



Mémoire de Projet de fin d'étude

Préparé par

**KONLAMBIGUE Kangbéni Djotiname**

Pour l'obtention du diplôme

Ingénieur d'Etat en

SYSTEMES ELECTRONIQUES & TELECOMMUNICATIONS

Intitulé

**Impact des défauts réseaux transport sur les parcs  
éoliens – cas du parc éolien de TAZA :  
Etude et simulation du crédit de capacité du parc de  
TAZA**

Encadré par :

Pr H.EL MARKHI

Mr EL MAKRINI (ONEE- Branche Electrique)

Soutenu le 02 Juillet 2015, devant le jury composé de :

Pr H.EL MARKHI.....: Encadrant

Mr EL MAKRINI.....: Encadrant

Pr T.LAMCHARFI..... : Examineur

Pr T.LAMHAMDI..... : Examineur

## DÉDICACES

*À* mes parents,

*Les mots ne suffiraient pas pour exprimer l'amour que je vous porte. Puisse le Très-Haut vous combler de ses grâces et vous donner une vie assez longue pour voir la réussite de vos enfants.*

*À* Mlle. Fouzia EL MARSLI, je ne sais quels mots utiliser pour témoigner de mon ressenti envers toi. Je ne remercierai jamais assez Dieu d'avoir croisé ton chemin. Tu es la meilleure.

*À* M. Najia ES-SBAI, le respect que je vous porte est justifié, car votre abnégation qui n'a d'égale que sa bonté. Vous avez été une mère pour moi. Merci pour tout.

*À* Mr. Hassan EL MARKHI, j'ai vu en vous le père que j'ai quitté il y'a quelques années. Ce fut un honneur de vous avoir connu.

*À* tous mes amis, peut-être que nous allons nous dire au revoir, mais ce ne sera pas un adieu. Merci pour tous ces moments partagés.

*À* tout le département Génie Éclectique et à tous mes professeurs, merci de m'avoir formé. Puisse Dieu vous le rendre au centuple.

*À* tous ceux que j'ai omis de citer, je vous porte au fond de moi.

*Je vous dédie ce travail*

*Silvère K.D. KONLAMBIGUE*

# REMERCIEMENTS

JE NE POURRAIS DÉBUTER CE TRAVAIL SANS OCTROYER MES  
REMERCIEMENTS À CERTAINES PERSONNES QUI, DE PRÈS OU DE  
LOIN, ONT CONTRIBUÉ À SA RÉUSSITE.

Je souhaite adresser, mes remerciements remerciement à Monsieur Hassan El MARKHI, pour son encadrement, son dévouement et sa disponibilité durant toute cette période de stage.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur ABOUBAKR EL MAKRINI, Ingénieur d'État et Chef de la Division de l'Office National d'Électricité, pour m'avoir pris sous son aile en acceptant ma demande stage et en m'assistant durant toute la période de stage.

Mes sincères remerciements vont également à Messieurs T. LAMCHARFI et T. LAMHAMDI, professeurs à la Faculté des Sciences et Techniques de Fès, pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de juger mon modeste travail. Veuillez trouver ici le témoignage de mon profond respect.

Mes remerciements vont aussi à tout le corps professoral du département Génie Electrique de la Faculté des Sciences et Techniques de Fès.

Je tiens également à remercier l'ensemble du personnel de la Division Transport de l'ONEE, et spécialement Monsieur Youssef El MAJDOUB pour n'avoir pas cessé de me motiver durant tout mon séjour à l'ONEE.

Je ne peux terminer sans adresser de vifs remerciements à Monsieur Youness BOUKHRIS et Monsieur Youssef MENCHAFU, pour leurs conseils qui ont été d'or et mon permis d'aller de l'avant.

## RÉSUMÉ

Parvenir à comparer la production d'énergie éolienne et la production d'énergie traditionnelle dans l'aspect de la capacité est essentiel pour l'expansion du système électrique. Le crédit de capacité est un moyen pratique et efficace de comparaison de ces deux types de production d'énergie. Malheureusement, la notion de crédit de capacité des parcs éoliens est très peu connue et fait généralement objet de confusion. Dans ce document, nous levons l'ambiguïté autour de la notion de crédit de capacité de l'éolien et implémentons un algorithme pour sa détermination. Cet algorithme fait appel à la notion de fiabilité d'un réseau électrique en présence d'une production intermittente. Des tests et validation sont réalisés sur un réseau test, le réseau IEEE-RTS, et le cas du réseau national marocain a été étudié.

**Mots-clés** : énergie éolienne, capacité de crédit de l'éolien, fiabilité d'un réseau électrique, IEEE-RTS, réseau électrique national marocain (RNMA).

## ABSTRACT

Achieve the comparison of wind energy production and traditional energy production in the aspect of capacity is essential for the expansion of electrical system. The capacity credit is a convenient and efficient way of comparing these two types of energy production. Unfortunately, the concept of capacity credit of wind farms is little known and is generally subject to confusion. In this document, we are lifting the ambiguity around the concept of capacity credit of wind power and are implementing an algorithm for its determination. This algorithm uses the concept of reliability of a power grid in the presence of intermittent production. Testing and validation are performed on a test network, the IEEE-RTS network, and the case of Moroccan national network has been investigated.

**Index terms**: wind energy, capacity credit of wind power, electrical system reliability, IEEE-RTS, Moroccan national power system.

# TABLE DES MATIÈRES

<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	1
<b>CHAPITRE 1 : SOCIÉTÉ D'ACCUEIL ET CONTEXTE DU PROJET</b> .....	2
1- APERÇU GÉNÉRAL SUR L'ONEE .....	3
2- CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE DU PROJET .....	8
<b>CHAPITRE 2 : ENERGIE ÉOLIENNE ET NOTION DE CRÉDIT DE CAPACITÉ</b> .....	9
INTRODUCTION .....	10
I- ENERGIE ÉOLIENNE.....	10
1- HISTORIQUE .....	10
2- CAS DU MAROC.....	12
3- PRINCIPE D'UNE ÉOLIENNE.....	14
4- AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS.....	15
II- CRÉDIT DE CAPACITÉ DE L'ÉOLIEN.....	16
1- DÉTERMINATION DU CRÉDIT DE CAPACITÉ .....	16
2- ALGORITHME DE DÉTERMINATION DU CCE .....	18
CONCLUSION .....	20
<b>CHAPITRE 3 : ÉTUDE DE LA FIABILITÉ D'UN RÉSEAU</b> .....	21
INTRODUCTION .....	22
I- FIABILITÉ DES SYSTÈMES DE PRODUCTION CONVENTIONNELS.....	22
1- MODÈLE DE PRODUCTION CONVENTIONNELLE .....	23
2- MODÈLE DE CHARGE.....	26
3- MODÈLE DE RISQUE .....	27
II- FIABILITÉ DES SYSTÈMES DE PRODUCTION EN PRÉSENCE DE L'ÉOLIEN	29
1- DISTRIBUTION DE PROBABILITÉ DU VENT.....	31
2- COURBE DE LA PUISSANCE PRODUITE PAR L'ÉOLIEN .....	32
3- MODÈLE SIMPLIFIÉ DE LA PRODUCTION ÉOLIENNE (MSPE).....	35
CONCLUSION .....	35
<b>CHAPITRE 4 : IMPACT DE L'ÉOLIEN SUR LA SÛRETÉ DU SYSTÈME ÉLECTRIQUE : LE CRÉDIT DE CAPACITÉ</b> .....	36
INTRODUCTION .....	37
I- ETAT DE L'ART DES MÉTHODES POUR L'ÉVALUATION DU CCE .....	37
II- IEEE-RELIABILITY TEST SYSTEM .....	38
1- MODÈLE DE PRODUCTION .....	39

2-	MODÈLE DE CHARGE.....	39
3-	MODÈLE DE RISQUE .....	40
4-	MODÈLE DE PRODUCTION ÉOLIENNE .....	41
5-	RÉSULTATS DE L'ANALYSE DU CRÉDIT DE CAPACITÉ DU RÉSEAU IEEE-RTS ....	43
III-	ANALYSE DU CRÉDIT DE CAPACITÉ DU PARC ÉOLIEN DE TAZA .....	44
1-	MODÈLE DE PRODUCTION .....	44
2-	MODÈLE DE CHARGE.....	45
3-	MODÈLE DE RISQUE .....	46
4-	MODÈLE DE PRODUCTION ÉOLIENNE .....	46
5-	ANALYSE DU CRÉDIT DE CAPACITÉ DE PARC DE TAZA DANS LE MIX DE PRODUCTION NATIONAL.....	48
	CONCLUSION .....	50
	<b>CONCLUSION ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>51</b>
1-	CONCLUSION.....	51
2-	PERSPECTIVES.....	52

# LISTES DES FIGURES

Figure 1 : tableau récapitulatif de la puissance installée en 2014-----	5
Figure 2 : Détails de distribution de l'énergie (ONEE)-----	6
Figure 3 : Organigramme de L'ONEE Fès-Oujda-----	7
Figure 4 : Dégagement de CO2 liée aux différentes unités de production -----	11
Figure 5 : Projet Eolien Intégré (PEI)-----	12
Figure 6 : Programme d'énergie éolienne-----	13
Figure 7 : Détail des objectifs du PEI-----	14
Figure 8 : Courbe de puissance d'une éolienne à vitesse variable -----	15
Figure 9 : Modèle probabiliste pour l'analyse du $CC_E$ -----	17
Figure 10 : Calcul du $CC_E$ -----	17
Figure 11 : Algorithme de détermination du $CC_E$ -----	19
Figure 12 : Modèle d'évaluation de l'adéquation des systèmes de production d'électricité----	22
Figure 13 : Modèle du système conventionnel -----	23
Figure 14 : Arbre de probabilité d'un système conventionnel simple -----	25
Figure 15 : Forme de la monotone de consommation pour des données de consommation ---	26
Figure 16 : Relation Charge-Capacité et Reserve-----	28
Figure 17 : Modèle système hybride (conventionnel + intermittente) -----	29
Figure 18 : Stratégie de construction du tableau d'indisponibilité en présence de la production intermittente (éolienne) -----	30
Figure 19 : Modèle pour la construction du tableau de disponibilité de la puissance éolienne	30
Figure 20 : Distribution de probabilité d'occurrence du vent-----	32
Figure 21 : Courbe de puissance d'éolienne à vitesse variable-----	33
Figure 22 : Courbe de puissance d'une éolienne de 2 MW -----	34
Figure 23 : Profil de consommation -----	40
Figure 24 : Montone de consommation -----	40
Figure 25 : Distribution de vent -----	42
Figure 26 : Courbe de puissance de l'éolienne 1.5 MW-----	42
Figure 27 : Estimation du $CC_E$ lors du remplacement de 12 MW thermique-----	43
Figure 28 : Monotone de charge du RNMA -----	46
Figure 29 : Modèle des éoliennes du parc de TAZA -----	47
Figure 30 : Paramètres de production éolienne RNMA-TAZA-----	47
Figure 31 : Courbe de puissance des éoliennes de TAZA -----	47
Figure 32 : Distribution de vent sur le site du parc de TAZA -----	48

# LISTES DES TABLEAUX

Tableau 1 : Objectif de production éolienne en Europe-----	11
Tableau 2 : Tableau d'estimation de la capacité éolienne équivalente -----	18
Tableau 3 : Probabilités des différents états et probabilités cumulées -----	25
Tableau 4 : Tableau de défaillance synthétisé de la RTS -----	39
Tableau 5 : Niveau de fiabilité de la RTS-----	41
Tableau 6 : Paramètres de production éolienne RTS -----	41
Tableau 7 : Tableau de comparaison des résultats exact avec celles simulés pour l'analyse du CC <sub>E</sub> -----	44
Tableau 8 : Tableau de défaillance synthétisé du RNMA -----	45
Tableau 9 : Niveau de fiabilité du RNMA -----	46
Tableau 10 : Analyse du crédit de capacité du parc de TAZA -----	49
Tableau 11 : Fiabilité du parc hybride(conventionnel + éolienne) -----	49

# INTRODUCTION GENERALE

Ayant connue une explosion avec la révolution industrielle, la production d'électricité est assurée depuis longtemps par des sources de production dites conventionnelles qui sont : les centrales thermiques (gaz, pétrole, charbon) et hydrauliques (barrages). Aujourd'hui, les ressources fossiles (pétrole, gaz et charbon) s'amenuisent et tendent à disparaître à cause des besoins en énergie de plus en plus forts dus à la croissance démographique mondiale et au niveau de vie encore plus élevés de la population.

Pour pallier à ce problème un développement intensif d'autres formes d'énergie dite *renouvelable*, c.-à-d. qui n'emploient pas de ressources naturelles épuisables ont vu le jour. Ces sources sont, d'une part le photovoltaïque, l'éolien et l'hydraulique (barrages dans les rivières, marées, vagues) et d'autres parts les énergies à finalité thermique : géothermie, solaire thermique, combustion de Biomasse.

En outre, les ressources renouvelables présentent l'avantage d'émission à très faible taux de Gaz à Effet de Serre (GES) dans l'atmosphère par rapport à celles des énergies fossiles. L'émission dans l'atmosphère des GES par combustion des ressources fossiles serait en partie responsable du réchauffement climatique observé au cours du XXème siècle. Cette conclusion a conduit au protocole de Kyoto, traité international (signé en 1997 et entrée en vigueur en 2005) qui vise à réduire les émissions mondiales de ces gaz.

L'éolien se concevant particulièrement comme une piste sérieuse à la contribution de la résolution de cette problématique, cela explique les chiffres, plus en plus élevés, concernant ses taux de pénétration dans les réseaux électriques de nos jours. De ce point de vue, l'éolien sera également au cœur de notre étude.

L'étude que nous proposons dans ce projet de fin d'études s'inscrit dans la gestion d'un réseau électrique hybride afin de pouvoir satisfaire la demande en dépit d'une production éolienne intermittente.

Notre chapitre premier portera sur la société d'accueil, l'ONEE-Fès, qui nous a acceptées comme stagiaire dans le cadre de notre projet de fin d'études.

Dans le deuxième chapitre, une lumière sera faite sur l'énergie éolienne et bien entendue sa position dans la production nationale marocaine, puis nous développerons la notion de crédit de capacité de l'éolien.

Nous passerons ensuite au chapitre suivant qui portera sur l'étude de la fiabilité d'un réseau, principalement la méthodologie d'étude de fiabilité d'un système hybride i.e. comprenant, et les sources conventionnelles et les sources intermittentes (éolienne).

Tout le travail en amont sera couvert par un dernier chapitre dans lequel nous analyserons l'impact à long terme de l'éolien sur la sûreté de fonctionnement d'un système électrique, suivi de l'analyse du crédit de capacité du parc éolien de TAZA, en terme d'application sur le réseau national.

# CHAPITRE 1 : SOCIÉTÉ D'ACCUEIL ET CONTEXTE DU PROJET

## 1- APERÇU GÉNÉRAL SUR L'ONEE

### *a- Présentation de l'ONEE*

Créé par Dahir en août 1963 l'Office National de l'Électricité et de l'Eau Potable a été substituée à la Société Electrique du Maroc pour prendre en main le secteur électrique : production, transport et distribution. C'est un établissement public ayant un caractère industriel et commercial et possédant une autonomie financière.

Les droits et obligations de l'ONEE sont définis dans un cahier de charges approuvé par décret en 1974, qui indique les conditions techniques, administratives et financières relatives à l'exploitation des ouvrages de production, de transport et de distribution de l'électricité.

Les ouvrages de production dont dispose l'ONEE, sont constitués de 24 usines hydroélectriques totalisant une puissance installée de 1 283.8MW, de 5 centrales thermiques vapeurs totalisant 2 385MW, de 7 centrales à turbines à gaz et plusieurs centrales Diesel totalisant 1093.7MW et un parc éolien de 250.4MW.

Le réseau de transport, reliant les moyens de production aux centres de consommation, qui couvre une très grande partie de territoire national, est constitué de lignes 400KV, 225KV, 150KV et 60KV d'une longueur totale de l'ordre 17107 KM environ. Il est par ailleurs interconnecté avec le réseau algérien au moyen de deux lignes 225KV et une ligne de 400KV et avec le réseau espagnol au moyen de trois lignes de 400kv sous-marins.

La coordination de gestion de l'ensemble du réseau de l'ONEE est assurée à partir des :

- Réseaux de distribution de l'ONEE sont constitués de près de **36955 KM** en moyenne tension et de **92 130 KM** en basse tension. L'énergie électrique est distribuée par l'ONEE en zone rurale et dans plusieurs centres urbains.
- Régimes municipaux ou intercommunaux, placés sous la tutelle du Ministère de l'Intérieur pour les grands centres urbains.

Le Dispatching national, implanté à Casablanca est doté de moyens modernes permettant une surveillance permanente et une exploitation optimale.

### *b- Mission de l'ONEE*

Les missions de l'ONEE se scindent en cinq différents points à savoir :

- Gérer et développer le réseau du transport.
- Répondre aux besoins du pays en énergie électrique.
- Planifier, intensifier et généraliser l'extension et l'électrification rurale.
- Œuvrer pour la promotion et le développement des énergies renouvelables.
- Gérer la demande globale de l'énergie électrique

### *c- Objectifs de l'ONEE*

L'ONEE détaille ses objectifs en deux principaux points qui sont :

- ❖ Couvrir dans les meilleures conditions techniques et économiques la progression de la demande d'énergie. Réduire les tarifs moyens et hautes tensions pour atteindre des prix concurrentiels au Maroc.
- ❖ Assurer directement ou indirectement la couverture financière de programmes d'investissements de plus en plus lourds et indispensables au développement de l'économie de pays.

Devant la volonté de désengagement de l'état d'autre part, l'ONEE s'oriente vers l'approche qui consiste à avoir recours aux producteurs concessionnaires privés, à la coopération par les interconnexions des réseaux avec des puissances garanties

### *d- Activités de l'ONEE*

L'ONEE opère dans les trois métiers-clés du secteur de l'électricité : la **production**, le **transport** et la **distribution**.

#### ❖ Production d'énergie

En tant que producteur, l'ONEE a la responsabilité de fournir sur tout territoire national et à tout instant une énergie de qualité dans les meilleures conditions économiques. Il assure cette fourniture par les moyens de production qu'il exploite directement ainsi que par les ouvrages qu'il a confiés à des opérateurs privés dans le cadre de contrats de production concessionnaire.

Au-delà de la gestion technique et de l'amélioration des ouvrages de son parc de production, l'ONEE développe de nouveaux moyens de production et de nouvelles technologies en conciliant performance économique, expertise technique, modélisation des ressources énergétiques nationales notamment les énergies renouvelables et préservation de de l'environnement.

À fin 2014, la puissance totale installée du parc de production électrique de l'Office s'élève à **7 994 MW**, contre 7 342,2 MW en 2013 ; 32% de la puissance installée est de source renouvelable.

Centrales	Puissance installée en MW
usines hydrauliques *	1 306
STEP	464
<b>centrales thermiques vapeur</b>	<b>3 145</b>
charbon (y compris JLEC)	2 545
fioul	600
Centrales turbines à gaz	1 230
Cycle combinés	850
Thermique Diesel	202
<b>Total Thermique</b>	<b>5 427</b>
Eolie **	797
<b>Total ONEE</b>	<b>7 994</b>

(\*) à la cote maximale des retenues  
 (\*\*) à la cote maximale du vent

Figure 1 : tableau récapitulatif de la puissance installée en 2014

### ❖ Transport d'énergie

Ayant pour mission d'assurer le transport de l'énergie électrique et la sécurité d'alimentation du pays, l'ONEE développe et renforce son réseau de transport qui couvre la quasi-totalité du territoire national. D'une longueur totale de **23 332 km en 2014**, le réseau de transport national est interconnecté aux réseaux électriques espagnol et algérien, dans l'objectif de :

- Renforcer la fiabilité et la sécurité d'alimentation.
- Bénéficier de l'économie potentielle sur le prix de revient du kWh.
- Intégrer le marché électrique national dans un vaste marché euromaghrébin.

Avec le renforcement des interconnexions, le Maroc est devenu un carrefour énergétique entre les deux rives de la Méditerranée et offre l'infrastructure de base à l'émergence d'un véritable marché de l'électricité. Pour répondre aux besoins du pays en énergie électrique, l'ONEE a lancé un vaste programme de développement du réseau national de transport et de mise en place de véritables " *autoroutes de l'électricité* " vers les pays voisins.

Ce programme comprend :

- L'extension et le renforcement des lignes 400 kV, 225 kV et 60 kV.
- Un nouveau dispatching national, (DOS), pour assurer une meilleure gestion technico-économique des moyens de production et de transport.
- La mise en place de la télégestion des centrales.

### ❖ Distribution d'énergie

En ce qui concerne la distribution d'énergie, l'ONEE est :

- Le premier distributeur d'électricité au Maroc avec une part de marché de 55%,
- 10 directions régionales sur tout le territoire,
- Plus de 5,1 millions de clients dans tout le monde rural et plusieurs agglomérations urbaines. Le reste de la clientèle étant gérée par des Régies de distribution publiques ou des Distributeurs privés qui sont eux-mêmes clients Grands Comptes de la Branche Electricité,
- Un réseau commercial de 25 Directions Provinciales et 192 Agences de Service dont 66 Agences de service provinciales,
- Une amélioration continue de la qualité de services : externalisation des points d'encaissement, promotion du prépaiement, mise en place de " SIRIUS ", progiciel intégré de gestion commerciale, télé conduite régionale...

➤ A fin 2014, le nombre de clients a atteint 5 140 974 clients.

► Répartition de l'Electricité Vendue :

	Nombre de Clients*			Ventes en GWh		
	2013	2014	%	2013	2014	%
<b>Distributeurs**</b>	55	54	-1,8%	11 718	12 094	3,2%
<b>Industrie</b>	40 304	40 995	1,7%	6 759	6 924	2,4%
<b>Tertiaire</b>	430 590	445 539	3,5%	1 863	1 981	6,3%
<b>Administratif</b>	67 539	71 088	5,3%	892	943	5,7%
<b>Résidentiel</b>	4 339 409	4 540 930	4,6%	4 787	5 075	6,0%
<b>Agricole</b>	39 870	42 368	6,3%	1 750	1 808	3,3%
<b>TOTAL</b>	<b>4 917 767</b>	<b>5 140 974</b>	<b>4,5%</b>	<b>27 769</b>	<b>28 825</b>	<b>3,8%</b>

(\*): Il s'agit du nombre de contrats actifs à fin décembre

(\*\*): Il s'agit de 11 distributeurs

Figure 2 : Détails de distribution de l'énergie (ONEE)

e- ONEE Fès-Oujda

❖ La Direction Transport Région Oriental – Oujda – « DTO »

La Direction Transport Région Oriental – Oujda couvre le territoire des régions Orientale, TAZA-TAOUNATE-ELHOUSEIMA, OUJDA, FES-BOULEMANE - MEKNES-Tafilalet et ERRACHIDIA. Elle est chargée d'assurer l'exploitation des ouvrages du réseau de transport, ainsi que les études de conception et de réalisation des lignes 60 kV et postes HT/MT situés sur le territoire couvert par la DTO dans les meilleures conditions de sécurité,

qualité de service et au moindre coût. Afin d'atteindre ses objectifs, la DTO est dotée de trois Divisions et quatre Services lui sont rattachés fonctionnellement.

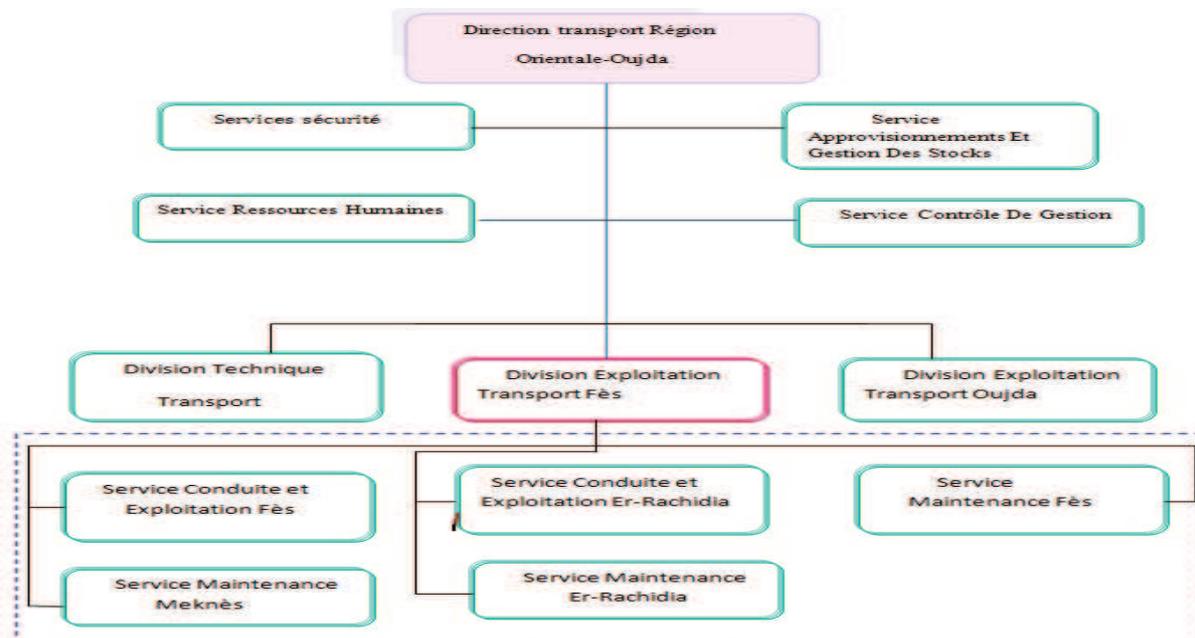


Figure 3 : Organigramme de L'ONEE Fès-Oujda

#### ❖ Division Exploitation Transport FES « XF »

La Division Exploitation Transport FES(XF) a pour missions principales :

- Assurer l'identification, l'inscription budgétaire et le suivi et la réception de l'ensemble de matériel nécessaire à la maintenance.
- Assurer l'exploitation, la maintenance corrective et préventive, la conduite des ouvrages, HTB (THT/HT) (Lignes HTB (THT/HT), postes HTB (THT/HT), partie HT dans les postes HT/MT, Comptage des clients grand compte,) sur le territoire couvert par les services Exploitations maintenance et conduite du Transport ERRACHIDIA et Fès avec la meilleure qualité de service et au moindre coût en veillant sur la sécurité des personnes et des ouvrages.
- Assurer des prestations techniques et les demandes de prestations de maintenance pour le compte des clients grand compte ONCF et Régies (RADEM, RADEEF, HOLCIM, LAFARGE, ...)
- Superviser et coordonner l'exploitation, la maintenance et la conduite des ouvrages Transport
- Elaborer et assurer le suivi de la mise en œuvre des programmes de maintenance mensuelle, annuelle et triennal dans le respect de la politique de maintenance des ouvrages Transport
- Analyser les incidents enregistrés sur le réseau entretenu par La Division Exploitation Transport de Fès; proposer des mesures d'amélioration ; élaborer le rapport d'incident préliminaire et faire dégager les actions correctives a engagé.
- Réceptionner et mettre en service les nouveaux ouvrages lignes et postes Transport.

## **2- CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE DU PROJET**

Loin de s'inscrire dans le seul contexte du développement économique, l'énergie éolienne permet d'atteindre des objectifs environnementaux et sociaux très importants. C'est dans ce contexte que le Projet Eolien Intégré (PEI) a été lancé au Maroc, afin d'inclure la production éolienne dans le système de production national. L'éolien offrant clairement bien plus d'avantages par rapport aux autres sources de production, une étude sur son insertion, surtout à long terme, n'est point à négliger.

Les sources conventionnelles, aujourd'hui pointées du doigt quand la question environnementale est abordée, souffrent également d'épuisement de matière première. Les énergies renouvelables, de parts leurs natures présentent le gros avantage d'un faible impact sur l'environnement. Ces aspects témoignent du taux de pénétration de plus en plus élevé des sources renouvelables, en particulier l'éolienne dans les réseaux électriques actuels. Étudier l'impact à long terme des productions intermittentes dans la sûreté de fonctionnement du réseau électrique et analyser leurs intégrations dans le mix de production, tels seront nos objectifs dans ce travail.

# CHAPITRE 2 : ENERGIE ÉOLIENNE ET NOTION DE CRÉDIT DE CAPACITÉ

## INTRODUCTION

Bien qu'occupant une part très importante dans le développement économique, la production d'électricité est au cœur des discussions d'ordre climatique et environnemental, du fait de sa forte émission de gaz à effet de serre.

Dans ce contexte, de nouvelles alternatives pour la production d'électricité doivent être envisagées sans avoir comme seul souci la satisfaction de la demande d'une population sans cesse croissante. En effet, le maintien du « statu quo » mettrait l'humanité dans une position où sa propre survie est menacée. Cette transition exige, non pas la prise en compte des seuls objectifs économiques, mais que les objectifs environnementaux, sociaux et économiques se partagent la priorité.

Parmi les différentes énergies renouvelables, l'éolien connaît un essor particulièrement important depuis plus de 30 ans. Pourtant l'utilisation de l'énergie du vent par l'Homme remonte à beaucoup plus longtemps. Retraçons brièvement son évolution.

### I- ENERGIE ÉOLIENNE

#### 1- HISTORIQUE

La production d'électricité en utilisant la ressource vent a vu le jour au XIXème siècle grâce aux contributions respectives de Brush aux États-Unis et de LaCour au Danemark, mais cette technologie a connu un réel progrès dans les années 70, avec la crise pétrolière. C'est alors que certains pays comme, le Royaume-Uni, l'Allemagne, la Suède et les USA ont commencé à financer des programmes de recherche pour permettre la construction des premiers prototypes. Cela commence d'abord par de petites éoliennes à trois pâles et à vitesse fixe, qui ont ensuite été développées à des dimensions plus grandes. Par la suite, les éoliennes à vitesse variable sont apparues et continuent par faire leurs preuves. Cette industrie a considérablement explosé au cours des années 90 où elle passe de 200 MW/an en 1990 à 5500 MW/an en 2001 (croissance moyenne annuelle de 40% sur les 5 dernières années, surtout exprimées en Europe).

Deux des objectifs fixés par l'Union européenne (UE) en 1997 étaient que 12% des besoins énergétiques en Europe proviennent des sources renouvelables à l'horizon 2010, et la capacité installée concernant l'éolien devait atteindre les 40 GW à la même échéance. Malgré le fait que le second objectif ait été atteint dès 2005, la part des énergies renouvelables est seulement passée de 5% en 1997 à 8% en 2007 et risque de ne pas atteindre les 12% en 2010. On compte, en 2009, 75 GW de capacité installée en puissance éolienne sur l'Europe (dont 10 GW installés seulement au cours de l'année 2009). La part d'électricité produite par l'éolien dans l'UE s'élève ainsi à 4, 8% au cours d'une année dont le régime de vent est classique. À titre d'information, l'énergie éolienne a permis d'éviter, sur l'année 2009, l'émission de 106

millions de tonnes de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, ce qui est équivalent à ôter 25% des voitures de l'UE de la circulation (source : EWEA, European Wind Energy Association)

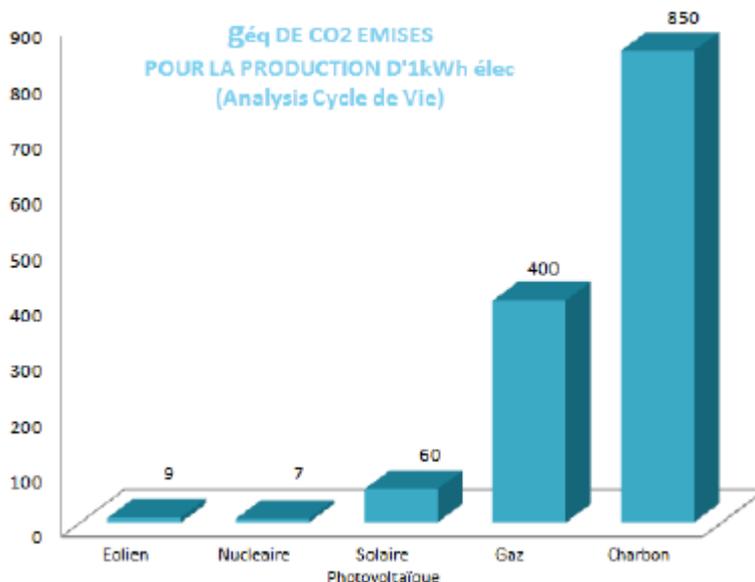


Figure 4 : Dégagement de CO<sub>2</sub> liée aux différentes unités de production

Aujourd'hui, l'UE prévoit une capacité installée de 230 GW d'ici 2020, soit de 14 à 17% de la demande en électricité assurés par l'éolien.

Pays	Référence 2005 (%)	Situation en 2010 (%)	Objectif en 2020 (%)
Allemagne	5.8	11	18
Autriche	23.3	30.1	34
Belgique	2.2	5.1	13
Danemark	17	22.2	30
Espagne	8.7	13.8	20
Finlande	28.5	32.2	38
France	10.3	12.9	23
Grèce	6.9	9.2	18
Irlande	3.1	5.5	16
Italie	5.2	10.1	17
Luxembourg	0.9	2.8	11
Pays-Bas	2.4	3.8	14
Portugal	20.5	24.6	31
Royaume-Uni	1.3	3.2	15
Suède	39.8	47.9	49
<b>Union Européenne</b>	<b>8.3</b>	<b>12.5</b>	<b>20</b>

Tableau 1 : Objectif de production éolienne en Europe

## 2- CAS DU MAROC

Dans le cadre de sa stratégie énergétique, le Maroc s'engage dans un vaste programme éolien, pour accompagner le développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique dans le pays. De ce fait, un programme très ambitieux de développement de ces énergies renouvelables a été adopté récemment par le gouvernement, le Projet Marocain intégré de l'Énergie Éolienne, s'étalant sur une période de 10 ans pour un investissement total estimé à 31,5 milliards de dirhams, permettra au pays de porter la puissance électrique installée d'origine éolienne de 280 MW en 2010 à 2000MW à l'horizon 2020 (Figure 5), soit une augmentation d'environ 9%.

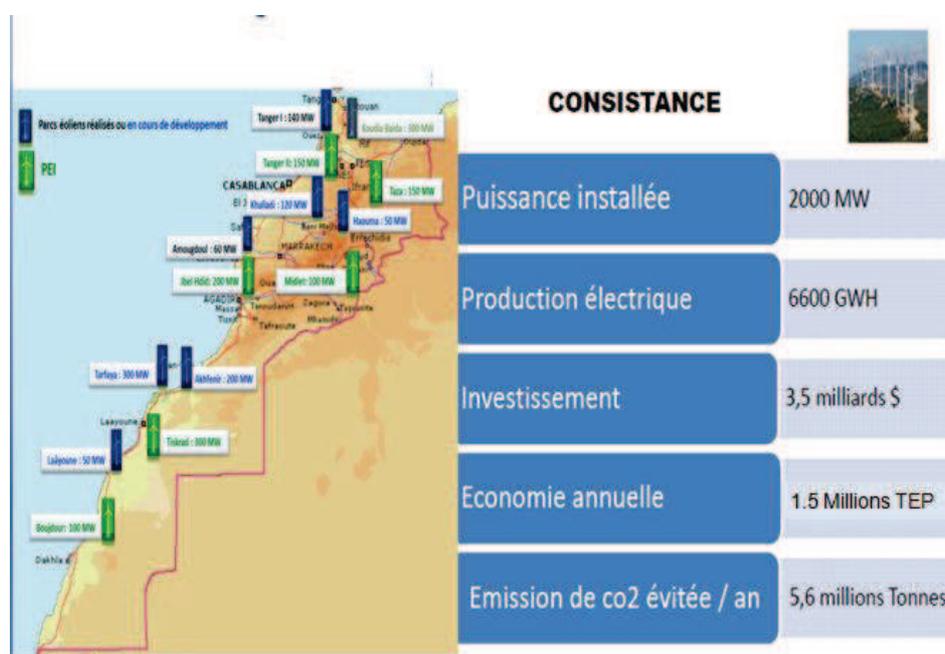


Figure 5 : Projet Eolien Intégré (PEI)

### *But et Objectif du Projet Eolien Intégré (PEI)*

➤ But :

Une implantation de 1720 MW de nouveaux parcs éoliens à l'horizon 2020 prévu dans le cadre du PEI se fera comme suit :

- ✦ **720 MW** en cours de développement à **Tarfaya** (300 MW), **Akhfenir** (200 MW), **Bab El Oued** (50 MW), **Haouma** (50 MW) et **Jbel Khalladi** (120 MW)
- ✦ **1 000 MW** prévus sur 5 nouveaux sites choisis pour leur grand potentiel: **Tanger 2** (150 MW), **Koudia El Baida** à Tétouan (300 MW), **Taza** (150 MW), **Tiskrad** à Laayoune (300 MW) et **Boujdour** (100 MW).

➤ Objectifs :

Les objectifs du PEI s'inscrivent non seulement dans le souci de satisfaction de la clientèle, mais également dans un souci de protection de l'environnement. Ils peuvent être listés comme suit :

- ✦ Augmenter la part de l'énergie éolienne dans la capacité électrique totale à 9% à l'horizon 2020.
- ✦ Atteindre une capacité de production à partir de l'énergie éolienne de 2 GW et une capacité de production annuelle de 6600 GWh, correspondant à 26% de la production électrique actuelle.
- ✦ Economiser en combustibles 1,5 million de tonnes équivalent pétrole annuellement, soit 750 millions de dollars US, et éviter l'émission de 5,6 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> par an, ce qui correspondrait à la mise hors-circulation de 15% de voitures de l'Union Européenne. Cela représente un engagement non moindre dans la lutte contre le réchauffement climatique.

La somme des études réalisées dans le cadre de ce programme éolien intégré (PEI) permet de résumer les régions d'installation des parcs ainsi que leurs capacités. Le détail est présenté sur la Figure 6 suivante :

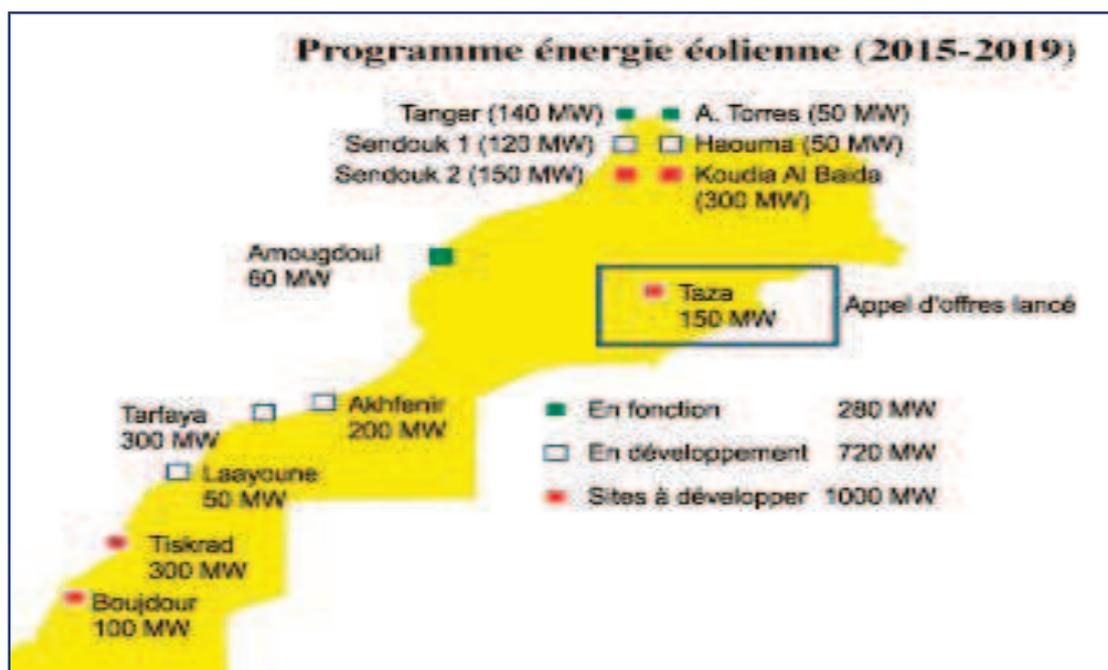


Figure 6 : Programme d'énergie éolienne

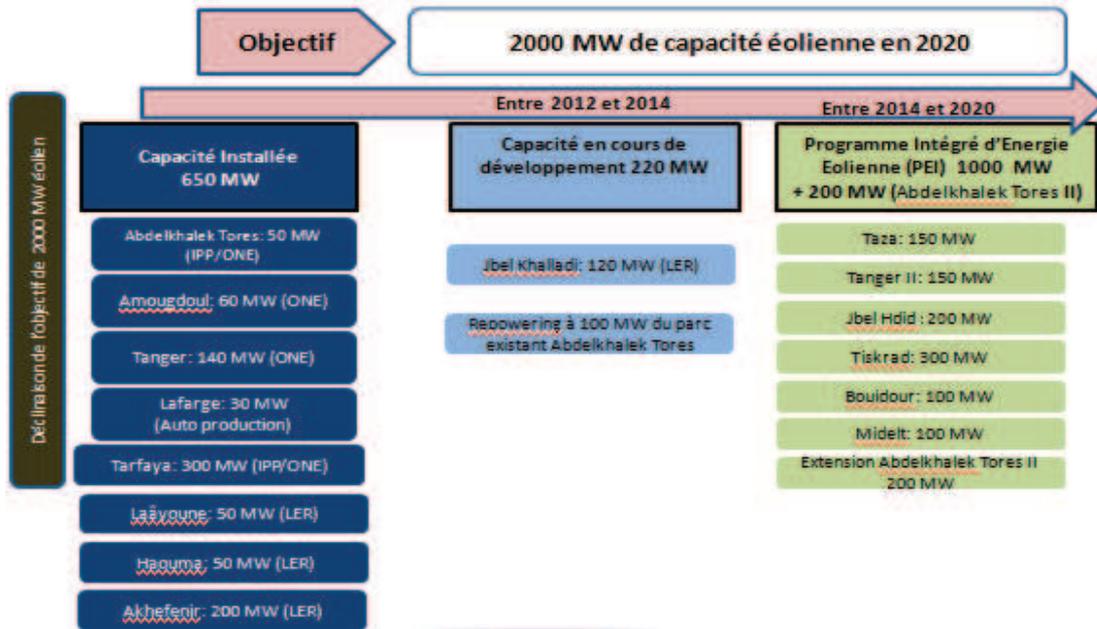


Figure 7 : Détail des objectifs du PEI

### 3- PRINCIPE D'UNE ÉOLIENNE

Le principe d'une éolienne est de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique (dans cette étude, l'intérêt est porté sur les éoliennes à axe horizontal formées de trois pales). Ainsi la puissance fournie par une éolienne est directement dépendante de la vitesse du vent par la relation :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S C_p V^3$$

Équation 1

Où :

$\rho$  Masse volumique de l'air (environ 1.225 Kg/m<sup>3</sup>) ;  $S$  surface décrite par les pâles de l'éolienne ;  $V$  vitesse du vent et  $C_p$  est le coefficient de puissance aérodynamique (16/27 ou 59% d'après la loi de Betz).

La Figure 8 représente la courbe de puissance d'une éolienne et on constate que la production d'énergie est nulle en dessous d'une certaine vitesse de vent, appelée "cut-in". Elle augmente ensuite brusquement selon l'équation 1, jusqu'à une certaine valeur de la vitesse dite nominale "rated". Au-delà de cette vitesse, l'éolienne produit sa puissance nominale jusqu'à la vitesse de coupure "cut-off" que l'on considère comme vitesse de sécurité en vue d'éviter des éventuels dommages. La puissance retombe donc à zéro au-delà de cette vitesse.

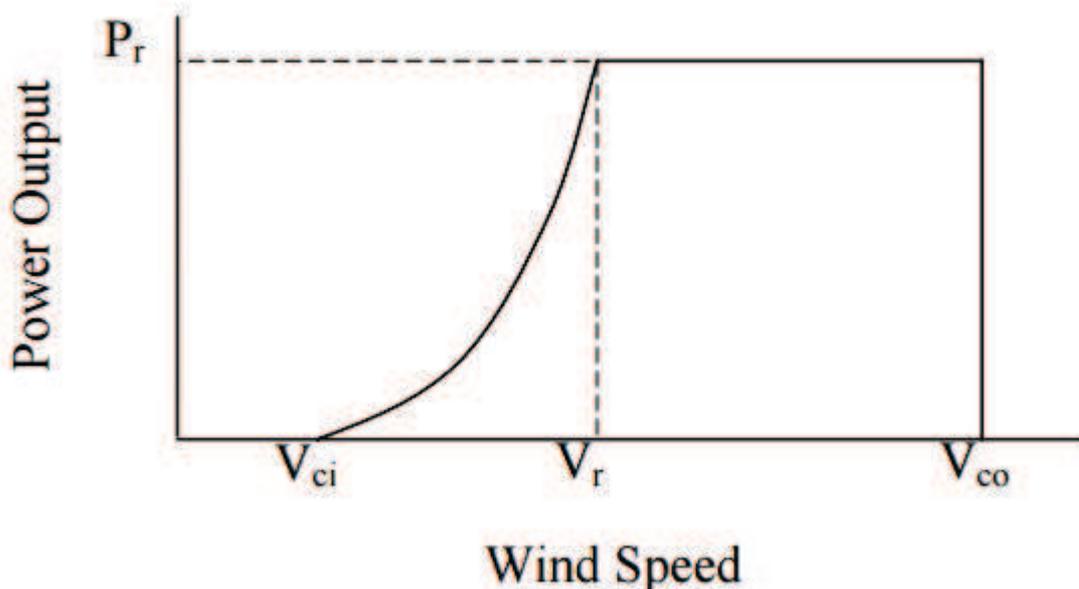


Figure 8 : Courbe de puissance d'une éolienne à vitesse variable

#### 4- AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS

L'énergie éolienne présente de nombreux avantages. Dans un premier temps, étant 'non émettrice' de GES, en comparaison aux énergies traditionnelles telles que gaz, pétrole et charbon (GES) ou au nucléaire (déchets radioactifs), son impact sur l'environnement est quasi nul. Elle présente également l'avantage d'être une énergie renouvelable ce qui sous-entend que sa ressource ne sera pas épuisée à l'avenir. De plus, elle n'est pas dangereuse comme peut l'être le nucléaire et présente un coût faible qui continue par baisser. Elle est désormais moins chère que les énergies fossiles et est même la moins chère des énergies renouvelables. En outre, son coût peut être prédit avec très peu d'incertitude à la différence des fluctuations de prix qui touchent le charbon, le gaz ou le pétrole. Enfin, l'énergie éolienne permet d'alimenter des sites isolés qui ne peuvent être connectés au réseau électrique.

L'éolien ne dispose pas seulement d'avantages, mais possède aussi quelques inconvénients qu'il ne faut pas négliger. Un des inconvénients et non des moindres est sa pollution sonore, bien que le bruit engendré par les éoliennes ait nettement diminué. Le principal désavantage de cette énergie est en réalité le caractère intermittent de sa ressource, le vent. La puissance obtenue dans l'équation de production éolienne est fortement dépendante de la vitesse du vent puisque proportionnelle au cube de celle-ci et est donc elle-même hautement instable, ce qui la rend difficilement prévisible. Or, l'un des intérêts des exploitants du réseau électrique est justement de contrôler la production à venir et de la répartir sur le réseau de manière à répondre au mieux à la demande. Ils se doivent donc de maîtriser les ressources et notamment la ressource éolienne pour une intégration efficace de celle-ci dans le réseau, efficacité qui passe par le choix des sites d'implantation d'une part et par la prévision de la production énergétique future d'autre part. Une exploitation optimale de l'énergie éolienne repose donc sur la maîtrise de sa production.

## II- CRÉDIT DE CAPACITÉ DE L'ÉOLIEN

Dans la section précédente, les avantages et inconvénients de l'énergie éolienne ont été présentés. Une lumière a été faite sur l'inconvénient principal qui est l'incertitude de la production éolienne et exploiter au mieux l'énergie éolienne pour une dynamique d'insertion à long terme est le défi de tout système électrique.

Le caractère aléatoire de la production éolienne pourrait également impacter dans le long terme la sûreté de fonctionnement du système. La sûreté de fonctionnement est considérée dans ce cas comme la faculté du système à faire face aux multiples aléas susceptibles de perturber son fonctionnement et à limiter les conséquences de ces perturbations.

À la lumière de tout ceci, une étude sur l'impact à long terme de la production éolienne est bien plus que nécessaire. Jusqu'à quel niveau, en terme de capacité et de flexibilité, l'éolien peut-il remplacer les centrales actuelles conventionnelles ? Pour répondre à cette question nous allons utiliser le concept du crédit de capacité de l'éolien ( $CC_E$ ) qui peut être défini, selon [1], comme étant « la part de capacité éolienne installée qui peut être substituée à des moyens de production classiques sans mettre en danger la sûreté de fonctionnement (SF) du réseau ». L'analyse du crédit de capacité est donc très importante pour mieux appréhender l'impact technico-économique de l'éolien, à long terme, sur les réseaux électriques.

### 1- DÉTERMINATION DU CRÉDIT DE CAPACITÉ

Dans notre étude, afin de déterminer le  $CC_E$  nous allons modéliser de façon probabiliste le système électrique. Le modèle probabiliste d'un système électrique doit permettre de décrire le comportement des variables incertaines du système et les corrélations entre ces incertitudes. Il ne s'agit plus simplement de modéliser le système par un jeu de paramètres d'entrée fixes, mais de caractériser, de quantifier l'incertitude liée à ces paramètres. Ainsi dans le modèle probabiliste du système électrique tel que nous le définissons, le jeu de paramètres d'entrée laisse place à un jeu de lois de probabilités, chacune caractérisant la variation d'un paramètre.

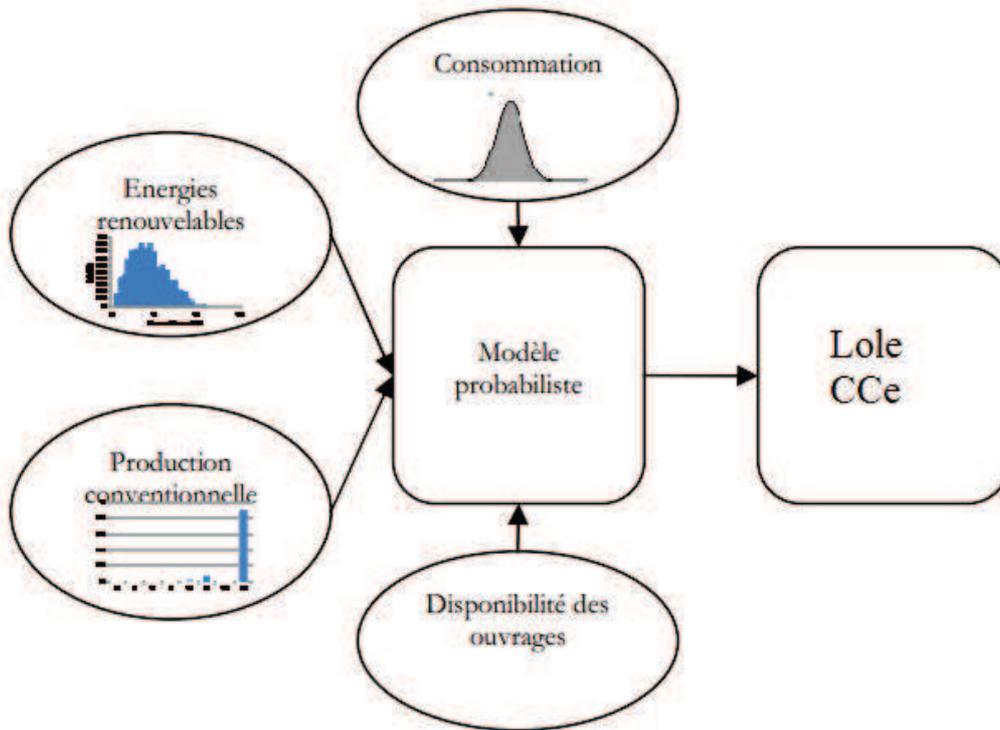


Figure 9 : Modèle probabiliste pour l'analyse du  $CC_E$

Dans le cadre de son étude doctorale, propose un algorithme de détermination du crédit de capacité.

Cet algorithme recevra en entrées les caractéristiques du système électrique à savoir :

- Les unités de production conventionnelle et leurs taux de défaillance
- Les données de consommation du système
- Le profil de vent du site sur lequel seront installées les éoliennes
- La courbe de puissance des éoliennes qui seront installées

Le  $CC_E$  sera déterminé après une étude comparative de la fiabilité du système sans et avec la présence de la production renouvelable.

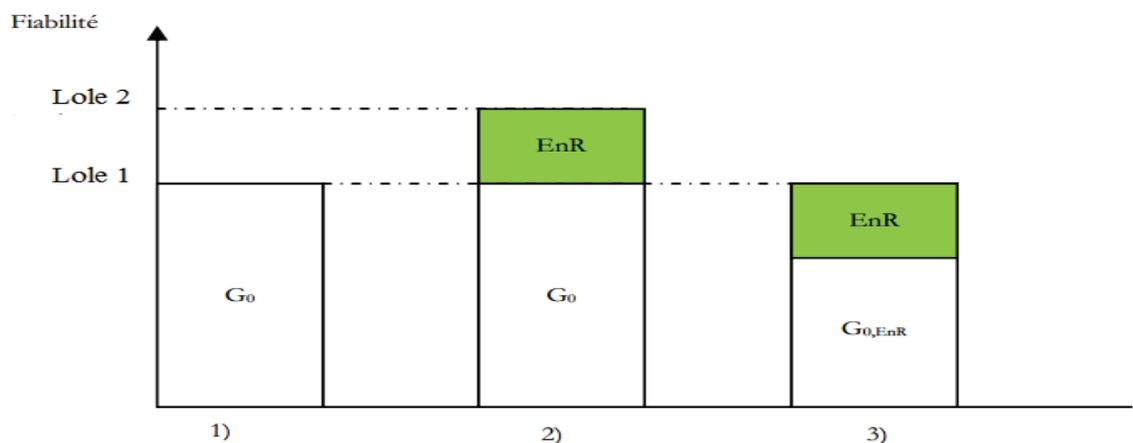


Figure 10 : Calcul du  $CC_E$

L'analyse du  $CC_E$  est faite selon le critère de remplacement de la production thermique, ceci signifie qu'une unité A de capacité X MW sera retirée du système. L'objectif est d'estimer la capacité minimale d'éoliennes qui doit être installée en gardant le même niveau de fiabilité du système.

L'explication sous forme paramétrique est la suivante : lorsqu'une capacité X MW est retirée du système, le taux de sûreté  $\tau_{\text{original}}$  (LOLE) est affecté. Le nouveau taux de sûreté  $\tau_x$  permettra de satisfaire les exigences du système et de couvrir la demande. Nous cherchons donc la capacité K qui peut être installée pour atteindre  $\tau_{\text{original}}$ . Un tableau semblable à celui présenté ci-dessous devra être rempli dans le but de calculer le  $CC_E$ .

Taux de fiabilité du système LOLE (heures/an)	Capacité thermique retirée (MW)	Capacité éolienne installée (MW)
$\tau_x = \tau_1$	$\chi$	$K_{l=0}$
$\tau_2$		$K_2$
•		•
•		•
•		•
$\tau_{\text{original}}$		$K_n$

Tableau 2 : Tableau d'estimation de la capacité éolienne équivalente

En conséquence, le crédit de capacité peut donc être calculé par l'expression suivante :

$$CC_E = \frac{\chi}{K_n} \times 100\%$$

Équation 2

Afin d'automatiser ce calcul qui est onéreux, nous allons implémenter l'algorithme proposé par

## 2- ALGORITHME DE DÉTERMINATION DU CCE

Dans le cadre de son étude doctorale a proposé l'algorithme suivant afin de déterminer le crédit de capacité que l'on pourrait attribuer à l'éolien. Cet algorithme reçoit en entrée :

- Les unités de production conventionnelle et leurs taux de défaillance
- Les données de consommation du système
- Le profil de vent du site sur lequel seront installées les éoliennes
- La courbe de puissance des éoliennes qui seront installées

En sortie, il fournira :

- Le niveau de fiabilité du système hybride (système + production renouvelable)
- Le nombre d'unités éoliennes introduit dans le système

Cette dernière information nous permettra de déduire le  $CC_E$  qu'il va falloir accorder à l'éolien, en appliquant l'équation ci-dessus.

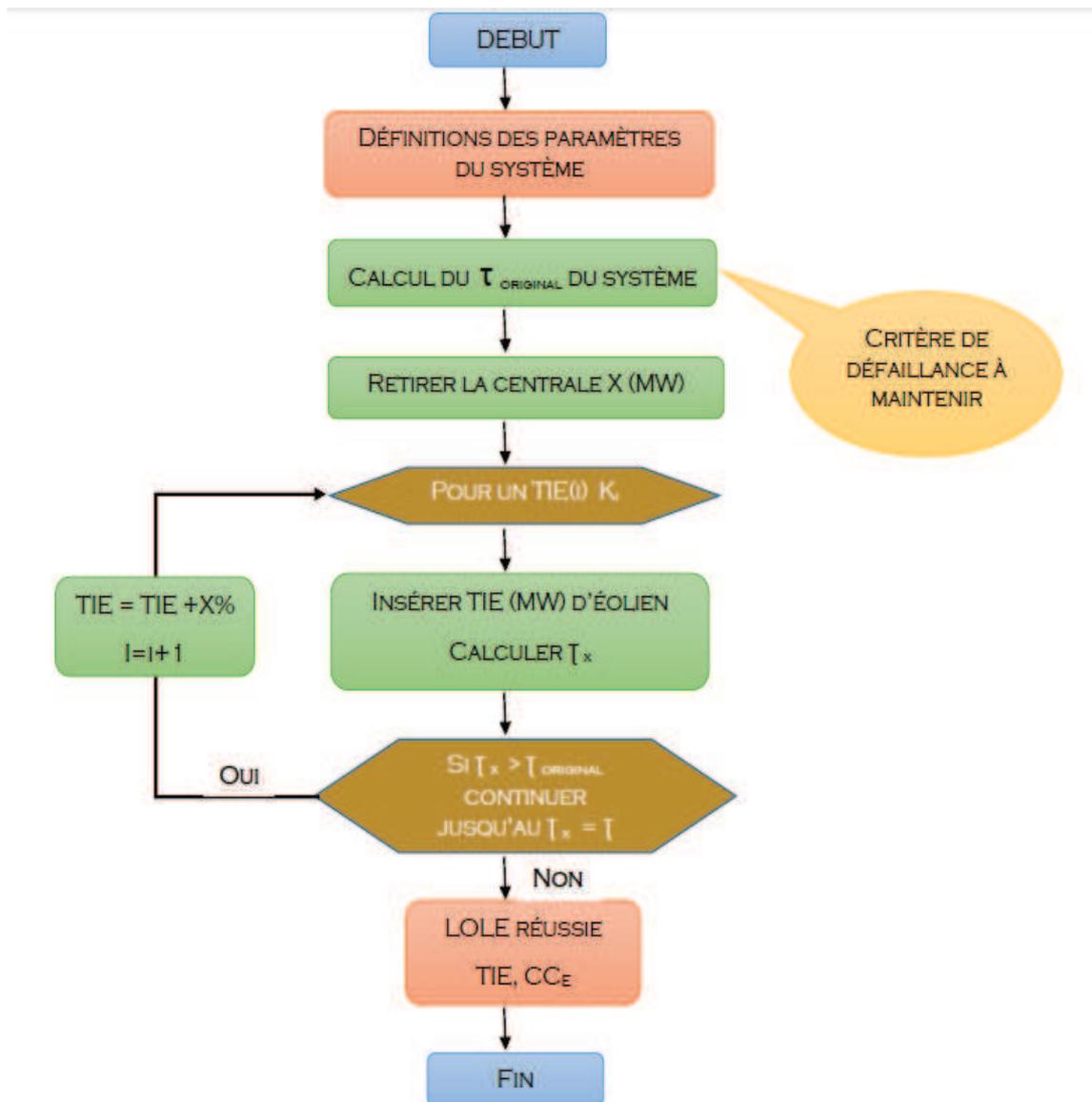


Figure 11 : Algorithme de détermination du  $CC_E$

## CONCLUSION

Dans ce chapitre, il a été question non seulement de l'énergie éolienne, mais également de la notion de capacité de crédit. En effet, nous avons parlé, dans un premier temps, de l'énergie éolienne en faisant une lumière, pas que sur les objectifs fixés en Europe, en ce qui concerne l'intégration de l'éolienne dans les sources de production d'énergie électrique, mais également de la position du Maroc en ce même sens. À travers le Projet Eolienne Intégré, le Maroc a prouvé son engagement au respect des décisions prises lors du protocole de Kyoto.

Dans la deuxième partie du chapitre, nous avons mis l'accent sur la notion de crédit de capacité, qui est définie comme la part d'énergie éolienne capable de remplacer les productions conventionnelles sans altérer le niveau de sûreté du système électrique. Nous n'avons pas manqué de présenter un algorithme de détermination de ce crédit de capacité, algorithme que nous allons implémenter afin de répondre au cahier de charge.

La notion de crédit de capacité, bien que simple, en apparence et au vu de l'algorithme, est une notion plutôt compliquée quand on s'adonne à l'implémentation de l'algorithme en vue de sa détermination. Elle fait appel à la notion de niveau fiabilité d'un réseau électrique et c'est sur cette notion que va reposer le prochain chapitre.

# CHAPITRE 3 : ÉTUDE DE LA FIABILITÉ D'UN RÉSEAU

## INTRODUCTION

L'objectif de tout réseau électrique est double : satisfaire la demande à coût raisonnable et garantir avec **sécurité** la continuité et la qualité du service

La notion de sécurité est issue des études de sûreté de fonctionnement à savoir la fiabilité des réseaux électriques. La fiabilité désigne donc l'aptitude d'un système à accomplir une fonction requise, dans le cas des réseaux électriques la fonction primaire est l'approvisionnement d'électricité des centres de production jusqu'au consommateur final

Nous allons nous intéresser à la fiabilité en termes d'« **adéquation du système** » et comprenons par **adéquation**, la disponibilité d'une capacité de production d'électricité à satisfaire tant la demande que les contraintes de fonctionnement du système

Nous analyserons, dans notre étude, la notion de fiabilité liée à la production. Dans un premier temps nous étudierons le système de production classique puis l'étude en présence de la source intermittente sera abordée.

### I- FIABILITÉ DES SYSTÈMES DE PRODUCTION CONVENTIONNELS

Dans la littérature scientifique, deux méthodes sont principalement évoquées lorsqu'il faut analyser la fiabilité des réseaux :

- L'approche analytique
- L'approche par simulation

Mais, l'approche classique qui permet d'évaluer l'adéquation d'un système particulier est la même pour toutes les techniques que ce soit la méthode analytique ou la méthode par simulation. Elle est composée de trois parties comme indiquée sur la Figure 12.

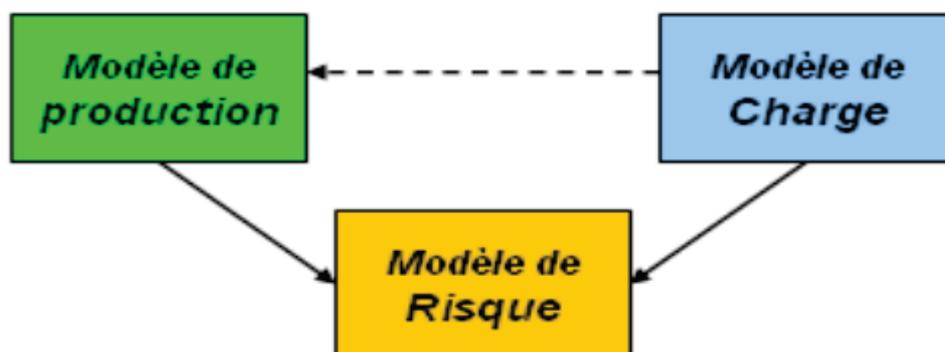


Figure 12 : Modèle d'évaluation de l'adéquation des systèmes de production d'électricité

Combiner les modèles de charge et de production de la figure précédente en modèle de risque permet de déterminer le degré de sécurité d'un système particulier . La représentation du système d'étude conventionnel est illustrée en Figure 13.

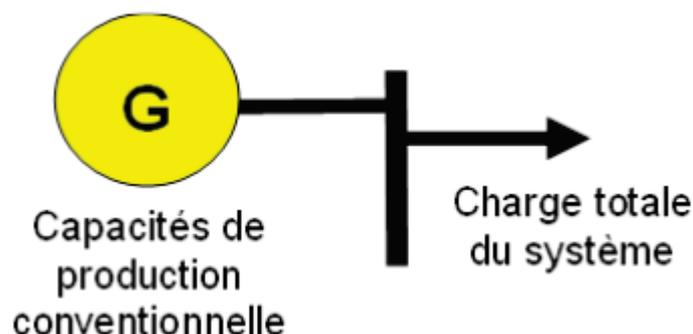


Figure 13 : Modèle du système conventionnel

Déterminer le modèle de risque revient à calculer l'indice de fiabilité pour couvrir la demande (ou charge totale) du système. En effet les calculs de fiabilité se basent sur le calcul d'indicateurs probabilistes au moment de la demande de pointe. Ces indicateurs indiquent le niveau de perte de la production pour couvrir la demande, ils sont du type **LOL** (« Loss Of Load » en anglais) :

- **LOLP** « Loss Of Load Probability » : c'est le plus ancien et le plus basique des critères. Il définit la probabilité de ne pas satisfaire la demande sur une période donnée. Il caractérise donc le risque de délestage mais ne donne aucune indication sur l'ampleur de celui-ci.
- **LOLE** « Loss Of Load Expectation » : étant le critère le plus largement utilisé pour la planification et le choix de capacités futures pour le système, il est défini comme l'espérance mathématique du nombre d'heures (resp. de jours) de l'année durant lesquels la demande de pointe horaire (resp. journalière) n'est pas satisfaite faute de capacité de production.
- **LOEE** « Loss Of Energy Expectation » : c'est l'espérance mathématique de l'énergie non fournie du fait de l'insuffisance des capacités de production par rapport à la demande. Il donne une idée de la sévérité du délestage.
- **LOLF** « Loss Of Load Frequency » : nombre moyen de fois où il y a insuffisance de capacité de production par rapport à la demande.

L'indice sur lequel portera notre étude est l'indice LOLE du fait qu'il est plus utilisé.

### 1- MODÈLE DE PRODUCTION CONVENTIONNELLE

La production conventionnelle désigne l'ensemble des centrales de production classiques (thermique, hydraulique, nucléaire...). Chaque unité est caractérisée par un taux de défaillance qui lui est propre. Appelé en anglais « *Forced Outage Rated* » (FOR), le taux

d'indisponibilité est défini comme étant la probabilité qu'une unité soit hors service à un moment donné.

Une unité conventionnelle possède deux états auxquels sont associés des probabilités :

- En marche
- A l'arrêt (dû aux pannes, à la maintenance, à la réparation, etc.)

Le taux de disponibilité et d'indisponibilité d'une centrale est donné par les équations ci-dessous :

$$\text{Indisponibilité}(FOR) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}$$
$$\text{Disponibilité} = A = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$$

Équation 3

Dans les équations ci-dessus,  $\lambda$  et  $\mu$  représentent les taux de défaillance et de réparation, respectivement. Ces paramètres sont associés à la loi de probabilité de fonctionnement de la centrale.

Le tableau de défaillance du parc de production conventionnelle est déterminé à partir de l'information apportée par les taux de défaillance de chaque unité. Ce tableau est un tableau de probabilité qui apporte l'information sur la probabilité d'indisponibilité d'une certaine capacité de production dans le système.

L'exemple de la figure suivante illustre un système de 3 unités (2 unités de 5MW et 1 unité de 10MW). Avec des taux de disponibilité de 0.95 pour les unités de 5MW et 0.98 pour celle de 10MW.

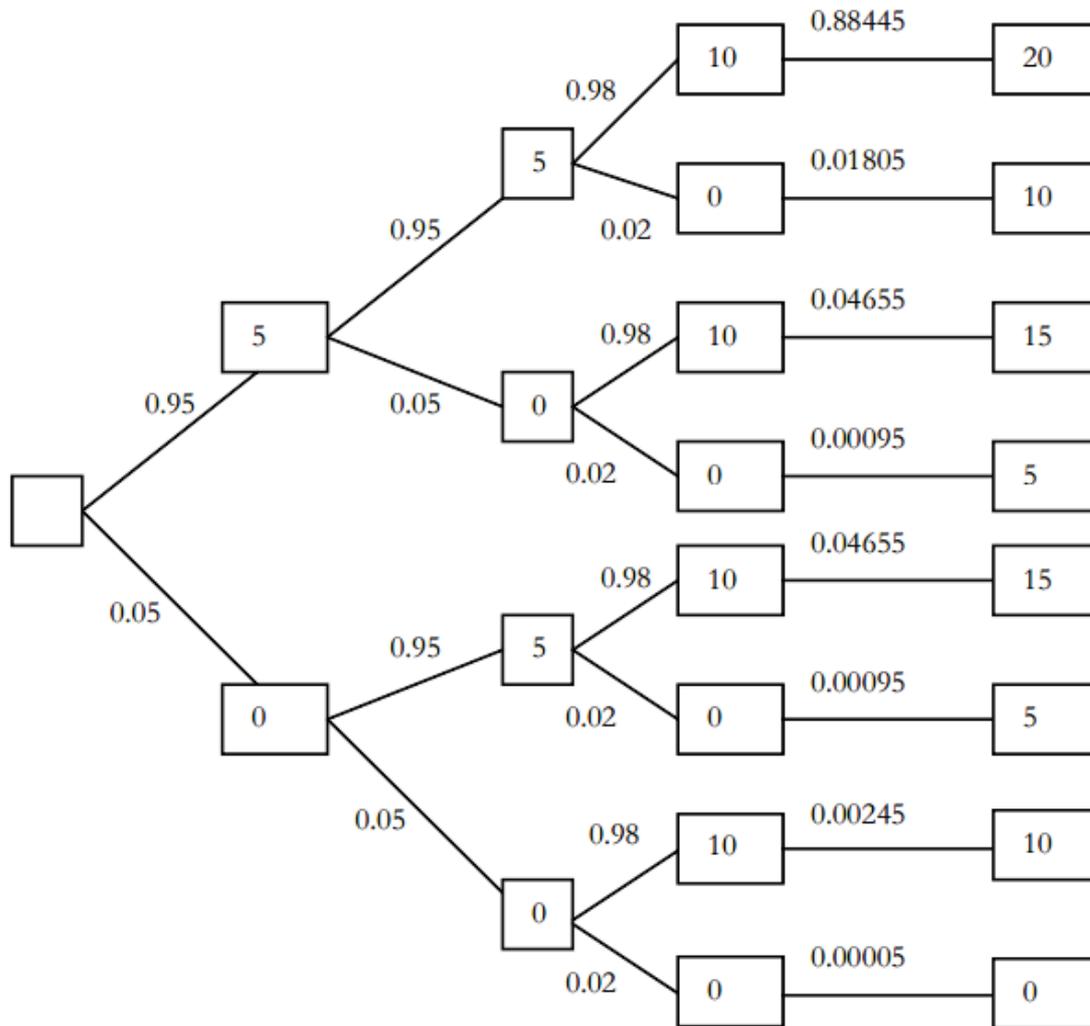


Figure 14 : Arbre de probabilité d'un système conventionnel simple

De cet arbre on voit que 5 niveaux d'énergies peuvent être disponibles dans le système ; le résumé dans un tableau donne :

Puissance(MW)	Probabilité d'occurrence	Probabilité cumulées
0	0.00005	0.00005
5	0.0019	0.00195
10	0.0205	0.02245
15	0.0931	0.11555
20	0.88445	1

Tableau 3 : Probabilités des différents états et probabilités cumulées

Nous remarquons tout de suite que pour un système possédant un grand nombre d'unités, la construction de l'arbre de probabilité sera très compliqué d'où la nécessité d'automatiser le calcul de probabilité par une formule récursive. Les travaux de *Billinton* et *Allan* dans

permettent de trouver la probabilité pour que la puissance fournie par un système soit

inférieure ou égale à  $X$  après l'addition d'une capacité  $C$  présentant un taux d'indisponibilité  $d$  :

$$P(X) = (1 - d) \times P'(X) + d \times P'(X - U)$$

Équation 4

Où :

- $C$  représente la capacité en MW d'une nouvelle unité ajoutée au système,
- $d$  est le taux de disponibilité de cette nouvelle unité,
- $P'(X)$ ,  $P(X)$  représentent les probabilités de produire une puissance inférieure à  $X$  avant et après l'ajout de l'unité de capacité  $C$ (MW).

## 2- MODÈLE DE CHARGE

Le modèle de charge s'acquiert avec la construction de la monotone de consommation pour une période donnée correspondant à une année (8760 h ou 365 jours).

Pour construire la monotone de consommation ou modèle cumulatif de charge, il faut disposer de l'information de consommation horaire ou journalière du système qu'il va falloir classer par ordre décroissant ensuite nous pourrons calculer le poids de chaque état de consommation. Cet arrangement nous permettra d'avoir la valeur.

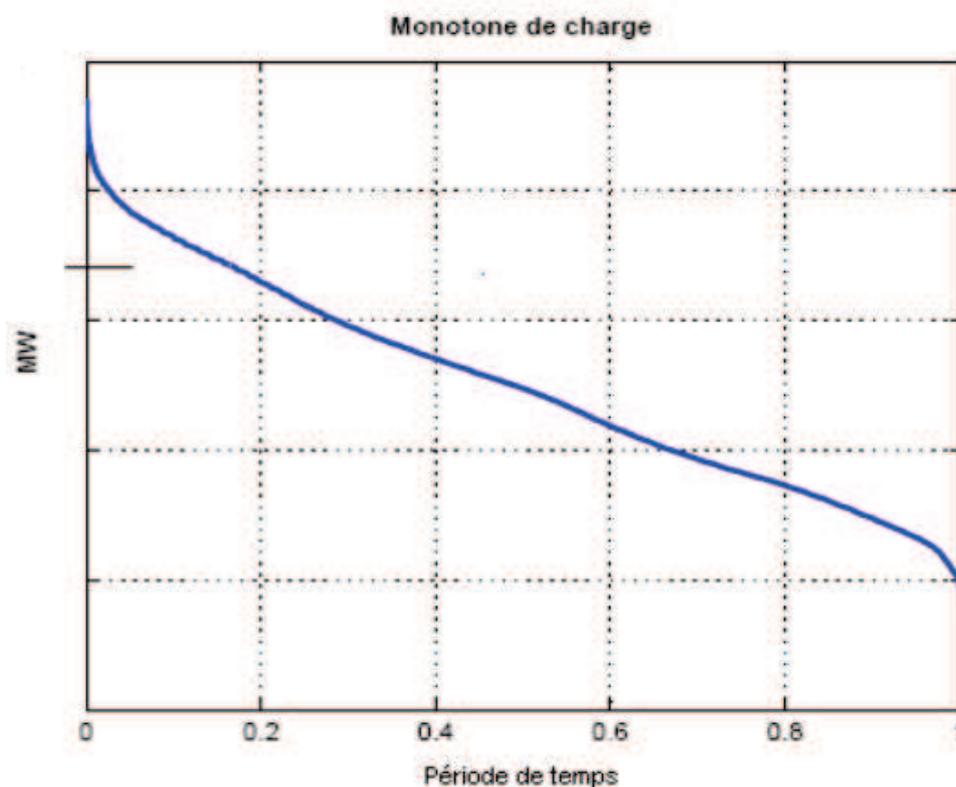


Figure 15 : Forme de la monotone de consommation pour des données de consommation

Le modèle de charge ainsi établi permet d'identifier les exigences de la demande ou de la charge du système, c'est-à-dire, qu'il est possible de déterminer chaque état de charge à respecter afin de maintenir les conditions de fournitures favorables.

### 3- MODÈLE DE RISQUE

Une fois les modèles de production et de charge établis, une convolution de ces deux modèles est nécessaire pour l'établissement du modèle de risque qui permet de quantifier le risque du système. Cette méthode permet de déterminer les indices de sûreté de fonctionnement, c'est-à-dire le risque de perte de charge « *Loss Of Load* » précédemment cité.

Nous travaillerons avec l'indice **LOLE** « *Loss Of Load Expectation* » qui est l'espérance mathématique du nombre d'heures de défaillance, c'est-à-dire, le nombre d'heures par an durant lesquelles la ressource de production disponible n'est pas suffisante pour couvrir l'ensemble de la demande

Cet indice peut être représenté de la façon suivante :

$$LOLE = \sum_{i=1}^n P_i(C_i - L_i)$$

Équation 5

Avec :

- $C_i$  = capacité disponible pour le jour/heure  $i$
- $L_i$  = Prévion de la consommation pour le jour/heure  $i$
- $P_i(C_i - L_i)$  = Probabilité de la perte de charge « *loss of load* » pour le jour  $i$ .

En référence aux travaux dans [1], sur la Figure 16, la courbe en bleue désigne le modèle de consommation du système. La défaillance d'une capacité donnée  $O_k$  contribuera au *LOLE* du système dans une proportion égale au produit de la probabilité de défaillance  $p_k$  de cet état de capacité et le nombre d'unités dans le temps  $t_k$  dont la défaillance d'une valeur  $O_k$  produira une perte de charge.

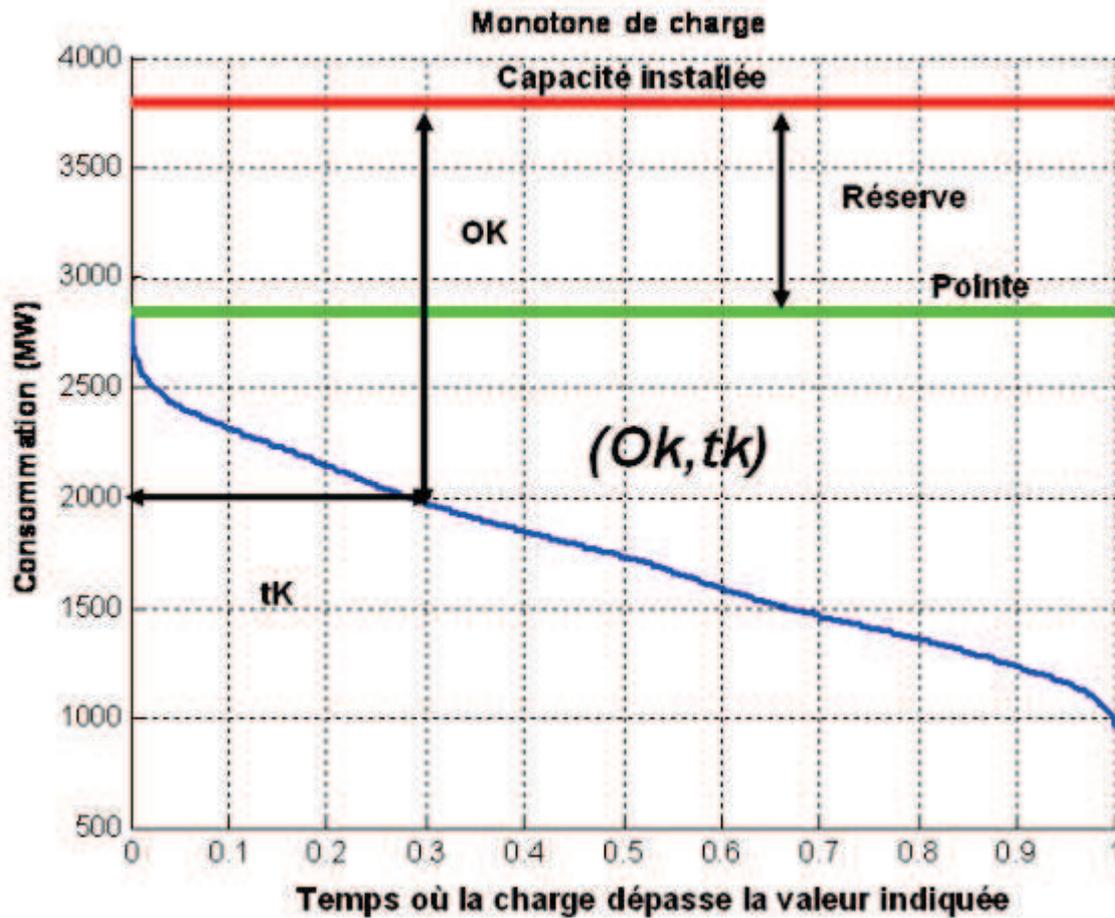


Figure 16 : Relation Charge-Capacité et Réserve

$O_k$  Valeur du  $k^{\text{ème}}$  état de panne dans le tableau de défaillance du système de production

$t_k$  Nombre d'unités de temps dans l'étude dont la défaillance d'une valeur  $O_k$  produira une perte de charge.

Cela est représenté sous forme mathématique par :

$$LOLE = \sum_{k=1}^n P_k \times t_k$$

Équation 6

Le LOLE est l'indice le plus utilisé pour la détermination des capacités de production requises dans l'horizon du moyen et long terme.

## II- FIABILITÉ DES SYSTÈMES DE PRODUCTION EN PRÉSENCE DE L'ÉOLIEN

L'apport de l'éolien dans la quantification de la sûreté de fonctionnement des systèmes est une étude des plus intéressantes à cause du fait de l'intégration de plus en plus élevé de l'éolien dans le mix de production des systèmes.

Le modèle conventionnel de la Figure 13 peut être modifié de façon à intégrer la production éolienne. La nouvelle représentation du modèle d'étude de sûreté est donc :

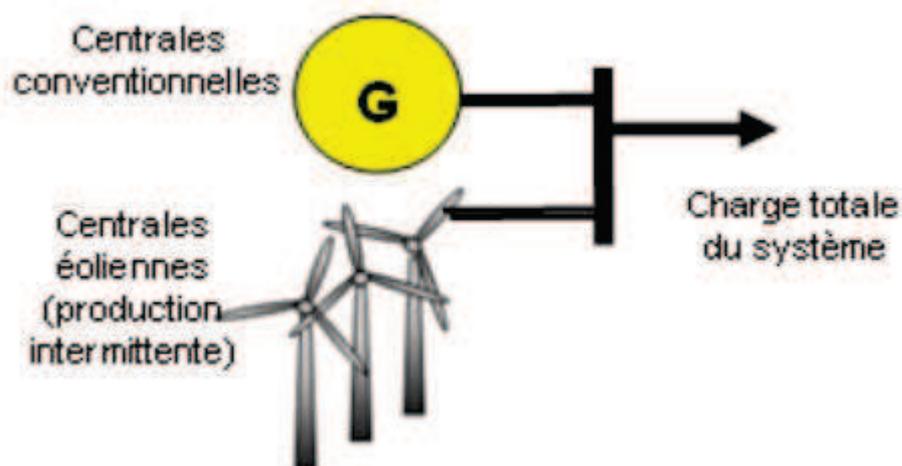


Figure 17 : Modèle système hybride (conventionnel + intermittente)

De même que la section précédente, nous allons devoir établir le tableau d'indisponibilité du parc de production, mais cette fois en intégrant la production intermittente. Il s'agira donc d'adopter la stratégie présentée à la Figure 18 ci-dessous.

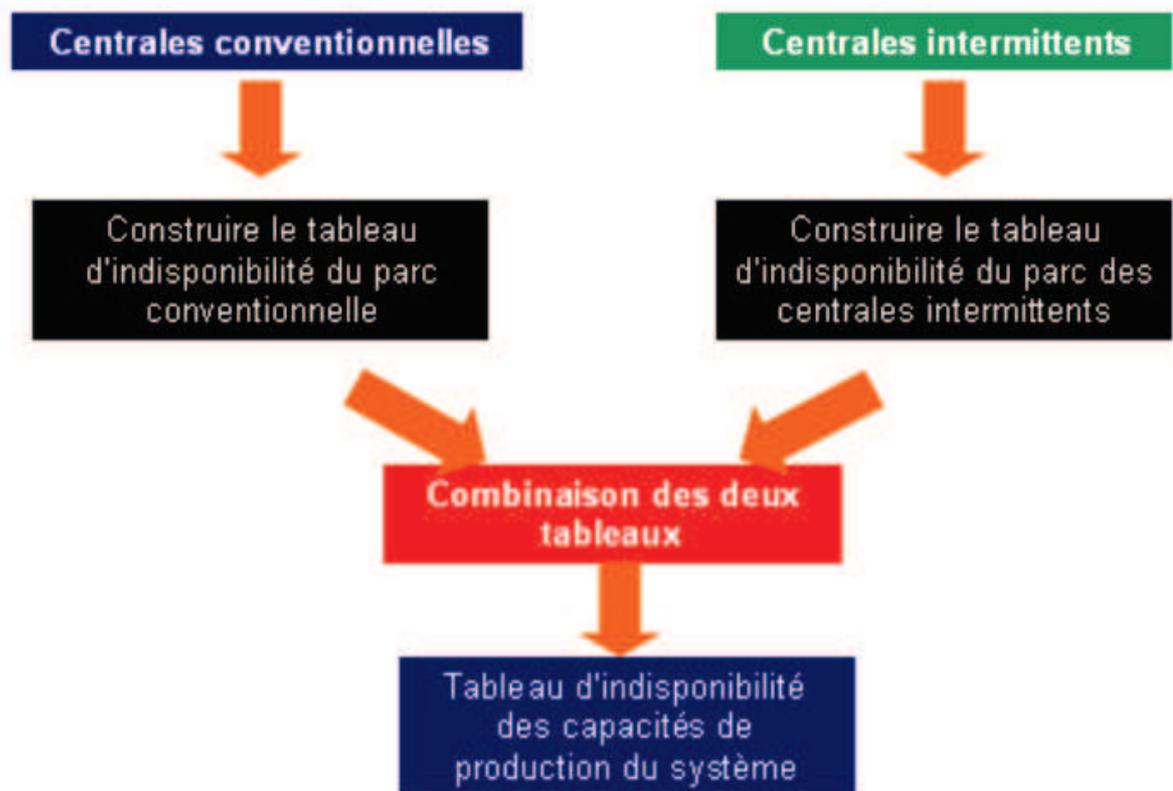


Figure 18 : Stratégie de construction du tableau d'indisponibilité en présence de la production intermittente (éolienne)

Comme présenté ci-dessous, nous allons devoir construire le tableau d'indisponibilité de la production intermittente (éolienne dans notre étude) et l'intégrer ensuite au tableau d'indisponibilité de la production conventionnelle. Une fois le modèle d'indisponibilité du parc de production (conventionnel + intermittent) tout entier réalisé, nous pourrons réaliser la convolution avec le modèle de charge afin de déterminer le modèle de risque de toute la production.

Le tableau d'indisponibilité de la production éolienne nécessite plusieurs étapes résumées sur la Figure 19 ci-après :

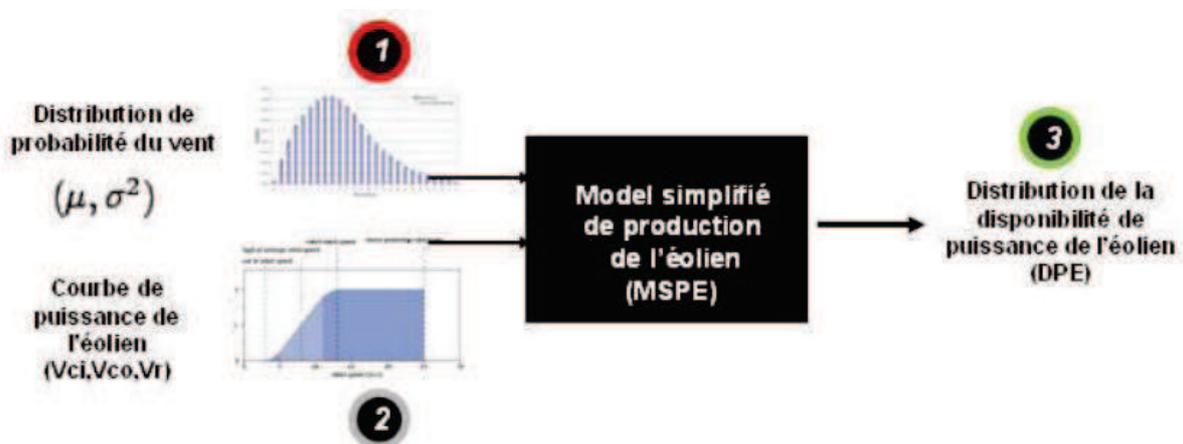


Figure 19 : Modèle pour la construction du tableau de disponibilité de la puissance éolienne

En premier nous avons la distribution de probabilité du vent, il est donc important de connaître la nature (vitesse, vitesse moyenne, écart-type, etc.) de la ressource vent et sa distribution de probabilité associée au site d'exploitation(1). Secundo, la connaissance de la courbe de puissance des éoliennes installées est nécessaire pour connaître les conditions de production des machines(2). La combinaison de ces deux paramètres permet d'établir un modèle simplifié de la production éolienne (MSPE), lequel représente la disponibilité de production de l'éolien (DPE) (3).

## 1- DISTRIBUTION DE PROBABILITÉ DU VENT

La vitesse du vent est un phénomène physique stochastique qui peut être modélisé approximativement par un processus à variable aléatoire discrète. Plusieurs lois de probabilité ont été testées pour caractériser la vitesse du vent (Weibull, Rayleigh,  $\chi^2$ , loi normale...). Il en ressort que la loi de distribution de Weibull et son cas particulier – loi de Rayleigh - représentent de façon adéquate la distribution de la vitesse du vent , ,

. Dans la majorité des études d'insertion de l'éolien rencontrées dans la littérature, la vitesse du vent est donc caractérisée par la distribution de Weibull dont la fonction de répartition est :

$$F(v) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{v}{c} \right)^k \right]$$

Équation 7

La fonction densité de probabilité est :

$$f(v) = \frac{dF(v)}{dv} = \left( \frac{k}{c} \right) \left( \frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left[ - \left( \frac{v}{c} \right)^k \right]$$

Équation 8

Avec :

- $k$  paramètre de forme qui caractérise la répartition du vent,
- $c$  paramètre d'échelle qui caractérise la vitesse du vent (plus  $c$  est élevé plus l'énergie se trouve dans les hautes vitesses),
- $v$  vitesse du vent « instantanée ».

La variable aléatoire « vitesse du vent » est souvent représentée par la distribution de Rayleigh (Weibull avec  $k = 2$ ) dont la fonction de répartition est la suivante :

$$F(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^2\right]$$

Équation 9

La fonction densité est :

$$f(v) = \frac{dF(v)}{dv} = \left(\frac{2v}{c^2}\right) \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^2\right]$$

Équation 10

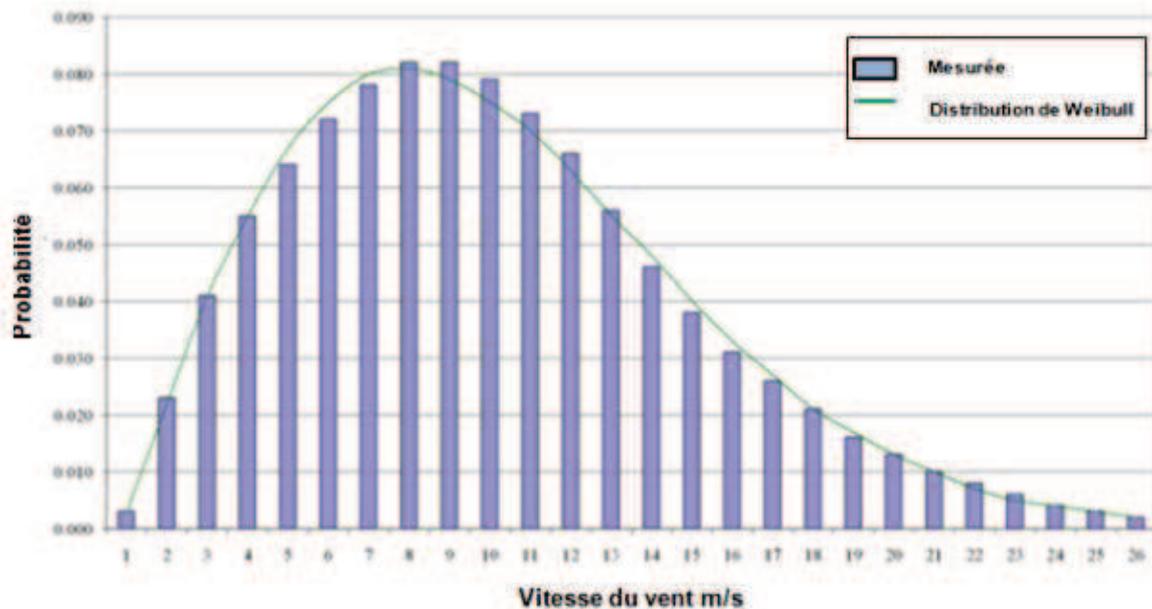


Figure 20 : Distribution de probabilité d'occurrence du vent

## 2- COURBE DE LA PUISSANCE PRODUITE PAR L'ÉOLIEN

La turbine éolienne transforme l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. La puissance récupérée varie en fonction de la vitesse du vent de la façon décrite dans l'Equation 11 :

$$P_T = \frac{1}{2} \rho S v^3 C_p$$

Équation 11

Où :

- $\rho$  est la densité volumique de l'air,
- $S$  est la surface balayée par les pales,

- $v$  est la vitesse du vent à hauteur de la nacelle,
- $C_p$  est le coefficient de puissance ou constante de Betz.

D'après les travaux de [référence], toutes les turbines sont caractérisées par une vitesse de démarrage  $V_D$ , une vitesse nominale  $V_N$  et une vitesse maximale  $V_M$ . Ces vitesses définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance récupérée en fonction de la vitesse du vent.

- La **zone 1** où l'éolienne ne fournit pas d'énergie car la vitesse du vent est inférieure à sa vitesse de démarrage.
- La **zone 2** où l'éolienne développe une puissance qui varie comme le cube de la vitesse du vent. Celle-ci étant comprise entre  $V_D$  et  $V_N$ .
- La **zone 3** où la turbine atteint sa puissance nominale  $P_N$ . Celle-ci reste constante pour les éoliennes équipées d'une régulation par angle de calage (« pitch regulation ») et décroît sensiblement pour les autres.
- La **zone 4** où l'éolienne ne fournit à nouveau plus d'énergie pour des raisons de sécurité car la vitesse du vent est supérieure à sa vitesse maximale.

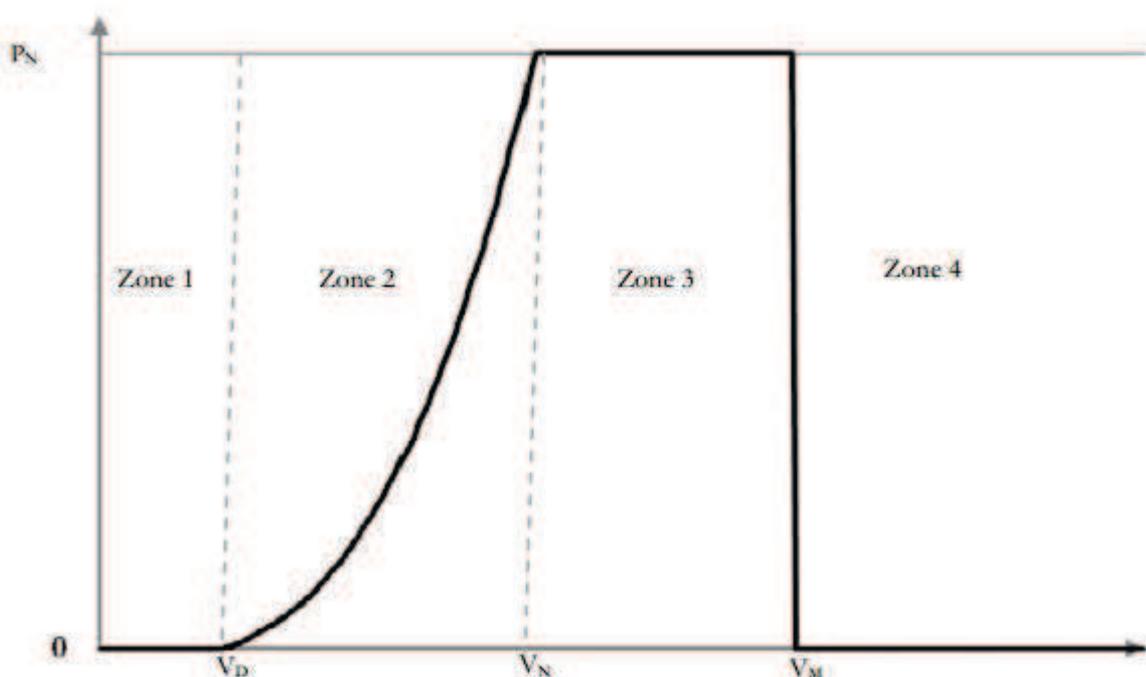


Figure 21 : Courbe de puissance d'éolienne à vitesse variable

Pour une vitesse donnée  $v$ , nous pouvons donc calculer la puissance de sortie. Celle-ci est calculée grâce à la relation suivante :

$$P_{s\acute{e}ol} = \begin{cases} = 0, & 0 \leq v < V_D \\ = a + bv^3, & V_D \leq v < V_N \\ = P_N, & V_N \leq v < V_M \\ = 0, & V_M \leq v \end{cases}$$

Équation 12

Les constantes  $a$  et  $b$  peuvent être déterminées à partir des équations suivantes :

$$a = \frac{P_N * V_D^3}{V_D^3 - V_N^3} \quad \text{et} \quad b = \frac{P_N}{V_N^3 - V_D^3}$$

Équation 13

En prenant l'exemple d'une éolienne de 2MW, ayant :

- $V_D = 3.5$  m/s
- $V_N = 15$  m/s
- $V_M = 25$  m/s

Sa courbe de puissance se présente comme suit :

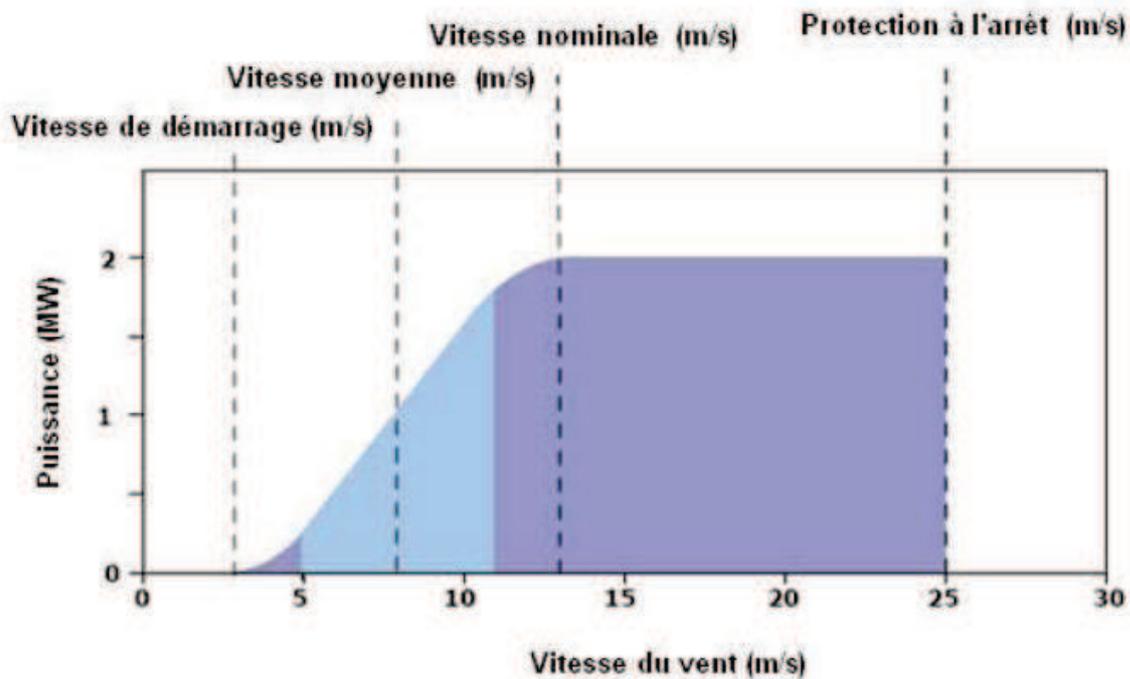


Figure 22 : Courbe de puissance d'une éolienne de 2 MW

### 3- MODÈLE SIMPLIFIÉ DE LA PRODUCTION ÉOLIENNE (MSPE)

A cette étape, les informations concernant la distribution de probabilité de la vitesse de vent (1) et la courbe de puissance (2) sont disponibles. La construction du tableau de probabilité des puissances de sorties résulte de la combinaison de (1) et (2). Nous pouvons donc construire le MSPE qui intègre le modèle de production pour l'analyse de sûreté. Dans ce MSPE, la centrale éolienne est modélisée comme une étant une unité de production multi-état.

En tenant compte des aspects précédemment cités, une étude de la fiabilité en présence de la production intermittente peut être effectuée. Cette méthodologie d'étude de sûreté permettra d'estimer l'impact de de l'éolien à long terme sur l'adéquation du parc de production pour satisfaire la demande. Cela sera achevé à partir de l'évaluation du  $CC_E$ .

## CONCLUSION

Dans ce chapitre, la méthode d'étude de la fiabilité d'un réseau électrique a été présentée. Du fait de la nature des unités de production, l'étude a été scindée en deux grandes parties, la première concernant un système composé uniquement que d'unités de production conventionnelles et la seconde prenant en compte la production renouvelable.

Dans la première partie de ce travail, la modélisation probabiliste de la composition d'un parc de production classique a été présentée. Cette modélisation commence par l'établissement du modèle probabiliste des centrales de production, unités à deux états (Marche-Arrêt), suivi du modèle de la charge (consommation), pour enfin établir le modèle de risque qui nous permettra de connaître le niveau de fiabilité du parc conventionnel.

Dans la perspective d'intégration des sources renouvelables dans le mix de production, la deuxième partie de ce chapitre a consisté, principalement, à l'établissement du modèle probabiliste de la source renouvelable (éolienne). La distribution de probabilité de la ressource vent, ainsi que les données concernant la courbe de puissance des éoliennes ont contribué à la synthèse du modèle simplifié, modèle à prendre en compte pour l'évaluation du niveau de fiabilité d'un système comprenant la production renouvelable.

A ce niveau de notre étude, tous les outils nécessaire au but initial de notre étude qui est la détermination du crédit de capacité du parc éolien de TAZA ont bien été analysés et maîtrisés. Passer à l'implémentation de l'algorithme présenté dans la section II-2 du chap. II, tel sera l'objet du chapitre suivant.

# CHAPITRE 4 : IMPACT DE L'ÉOLIEN SUR LA SÛRETÉ DU SYSTÈME ÉLECTRIQUE : LE CRÉDIT DE CAPACITÉ

## INTRODUCTION

Le crédit de capacité ( $CC_E$ ) mesure la possibilité (ou capacité) des centrales éoliennes à remplacer les capacités de production conventionnelles dans un système donné

. Cette définition peut être améliorée afin de la rendre complète, car elle n'intègre pas l'impact de la production éolienne sur la sûreté du système. C'est pourquoi reprend la définition proposée par en y ajoutant l'influence de l'intermittence de cette énergie sur la fiabilité du système. définit le crédit de capacité ( $CC_E$ ) comme étant le potentiel des centrales éoliennes à remplacer les centrales conventionnelles sans mettre en danger le système ou dégrader sa fiabilité.

Il est donc question ici de savoir si et dans quelles mesures les capacités éoliennes additionnelles peuvent remplacer les capacités conventionnelles et comment ce taux de substitution évolue avec la pénétration de l'éolien dans le système. Le calcul du crédit de capacité est donc particulièrement important dans le cadre d'un développement rapide et massif de la production éolienne.

Dans ce chapitre nous aurons comme objectif d'analyser l'impact de l'éolien dans la sûreté d'un système électrique en accord avec un scénario d'insertion de l'éolien élevé. Pour répondre à cet objectif, nous allons, dans un premier temps, modéliser un réseau test qui n'est autre que le réseau IEEE-RTS (Reliability Test System) avant de nous pencher sur le cas du Réseau National Marocain (RNMA) en étudiant sa fiabilité en présence du parc éolien de TAZA.

Nous allons aborder ce chapitre en présentant l'état d'art concernant les méthodes de calcul du crédit de capacité de l'éolien et les faits déjà constatés dans le scénario actuel du développement du parc éolien.

### I- ETAT DE L'ART DES MÉTHODES POUR L'ÉVALUATION DU CCE

Le  $CC_E$  correspond à la capacité des centrales conventionnelles qui peuvent être remplacées par la production éolienne, toujours en gardant le même degré de sûreté du système

Dès les années 70, un grand nombre d'études ont conclu que :

- ✓ L'éolien a un crédit de capacité non nul malgré l'existence dans certaines régions de périodes de l'année sans vent.
- ✓ Pour de faibles pénétrations de l'éolien, le  $CC_E$  est environ la moyenne de la production éolienne pendant l'année (« facteur de capacité »)

et peut atteindre une valeur proche de la production éolienne minimale pour de forts taux d'insertion de l'éolien.

Pour le calcul du  $CC_E$  deux types d'approches sont couramment utilisées :

- **Méthodes chronologiques** : les performances des centrales éoliennes peuvent être analysées par rapport au facteur de charge. Le facteur de charge d'une centrale électrique est le rapport entre l'énergie électrique produite durant une période donnée et l'énergie qu'elle aurait produite si l'installation avait fonctionné à sa puissance nominale pendant la même période. bien qu'ayant proposé une méthode chronologique d'évaluation du  $CC_E$  soutient que la manière la plus performante d'évaluer le crédit de capacité est au travers des méthodes probabilistes basées sur la monotone de charge, même si ces méthodes exigent des performances informatiques importantes et de modélisation complexe.
- **Méthodes probabilistes** : propose une méthode probabiliste comme celle que nous avons présentée à la section II du chap.2
  - par contre propose une expression mathématique simple du  $CC_E$ . Cette fonction est basée sur le taux de pénétration de l'éolien, le facteur de capacité (ou utilisation annuelle des turbines éoliennes), le taux de défaillance des centrales conventionnelles et le foisonnement des centrales éoliennes. Cette expression simple sera présentée dans l'Annexe A1.
  - L'expression proposée par a été adaptée pour couvrir la dispersion géographique des éoliennes dans le réseau électrique. Afin de tenir compte de divers niveaux de foisonnement des centrales intègre un coefficient de dispersion classifié en faible dispersion, moyenne dispersion et dispersion élevée. Pour un faible taux de pénétration de l'éolien, la valeur du  $CC_E$  est celle du facteur de capacité.

Maintenant que nous avons terminé avec l'étude de l'art, et que nous savons que deux méthodes sont utilisées pour l'évaluation du  $CC_E$  à savoir l'approche chronologique et l'approche probabiliste, les études ont montré que l'approche du facteur de charge (chronologique) peut être très utile pour le gestionnaire du réseau alors que l'approche considérant la sûreté de fonctionnement et donc les indices de fiabilité (probabilistes) est surtout intéressante pour la planification des réseaux. La première apporte des informations sur la capacité de la ressource éolienne à couvrir la demande de pointe, pendant que la seconde fait état du crédit de capacité espéré, obtenu par calculs statistiques.

## II- IEEE-RELIABILITY TEST SYSTEM

## 1- MODÈLE DE PRODUCTION

Le parc IEEE-RTS, avec une puissance installée de 3405 MW, est composé de 32 centrales de productions comprenant des unités thermiques, hydrauliques et nucléaires.

Les informations concernant les capacités installées, le nombre de centrales et le taux de défaillance de chaque type d'unité seront présentées en Annexe A2.

Le tableau de disponibilité de ce parc conventionnelle est construit au travers du programme Matlab «*mod\_prod\_conv.m* » qui donne les états de défaillances ainsi que les probabilités associées à ces états. A titre d'exemple, une indisponibilité de 400 MW a comme probabilité 0.2619. Les données du Tableau 4 peuvent être confirmées par les résultats obtenus par

Niveau	Capacité Hors Service (MW)	Probabilités cumulatives
1	0	1
31	100	0.5476
90	200	0.3813
153	265	0.3356
288	400	0.2619
444	556	0.0846
488	600	0.0621
838	950	0.0075
1088	1200	0.00079
1388	1500	0.000040

Tableau 4 : Tableau de défaillance synthétisé de la RTS

## 2- MODÈLE DE CHARGE

La demande de pointe du réseau IEEE-RTS est de 2850 MW, les informations concernant la consommation de ce réseau sont présentées en Annexe A2. Les données détaillées se trouvant dans permettent la construction du profil de consommation.

Ce profil de charge porte sur les 8736 heures de l'année (364 jours). La monotone de charge est construite selon la méthode expliquée à la section I- du chapitre 2. Nous obtenons donc :

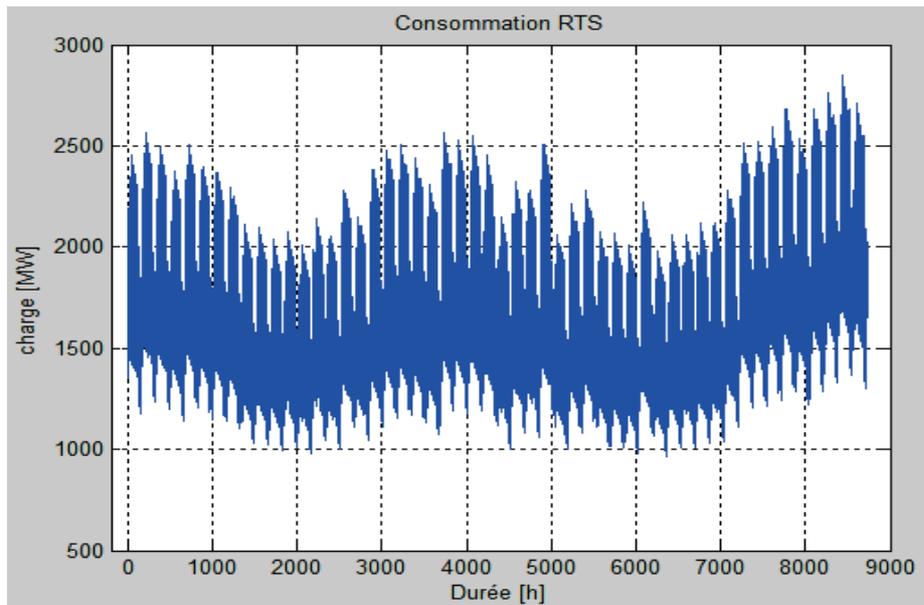


Figure 23 : Profil de consommation

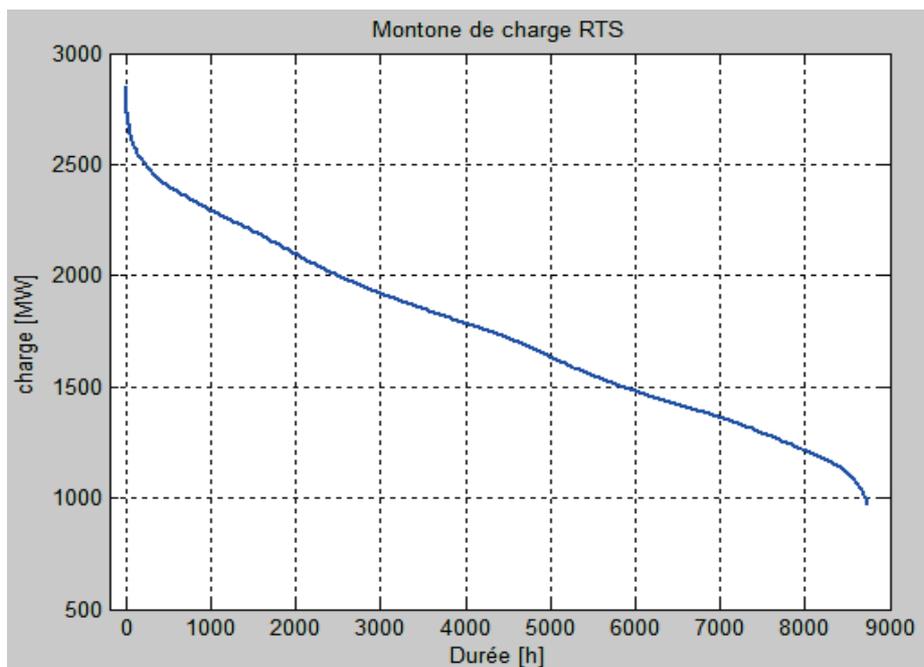


Figure 24 : Montone de consommation

### 3- MODÈLE DE RISQUE

Dans le but de valider le programme « `fiabilite.m` », permettant d'évaluer le niveau de risque du système, le calcul de l'indice de fiabilité LOLE, tel que présenté dans la section I-3 du Chap. II du réseau IEEE-RTS a été simulé.

Le tableau suivant fait mention des résultats obtenus après simulation du programme « *fiabilite.m* » et aussi des résultats théoriques publiés. L'écart entre les valeurs publiées et celles simulées est certainement dû à l'arrondissement des valeurs par l'outil Matlab.

<b>Système</b>	<b>LOLE (exact)</b>	<b>LOLE (simulée)</b>
IEEE-RTS	9.39418 (heure/an)	9.3942 (heure/an)

*Tableau 5 : Niveau de fiabilité de la RTS*

La concordance des résultats permet de valider l'efficacité du code implémenté.

#### 4- MODÈLE DE PRODUCTION ÉOLIENNE

Le modèle de la production éolienne est obtenu en combinant la ressource vent avec la courbe de puissance des éoliennes installées.

Dans notre étude nous choisissons de modéliser la distribution de vent par l'approche en loi normale. Elle est caractérisée par une moyenne  $\mu$  et un écart-type  $\sigma$  sur le site où sont installés les éoliennes ainsi que le nombre  $N_b$  d'échantillons de vent que l'on désire simuler. Pour cette distribution de probabilité, nous allons considérer des vitesses de vent variant de 0 à  $10\sigma$  afin de tenir compte des variables extrêmes de vent. La distribution est divisée en  $N_b$  intervalles avec chaque intervalle ayant une longueur de  $10\sigma/N_b$  :

$$\begin{aligned}
 V_b &= \mu + \left(10\sigma/N_b\right) * (i - 0.5 * N_b) \text{ Si } N_b \text{ pair} \\
 &= \mu + \left(10\sigma/N_b\right) * (i - 0.5 * (N_b + 1)) \text{ Si } N_b \text{ impair}
 \end{aligned}$$

*Équation 14*

<b>Paramètres</b>	<b>Valeurs</b>
$V_D$	14.4 Km/h
$V_N$	45 Km/h
$V_M$	90 Km/h
$P_N$	1.5 MW
$\mu$	19.53 Km/h
$\sigma$	10.06 Km/h
$N_b$	100

*Tableau 6 : Paramètres de production éolienne RTS*

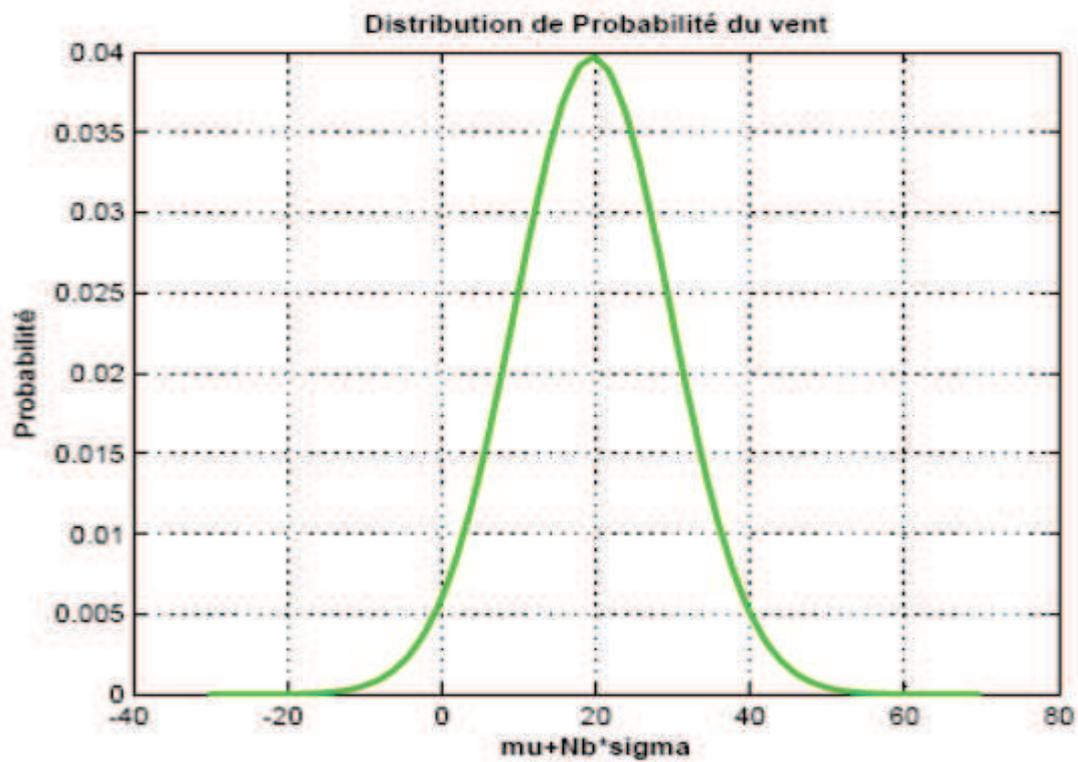


Figure 25 : Distribution de vent

En considérant une telle distribution de vent, il est possible de tracer la courbe de puissance en ayant les informations sur les vitesses de démarrage, nominale et maximale des éoliennes installées.

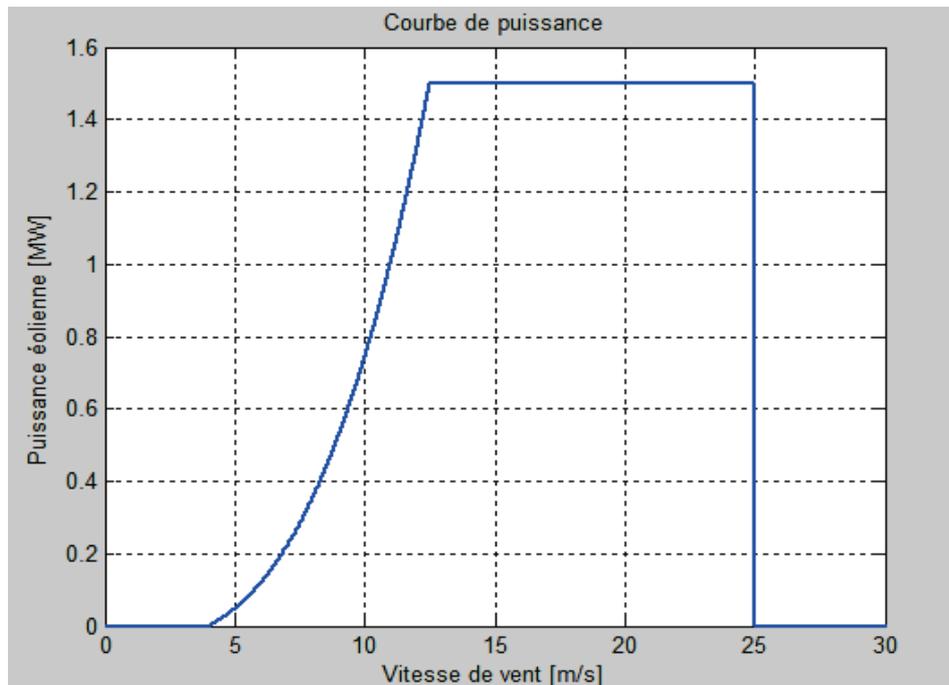


Figure 26 : Courbe de puissance de l'éolienne 1.5 MW

## 5- RÉSULTATS DE L'ANALYSE DU CRÉDIT DE CAPACITÉ DU RÉSEAU IEEE-RTS

Le réseau IEEE-RTS est un réseau possédant un parc de production de 3405 MW et une demande de pointe de 2850 MW. Nous allons analyser le crédit de capacité selon le critère de remplacement, en supprimant une certaine capacité de production conventionnelle (thermique) et en introduisant pas à pas les éoliennes afin de déterminer le crédit de capacité.

Dans un premier test, une unité de 12 MW de centrales thermiques (turbines à vapeur) est retirée du système RTS. Le taux de fiabilité se dégrade en passant de 9.4 heures/an à 10.35 heures/an soit une perte d'environ une heure de sûreté.

Les turbines éoliennes sont insérées dans le système progressivement, comme présenter dans l'algorithme du chap.2 II-2. L'insertion est arrêtée lorsque le taux de sûreté du système original est atteint. Dans notre cas, 74 turbines éoliennes devront être installées ; ce qui correspond à une capacité installée de 111 MW.

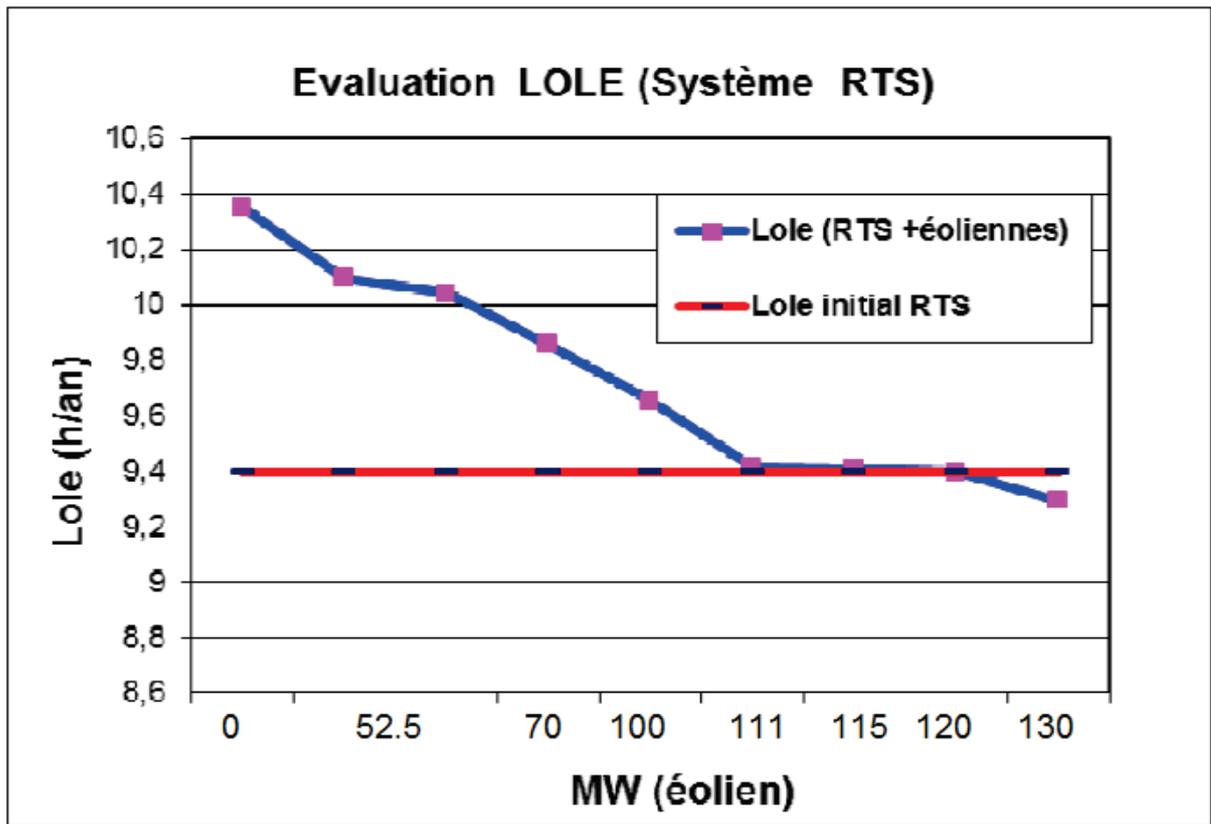


Figure 27 : Estimation du  $CC_E$  lors du remplacement de 12 MW thermique

Le crédit de capacité lorsqu'on retire l'unité 12 MW donc de :

$$CC_E = \frac{12}{111} \times 100 = 10.81\% \cong 11\%$$

En répétant la même procédure pour une unité de 24 MW nous pouvons présenter les résultats dans le tableau suivant :

	CAPACITÉ RETIRÉE (MW)	FOR	CAPACITÉ ÉOLIENNE INSTALLÉE(MW)	CAPACITÉ DE CRÉDIT (%)	TAUX D'INSERTION DE L'ÉOLIEN TIE %
RÉSULTATS RÉELS	12	0.02	107	11	3
	24	0.02	222	11	6
RÉSULTATS SIMULÉS	12	0.02	111	11	3
	24	0.02	205.5	12	6

*Tableau 7 : Tableau de comparaison des résultats exact avec celles simulés pour l'analyse du CC<sub>E</sub>*

La validité de la procédure ainsi que les résultats précédents peuvent être vérifiés dans les références

Le réseau sur lequel a porté notre étude, IEEE-RTS avec 3405 MW de capacité installée, semble insuffisant pour représenter un système réel. On peut donc s'interroger sur l'impact de l'insertion de l'éolien dans un réseau plus étendu. répond à cette inquiétude dans son étude doctorale en effectuant deux tests. Un premier portant sur un réseau dont la capacité est le double de la capacité du réseau IEEE-RTS et un deuxième dont le nombre d'unités est le double des unités du réseau IEEE-RTS. Les deux systèmes ainsi créés ont donc une capacité installée de 6810 MW. En ce qui concerne la demande, elle a aussi été doublée. Les résultats qu'elle a obtenus lui ont permis de conclure que la taille du système n'a pas une forte influence sur l'estimation du CC<sub>E</sub>. Évènement intéressant, elle a constaté que le CC<sub>E</sub> diminuait avec l'augmentation du TIE.

### III- ANALYSE DU CRÉDIT DE CAPACITÉ DU PARC ÉOLIEN DE TAZA

#### 1- MODÈLE DE PRODUCTION

Le parc de production national, avec une puissance installée de 10796 MW, est composé de centrales thermiques, hydrauliques, des interconnexions et aussi des productions locales de certains concessionnaires. Les détails du parc et les taux de défaillance de chaque unité seront présentés en Annexe A3.

Le tableau de disponibilité de ce parc conventionnel national est construit au travers du programme Matlab « mod\_prod\_conv.m » qui donne les états de défaillances ainsi que les probabilités associées à ces états. À titre d'exemple, une indisponibilité de 320 MW a comme probabilité 6.0814e-07.

ETAT	CAPACITÉ EN PANNE (MW)	PROBABILITÉS INDIVIDUELLES	PROBABILITÉS CUMULATIVES
1	0	0.0601	1
21	130	1.0430E-04	0.9137
150	320	6.0814E-07	0.8887
220	397	1.3904E-04	0.8725
1000	1179	1.8318E-04	0.5783
2500	2679	6.9005E-05	0.1181
5000	5179	9.4709E-06	8.1957E-04
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.

*Tableau 8 : Tableau de défaillance synthétisé du RNMA*

## 2- MODÈLE DE CHARGE

La consommation de pointe du réseau national est de 7491.6 MW. Les informations concernant la consommation nationale seront présentées en Annexe A3.

Ce profil de charge porte sur les 8758 heures de l'année (365 jours – 2 heures). La monotone de charge est construite selon la méthode expliquée à la section I- du chapitre 2. Nous obtenons donc :

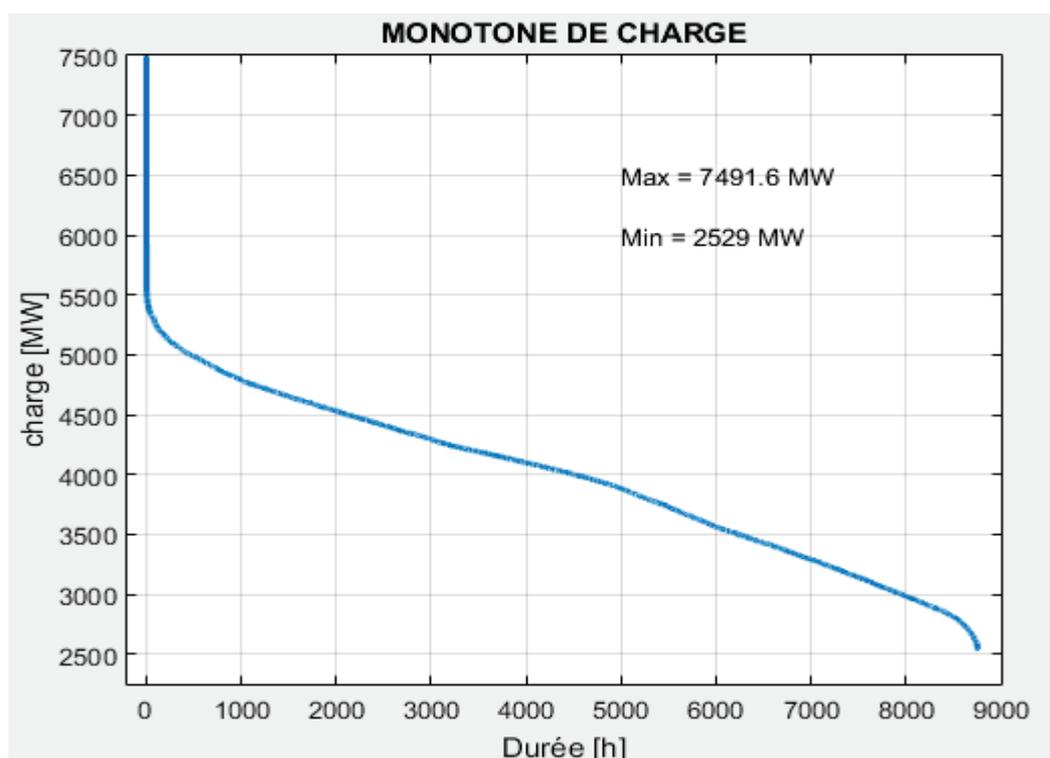


Figure 28 : Monotone de charge du RNMA

### 3- MODÈLE DE RISQUE

Le niveau de fiabilité du parc nationale est déterminé après exécution du programme « *fiabilite.m* ». Cela permet d'évaluer le niveau de risque du système, en calculant l'indice de fiabilité LOLE, tel que présenté dans la section I-3 du Chap. II.

Le tableau suivant fait mention du résultat obtenu après simulation du programme « *fiabilite.m* ».

Système	LOLE (simulée)
RNMA	0.0713 (heure/an)

Tableau 9 : Niveau de fiabilité du RNMA

### 4- MODÈLE DE PRODUCTION ÉOLIENNE

Afin d'établir le modèle de la production éolienne nous allons combiner les données de la ressource vent sur le site de TAZA avec la courbe de puissance des éoliennes qui y sont installées.



Figure 29 : Modèle des éoliennes du parc de TAZA

Dans notre étude, les données de la ressource vent sont la moyenne et l'écart-type. Le vent sur le site de TAZA a une moyenne  $\mu = 9 \text{ m/s}$  et un écart-type  $\sigma = 2.79 \text{ m/s}$ .

Paramètres	Valeurs
$V_D$	3 m/s
$V_N$	10 m/s
$V_M$	59.5 m/s
$P_N$	3 MW
$\mu$	9 m/s
$\sigma$	2.79 m/s
$N_b$	100

Figure 30 : Paramètres de production éolienne RNMA-TAZA

Avec les données résumées dans le tableau ci-dessus, nous pouvons tracer la courbe de puissance suivante qui correspond à celle des éoliennes du parc de TAZA.

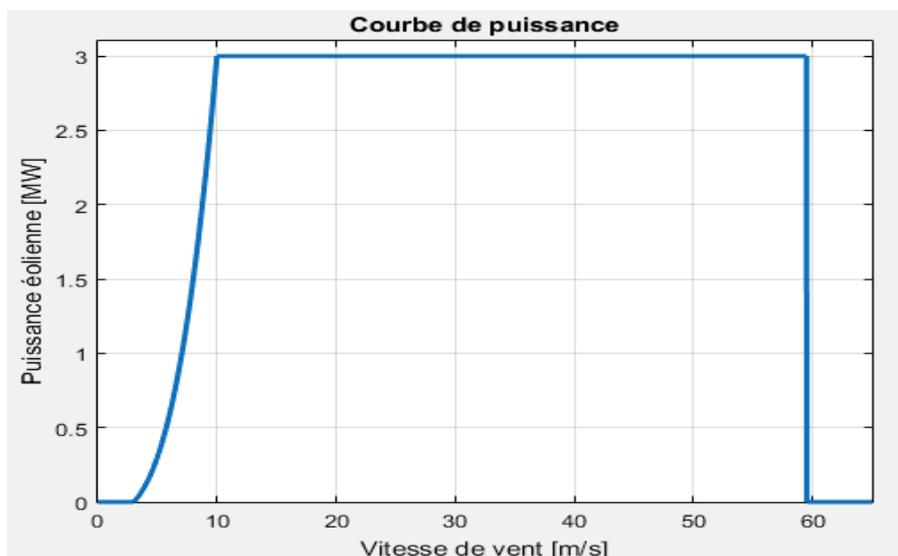


Figure 31 : Courbe de puissance des éoliennes de TAZA

La distribution de vent sur le site de TAZA est représentée comme suit :

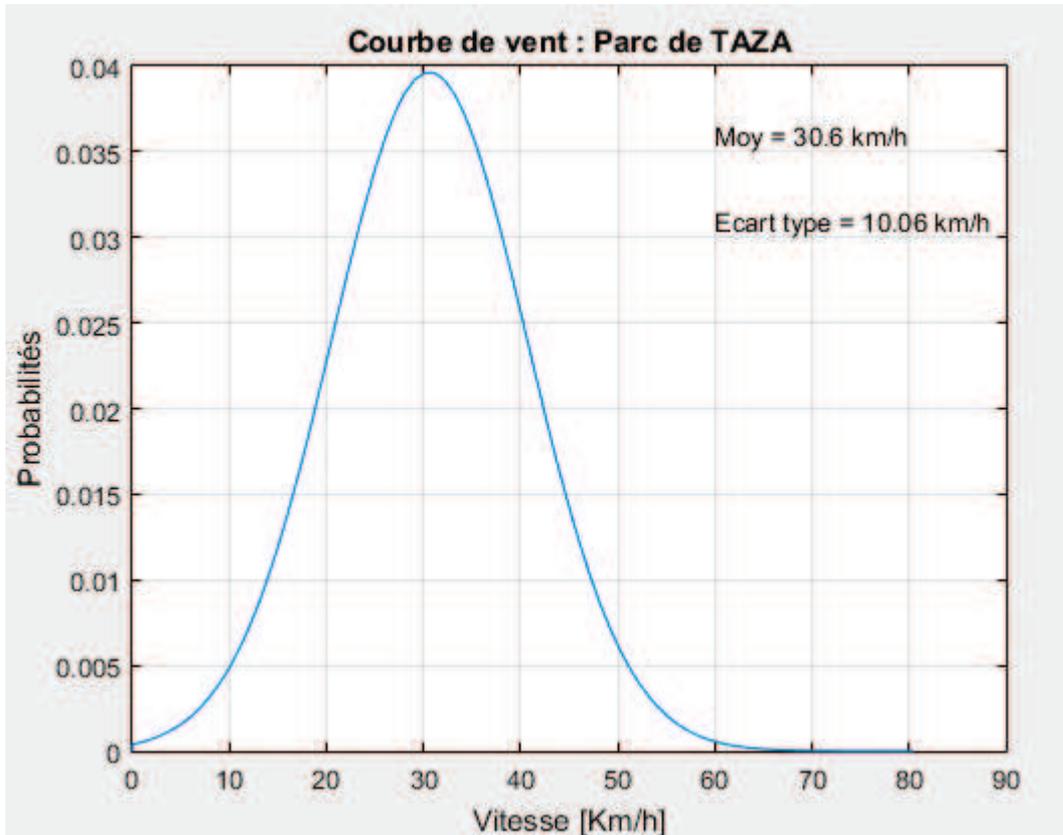


Figure 32 : Distribution de vent sur le site du parc de TAZA

## 5- ANALYSE DU CRÉDIT DE CAPACITÉ DE PARC DE TAZA DANS LE MIX DE PRODUCTION NATIONAL

Le Parc de TAZA se trouve dans l'Est du Maroc, dans la zone de **Touahar**, au niveau de 2 collines à environ 16 km de la ville de Taza. La zone du Projet se situe entre les chaînes montagneuses de l'Atlas (Bouttonnière de Tazekka) et la chaîne Prérifaine. Ce parc dispose d'un total de 50 éoliennes de 3 MW, ce qui correspond à une puissance installée de 150 MW.

Afin d'analyser le crédit de capacité du parc éolien, nous allons procéder de la même façon que présentée plus haut (Chap. 4 –II -5), en supprimant une certaine capacité d'énergie thermique et en remplaçant celle-ci par les éoliennes. Différents tests ont été réalisés, suivant la composition du parc conventionnel et les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

*CHAPITRE 4 : IMPACT DE L'ÉOLIEN SUR LA SÛRETÉ DU SYSTÈME ÉLECTRIQUE :  
LE CRÉDIT DE CAPACITÉ*

CAPACITÉ RETIRÉE (MW)	FOR	CAPACITÉ ÉOLIENNE INSTALLÉE(MW)	CAPACITÉ DE CRÉDIT (%)	TAUX D'INSERTION DE L'ÉOLIEN TIE %
30	0.04	126	23.8	1.2
33	0.02	129	25.6	1.2
39	0.02	162	23.2	1.5

*Tableau 10 : Analyse du crédit de capacité du parc de TAZA*

Pour ces différents tests, le parc éolien de TAZA avec sa puissance de 150 MW installée pourra être utilisé pour remplacer uniquement les unités de 30 MW et 33 MW, car les puissances éoliennes nécessaires à ces remplacements sont de 126 MW et 129 MW qui sont en dessous des 150 MW du parc. En ce qui concerne le remplacement d'unités de 39 MW ou plus, le parc de TAZA ne permettra pas de garder le niveau de fiabilité requis pour le réseau national, car le nombre d'heures de pannes dans le réseau se trouvera augmenter entraînant un déséquilibre dans le système.

Établissons un scénario dans lequel la production éolienne du parc de TAZA sera ajoutée aux autres sources de production du mix de production nationale. Dans ce cadre de figure, il ne s'agit plus d'un remplacement d'unité, mais plutôt d'une extension du parc national de production. L'analyse du niveau de fiabilité de ce système étendu donne :

Système	LOLE (simulée)
RNMA + Parc éolien de TAZA	0.0634 (heure/an)

*Tableau 11 : Fiabilité du parc hybride(conventionnel + éolienne)*

L'addition des 150 MW d'éolienne dans le mix de production nationale, bien qu'ayant amélioré le niveau de fiabilité du réseau reste néanmoins moins sûr du fait que les éoliennes sont très sensibles aux défauts dans le réseau et peuvent donc se déconnecter à tout moment. Cela impacterait négativement la sûreté de fonctionnement du réseau et pourrait placer le système dans une situation où la demande de pointe n'est pas couverte.

## CONCLUSION

Ce chapitre a été consacré entièrement à l'implémentation proprement dite de l'algorithme de détermination du crédit de capacité de l'éolien présenté à la section II-2 du chap.2.

Nous avons commencé avec un état de l'art sur les méthodes pour l'évaluation du crédit de capacité de l'éolien, suivi l'implémentation proprement dite de notre algorithme sous Matlab.

L'efficacité des différents codes, écrit sous Matlab, a été testée en effectuant des simulations sur le réseau IEEE-RTS en comparant les résultats obtenus par simulation avec celle se trouvant dans la littérature.

Nous nous sommes finalement penchés sur le cas du parc national de production d'électricité et avons effectué des simulations et obtenu des résultats assez intéressants.

# CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce travail de projet de fin d'études décrit une méthodologie probabiliste sur la problématique de l'insertion de l'éolien à long terme qui est l'analyse du crédit de capacité.

## 1- CONCLUSION

Les questions environnementales devenues trop importantes ont conduit à l'accélération de l'arrivée des énergies renouvelables dans les systèmes électriques. Par rapport aux sources de productions conventionnelles, les énergies renouvelables diffèrent par leurs tailles relativement petites, la variabilité de leurs énergies primaires et les technologies utilisées.

Tous ces avantages, des énergies renouvelables parmi lesquels l'éolienne, impose aux producteurs d'énergies l'incorporer dans le mix de production. Par contre le caractère aléatoire et surtout incertain de la production éolienne aurait un impact sur la sûreté de fonctionnement du système. Le potentiel de bénéfice de l'éolien étant mesuré en fonction de sa capacité à remplacer le parc de production thermique, l'analyse du crédit de capacité de l'éolien est donc très importante pour mesurer l'impact à long terme de l'éolien sur le réseau électrique.

L'analyse du crédit de capacité de l'éolien du parc éolien de TAZA, objet de ce projet de fin d'études, a donc été détaillée comme suit :

Premièrement une étude de l'art centré autour de l'énergie éolienne, la situation dans le monde et particulièrement au Maroc, son principe ainsi que ces avantages et inconvénients ont été présentés. La notion de crédit de capacité de l'éolien, sa détermination ainsi qu'un algorithme qui automatise son calcul ont été cités.

Dans la deuxième partie, la notion principale, nécessaire à l'analyse du crédit de capacité de l'éolien a été étudiée de long en large afin de pouvoir nous simplifier la tâche lors de l'implémentation de notre algorithme. Cette notion, fiabilité d'un réseau électrique, a bien été analysée surtout en présence de la production intermittente.

Toute la théorie autour de notre sujet d'étude bouclée, la dernière partie a consisté en l'implémentation proprement dite de notre algorithme et des validations ont été faites en considérant les résultats obtenus par simulation de notre code par rapport aux résultats dans la littérature. Les résultats de simulation étant en accord avec la littérature, nous nous sommes donc penchés sur le cas du parc national pour des tests.

## 2- PERSPECTIVES

Les énergies renouvelables, sources d'énergie dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle humaine, ont été vues comme solution aux problèmes majeurs posés par les centrales conventionnelles. L'éolienne, quant à elle, présentée comme meilleure parmi les énergies de types renouvelables, du fait de son émission quasi négligeable de gaz à effet de serre, est en pleine expansion dans le monde. Les espoirs fondés sur cette source de production renouvelable laissent présager une insertion encore plus forte de l'éolienne dans le mix de production d'énergie électrique. A cette allure, n'arriverions-nous pas à un stade où l'éolienne sera la seule source de production d'énergie électrique ? Qu'en sera-t-il de la fiabilité d'un tel réseau ? Un système de production, homogène, renouvelable sera-t-il capable d'assurer l'équilibre offre-demande à tout instant ? Telles sont les questions sur lesquelles il serait intéressant de se pencher à l'avenir.

# RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Allan, R. N., & Billinton, R. (February 2000). **Probabilistic Assessment of Power Systems**. *Proceedings of the IEEE*, 88(2).

BAÏLE, R. (2010). *Analyse et modélisation multifractales de vitesses de vent. Application à la prévision de la ressource éolienne*. Thèse doctorale Université de CORSE.

BAYEM, H. (2009). *Apport des méthodes probabilistes aux études d'insertion des énergies renouvelables dans les systèmes électriques*. Thèse doctorale Université PARIS-SUD 11.

Billinton, R., & Allan, R. (1996). *Reliability Evaluation of Power Systems. Second Edition*. Plenum Press.

Billinton, R., Kumar, S., Chu, K., Debnath, K., Goel, L., Khan, E., . . . Oteng-Adjei, J. (August 1989). **A Reliability Test for Educational Purposes- Basic Data**. *IEEE Transactions on Power Systems*.

BOSSANYI, E. A., & ALLAN. (1979). **Wind Characteristics and the Output of Wind Turbines**. *First British Wind Energy Association Workshop*.

CARLIN, J., & HASLETT, J. (1982). **The Probability Distribution of Wind Power From a Dispersed Array Of Wind Turbine Generators**. *Journal of Applied Meteorology*, 21.

CASTRO, S. F., & ALLAN, R. N. (1996). **Generation availability assessment of wind farms**. *IEEE proceedings, Generation Transmission Distribution* , 143,5.

Chen, S. (1998). **Evaluation of Grid Connected Wind Power Plants**. Electric Power Research Institute, Qinghe Beijing, 100085 China. *IEEE*.

Giebel, G. (2005). **Wind Power has a Capacity Credit : A catalog of 50+ supporting studies**. . Riso National Laboratory.

Karki, R., Hu, P., & Billinton, R. (JUNE 2006). **A Simplified Wind Power Generation Model for Reliability Evaluation**. *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY COVENTION* , 21(2).

Karki, R., & Hu, P. (2007). **Impact of Wind Power Growth on Capacity Credit**. *IEEE*.

Karki, R. (2004). **Wind Power in Power Generation Planning**. *IEEE*.

RUIZ GOMEZ, L. M. (2012). **Introduction de la production éolienne aux réseaux électriques : Approches techniques et économiques**. Thèse doctorale Université de Grenoble.

# ANNEXES

## A1- ANALYSE DE L'ÉQUATION DU $CC_E$ EN

[VOO-06] se base dans la littérature existante pour élaborer une expression mathématique pour le  $CC_E$ . Cette fonction est basée dans le taux de pénétration de l'éolien, le facteur de capacité (ou l'utilisation annuelle des turbines éoliennes), le taux de défaillance des centrales conventionnelles et le foisonnement des centrales éoliennes. Ceci représente une première expression pour le  $CC_E$  qu'est ensuite adaptée pour couvrir la dispersion des éoliennes dans le réseau électriques. Il intègre donc un coefficient de dispersion (faible dispersion, dispersion moyenne, dispersion élevée) afin de tenir compte des divers niveau de foisonnement des centrales éoliennes.

$$CC = 1 - \frac{P_{avec} - P_{sans}}{P_{éolien}}$$

$CC$  = Crédit de capacité

$P_{éolien}$  = Capacité éolienne additionnelle considérée

$P_{avec}$  = Capacité totale du système avec éolien

$P_{sans}$  = Capacité totale du système sans éolien

Normalement,  $P_{avec} > P_{sans}$  à cause de la faible "reliability" de l'éolien par rapport à une centrale conventionnelle, dont signifie que des investissements dans des sources back-up seront nécessaires à programmer afin de maintenir le même LOLE. [VOO-06] propose donc une première expression pour le  $CC_E$  qu'est ensuite adapté pour couvrir la dispersion des éoliennes dans le réseau électriques. il intègre donc un coefficient de dispersion (faible dispersion, dispersion moyenne, dispersion élevée) afin de tenir compte des divers niveau de dispersion.

Les données analysées sont ceux de Pays bas présentés par [WIJ-90] dans sa thèse doctorale, et montrent que le  $CC_E$  est influencé par la distribution spatiale des turbines éoliennes au long du réseau.

La formule est présentée à continuation :

$$CC = \frac{U}{V + \delta} \frac{FC_{éolien}}{R_{système}} (1 + W \delta e^{-Y(V+\delta)(x-1)}) \text{ Pour } x > 1\%$$

$$CC = \frac{U}{V + \delta} \frac{FC_{éolien}}{R_{système}} (1 + W) \text{ Pour } x < 1\%$$

$x$  = Taux de pénétration de l'éolien en % de la demande de pointe (« peak load »)

$FC_{\text{éolien}}$  = Facteur de capacité du système

$R_{\text{système}}$  = "Reliability" des centrales conventionnelles (on l'assumer comme 85% pour les centrales conventionnelles)

$\delta$  = Coefficient de dispersion,  $\delta = 0$  dispersion parfaite (pour une sortie constante combinée)

$\delta = 1$  pour aucune dispersion, c'est-à-dire que la sortie des turbines est parfaitement corrélée.

$U, V, W, Y$  = des coefficients choisis pour obtenir une corrélation parfaite.

Déjà cette expression se centre au calcul des bons coefficients et le choix correct du niveau de dispersion des turbines. D'un part, cette méthode est liée aux concepts n'a pas encore définis dans la littérature tel que la dispersion des turbines dans un réseau électrique. Une première question qu'en résulte : comment est-telle déterminé la dispersion des turbines dans une région géographique donné ? Et comme cette équation peut être appliquée dans une autre région ou système électrique. Surtout lorsque [VOO-06] se base dans de coefficients de dispersions de divers travaux.

Plusieurs choses sont aussi à retenir ici.

[WIJ-90] observe que le CC dépend du FC des turbines et l'on voit dans l'expression qu'il est internalisé dans l'équation du CC. Pour des niveaux de pénétration en dessous de 1%, le CC est constant est proportionnel au FC, pour des taux de pénétration en dessus de 1%, le CC décroît exponentiellement avec le taux de pénétration

La discontinuité du calcul montre que le CC présent une limite supérieur, en général le crédit de capacité sera limité par le FC.

## A2- IEEE-RTS

## Données pour le modèle de charge

- Données de la demande de pointe hebdomadaire en pourcentage de la demande de pointe

Semaine	% Pointe	Semaine	% Pointe
1	86.2	27	75.5
2	90.0	28	81.6
3	87.8	29	80.1
4	83.4	30	88.0
5	88.0	31	72.2
6	84.1	32	77.6
7	83.2	33	80.0
8	80.6	34	72.9
9	74.0	35	72.6
10	73.7	36	70.5
11	71.5	37	78.0
12	72.7	38	69.5
13	70.4	39	72.4
14	75.0	40	72.4
15	72.1	41	74.3
16	80.0	42	74.4
17	75.4	43	80.0
18	83.7	44	88.1
19	87.0	45	88.5
20	88.0	46	90.9
21	85.6	47	94.0
22	81.1	48	89.0
23	90.0	49	94.2
24	88.7	50	97.0
25	89.6	51	100.0
26	86.1	52	95.2

- Données de la consommation journalière en pourcentage de la pointe hebdomadaire

Day	MW
Lundi	93
Mardi	100
Mercredi	98
Jeudi	96
Vendredi	94
Samedi	77
Dimanche	75

- Données de consommation horaire en pourcentage de la pointe journalière

Pointe horaire en pourcentage de la pointe journalière

Heure		Hiver		Printemps & Automne		Ete		Printemps & Automne		Hiver	
		1-8		9-17		18-30		31-43		44-52	
Dés	à	JWk	Wkend	JWk	Wkend	JWk	Wkend	JWk	Wkend	JWk	Wkend
12	1	67	78	63	75	64	74	63	75	67	78
1	2	63	72	62	73	60	70	62	73	63	72
2	3	60	68	60	69	58	66	60	69	60	68
3	4	59	66	58	66	56	65	58	66	59	66
4	5	59	64	59	65	56	64	59	65	59	64
5	6	60	65	63	65	58	62	65	65	60	65
6	7	74	66	72	68	64	62	72	68	74	66
7	8	86	70	85	74	76	66	85	74	86	70
8	9	95	80	95	83	87	81	95	83	95	80
9	10	96	88	99	89	95	86	99	89	96	88
10	11	96	90	100	92	99	91	100	92	96	90
11	12	95	91	99	94	100	93	99	94	95	91
12	1	95	90	93	91	99	93	93	91	95	90
1	2	95	88	92	90	100	92	92	90	95	88
2	3	93	87	90	90	100	91	90	90	93	87
3	4	94	87	88	86	97	91	88	86	94	87
4	5	99	91	90	85	96	92	90	85	99	91
5	6	100	100	92	88	96	94	92	88	100	100
6	7	100	99	96	92	93	95	96	92	100	99
7	8	96	97	98	100	92	95	98	100	96	97
8	9	91	94	96	97	92	100	96	97	91	94
9	10	83	92	90	95	93	93	90	95	83	92
10	11	73	87	80	90	87	88	80	90	73	87
11	12	63	81	70	85	72	80	70	85	63	81

Jwk= jour de la semaine

### Données pour le modèle de production

Mix de production pour le modèle RTS

Unit Size of MW	Type	Number of Units	Forced Outage Rate	MTTF(1) hrs.	MTTR(2) hrs.	Scheduled Maintenance wks/year
12	Oil/Steam	5	0,02	2940	60	2
20	Oil/CT	4	0,1	450	50	2
50	Hydro	6	0,01	1980	20	2
76	Coal/Steam	4	0,02	1960	40	3
100	Oil/Steam	3	0,04	1200	50	3
155	Coal/Steam	4	0,04	960	40	4
197	Oil/Steam	3	0,05	950	50	4
350	Coal/Steam	1	0,08	1150	100	5
400	Nuclear	2	0,12	1100	150	6

## A3- RNMA : RÉSEAU NATIONAL MAROCAIN

## Données pour le modèle de production

*Mix de production RNMA*

Unit size of MW	Type	Forced Outage Rate	Unit size of MW	Type	Forced Outage Rate
244	Thermal(CTJ)	0,1	111	Thermal(TAG Tetouan)	0,02
326	Thermal(CTK)	0,1	33	Thermal(TAG Agadir)	0,02
361	Fioul (CTM-Fioul)	0,05	39	Thermal(TAG Laâyou)	0,02
348	Coal (CTM-Charbon)	0,04	42	Thermal(TAG Laâyou)	0,02
30	Gaz(CTM_TG)	0,04	75	Thermal(TANTAN)	0,1
100	Gaz(CTM_TG)	0,04	834	Nuclear(ABM)	0,12
153	Thermal(TAG_TIT)	0,02	1048	Hydro(TOT_Hydr)	0,01
443	Hydro(STEP_T)	0,01	682	JLEC_TR5	0,2
95	Nuclear(Tiers)	0,12	688	JLEC_TR6	0,2
663	JLEC_TR1	0,2	504	EET	0,2
668	JLEC_TR2	0,2	143	Nuclear(IMA)	0,12
704	JLEC_TR3	0,2	1408	Nuclear(IME)	0,12
			1054	Jlec_TR4	0,2