102] Congdon, P. (2007). Bayesian statistical modelling (Vol. 704). John Wiley Sons.
- [103] Ibrahim, J. G., Chen, M. H., Sinha, D. (2001). Bayesian semiparametric models for survival data with a cure fraction. Biometrics, 57(2), 383-388.
- [104] Ringler, J. (1979). Utilisation des techniques bayésienne dans le cas de système complexe. Revue de Statistique Appliquée, 27(2).
- [105] Procaccia, H., Clarotti, C. A., Piepszownik, L., Lucenet, G. (1992). Fiabilité des équipements et théorie de la décision statistique fréquentielle et bayésienne. Eyrolles.
- [106] Procaccia, H. (1996). Fiabilité des structures des installations industrielles.
- [107] Lannoy, A., Procaccia, H. (2001). L'utilisation du jugement d'expert en sûreté de fonctionnement. Tec Doc.
- [108] Sander, P., Badoux, R. (Eds.). (2012). Bayesian methods in reliability (Vol. 1). Springer Science Business Media.
- [109] Ross, T. D. (2003). Accurate confidence intervals for binomial proportion and Poisson rate estimation. Computers in biology and medicine, 33(6), 509-531.
- [110] Kececioglu, D., Sun, F. B. (2003). Environmental Stress Screening : Its Quantification, Optimization and Management. DEStech Publications, Inc.

Résumé

Les travaux de cette thèse qui entrent dans le cadre de la sûreté de fonctionnement des systèmes énergétiques. Nous nous intéressons à la détermination des performances des systèmes d'énergie renouvelables multi-sources (M-SRES), liées à leur fiabilité. Nous proposons une méthodologie basée sur une technique de modélisation à base des réseaux de Pétri stochastiques et déterministes (RdPSD ou DSPN), pour étudier le comportement dynamique de ces systèmes. Le choix de cet outil de modélisation est justifié par la nature discrète de la dynamique des systèmes d'énergie renouvelables. En utilisant le modèle développé pour analyser les comportements fonctionnels et dysfonctionnels des systèmes M-SRES, nous déterminons les instants de passage d'un état de fonctionnement à un état de panne, afin de calculer leur fiabilité et disponibilité. Ensuite, le temps de production global de ces systèmes est évalué en développant des modèles mathématiques permettant de calculer la durée de défaillance et le temps d'attente de chaque composant.

Mots-clés : Energie renouvelable, Réseau de Pétri, Fiabilité, Disponibilité.

Abstract

In this thesis, we study the operational safety of energy systems. We are interested in determining the performance of multi-source renewable energy systems, related to their reliability. We propose a methodology based on a modelling technique based on stochastic and deterministic petri net (DSPN), to study the dynamic behaviour of these systems. The choice of this modelling tool is justified by the discrete nature of the dynamics of renewable energy systems. Using the model developed to analyze the functional and dysfunctional behaviors of multi-source systems, we determine the moments of transition from an operating state to a failure state, in order to calculate their reliability and availability. Then, the overall production time of these systems is evaluated by developing mathematical models to calculate the failure time and the waiting time of each component.

Keywords: Renewable energy, Petri nets, Simulation, Reliability, Availability.