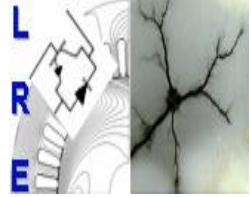




المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات  
Ecole Nationale Polytechnique

Ecole Nationale Polytechnique  
Département d'Electrotechnique  
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique



Mémoire de  
**Master en Electrotechnique**

Présenté par  
**CHAFI Ammar**

Intitulé

**Impacts d'un parc éolien sur le  
réseau électrique en régime  
statique**

Soutenu le 17 juin 2015 à l'ENP

**Membres du Jury d'examen**

Président	A. Boubakeur	Professeur à l'ENP
Rapporteur	A. Hellal	Professeur à l'ENP
Examineurs	MO. Mahmoudi	Professeur à l'ENP
	A. Mekhaldi	Professeur à l'ENP

**ENP 2015**

# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail*

*À ma très chère mère*

*À mes très chères frères et sœurs*

*À ma grande famille*

*À tous mes amis*

*À tous ceux qui m'aiment et que j'aime*

*Ammar CHAFI*

# Remerciement

*Nos remerciements vont tout d'abord, à Dieu le tout puissant qui nous a donné la foi, le courage, la patience et la volonté nécessaires, pour affronter toutes les difficultés et les obstacles, qui se sont hissés au travers de notre chemin, durant toutes nos années d'études et tout au long de ce modeste travail.*

*Nous adressons notre profonde reconnaissance et nos vives gratitudee à notre enseignant et encadreur Monsieur A. Hellal, Professeur à l'ENP, pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de nous encadrer, pour ses encouragements réguliers, ses qualités scientifiques et humaines qui ont toujours été une source de motivation, ainsi que pour ses conseils et orientations.*

*Nous tenons à remercier également Monsieur A. Boubakeur pour nous avoir fait l'honneur de présider notre jury de thèse, ainsi que Monsieur A. Mekhaldi et Monsieur MO. Mahmoudi en tant qu'examineurs.*

*Nos remerciements les plus sincères sont adressés à nos enseignants, qui ont contribué à notre formation durant nos études à l'École Nationale Polytechnique et spécialement les enseignants du département d'Électrotechnique.*

*Nous tenons enfin à remercier vivement toutes personne ayant contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.*

**ملخص :** يقدم هذا العمل دراسة حول تأثير مزرعة هوائية على الشبكات الكهربائية في المرحلة السكنية. لهذا قمنا بدراسة تأثير مجموعة من المولدات الهوائية مدجة في شبكة كهربائية على الاستقرار السكوني للنظام. وكتطبيق، اخترنا محاكاة الشبكة ٣ مولدات و ٩ عقد بالاستعانة بالبرمجية بيسات التي هي أداة مخصصة للتحليل السكوني والديناميكي والتحكم في شبكات الطاقة، والتي تعمل تحت بيئة ماتلاب.

**الكلمات الرئيسية :** مزرعة هوائية، الاستقرار السكوني.

**Résumé :** Ce travail présente une étude sur les impacts d'un parc éolien sur le réseau électrique en régime statique. Pour cela, nous avons étudié l'influence de l'intégration d'un parc éolien dans un réseau électrique sur la stabilité statique du système. Et comme application, nous avons choisi le réseau test standard IEEE 3 machines 9 nœuds simulé à l'aide du logiciel PSAT, qui est un outil dédié pour l'analyse statique et dynamique et le contrôle des réseaux électriques, et qui s'exécute sous environnement Matlab.

**Mots clés :** Parc éolien, régime statique.

**Abstract :** This work presents a study about the impacts of wind farm on the static state of power systems. For this, we studied the influence of the integration of a wind farm in a grid on the static stability of the system. And as application, we chose the standard test network IEEE 9 nodes 3 machines simulated using the software PSAT, which is a dedicated tool for static and dynamic analysis and control of power systems, and that runs under Matlab environment.

**Keywords :** Wind farm, steady state.

# *Nomenclature*

$P_{gen}$	Puissance active générée
$Q_{gen}$	Puissance réactive générée
$P_{load}$	Puissance active consommée
$Q_{load}$	Puissance réactive consommée
$X_d$	Réactance du générateur — axe d
$X'_d$	Réactance transitoire — axe d
$X_q$	Réactance du générateur — axe q
$X'_q$	Réactance transitoire — axe q
$T'_{d0}$	Constante de temps — axe d
$T'_{q0}$	Constante de temps — axe q
$K_a$	Gain de l'amplificateur
$T_a$	Constante de temps de l'amplificateur
$K_f$	Gain du stabilisateur
$T_f$	Constante de temps du stabilisateur
$K_e$	Gain de l'excitatrice
$T_e$	Constante de temps de l'excitatrice
$g$	Glissement

# Table des matières

Table des matières	v
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	viii
<b>1 Intégration des Énergies Éoliennes aux Réseaux Électriques</b>	<b>1</b>
1.1 Introduction	1
1.2 Impacts des Énergies Éoliennes sur les Systèmes Électriques	1
1.2.1 Impacts locaux	2
1.2.1.1 Capacité d'accueil du réseau	2
1.2.1.1.1 Courants en régime permanent :	2
1.2.1.1.2 Courants de court-circuit :	2
1.2.1.2 Qualité de tension	3
1.2.1.2.1 Variations de tension :	3
1.2.1.2.2 Flicker :	5
1.2.1.2.3 Emission d'harmoniques :	5
1.2.1.3 Plan de protection	5
1.2.2 Impacts globaux	5
1.2.2.1 Impact sur le fonctionnement des systèmes	6
1.2.2.1.1 Capacité de transport :	6
1.2.2.1.2 Régulation :	6
1.2.2.1.3 Dispatching :	6
1.2.2.1.4 Adéquation :	6
1.2.2.2 Comportement dynamique et stabilité du réseau	7
1.3 Intégration des Parcs Éoliens dans les Réseaux Électriques	7
1.3.1 Taux de pénétration	8
1.3.2 Installation d'un parc éolien	8
1.4 Solutions Techniques	9
1.5 Conclusion	9
<b>2 Résultats de Simulation</b>	<b>11</b>
2.1 Introduction	11
2.2 Présentation de l'Outil de Simulation	11

---

2.3	Configuration du Réseau d'Étude . . . . .	13
2.4	Résultats de l'Écoulement de Puissance . . . . .	13
2.5	Résultats de Simulation . . . . .	14
2.6	Conclusion . . . . .	17
	<b>Conclusion générale</b>	<b>18</b>
	<b>A Système 9 bus IEEE</b>	<b>19</b>
A.1	Caractéristiques des Machines Synchrones . . . . .	19
A.2	Données des Lignes . . . . .	20
A.3	Données de Nœuds . . . . .	20
A.4	Données des Systèmes d'Excitation . . . . .	21
	<b>B Machine Asynchrone</b>	<b>22</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>23</b>

# Liste des figures

1.1	Courant en régime permanent avant et après raccordement d'un producteur sur réseau de distribution [5] . . . . .	3
1.2	Profil de tension le long d'une ligne de distribution [5] . . . . .	4
1.3	Profil de tension pour des charges passives [6] . . . . .	4
1.4	Différents profils de tension pour des charges actives [6] . . . . .	4
1.5	Impacts des énergies renouvelables sur les systèmes électriques [5] . . . . .	7
2.1	Interface de PSAT . . . . .	12
2.2	Topologie du réseau . . . . .	13
2.3	Puissance active et réactive de l'éolienne . . . . .	14
2.4	Puissance active des générateurs . . . . .	15
2.5	Puissance réactive . . . . .	16
2.6	Tension des nœuds . . . . .	16
2.7	Fréquence de réseau . . . . .	17
2.8	Vitesse de rotation . . . . .	17



# Liste des tableaux

2.1	Écoulement de puissance . . . . .	14
A.1	Caractéristiques des Générateurs Synchrones . . . . .	19
A.2	Données des Transformateurs . . . . .	19
A.3	Données des Lignes . . . . .	20
A.4	Données de Nœuds . . . . .	20
A.5	Données des Systèmes d'Excitation . . . . .	21

# Chapitre 1

## Intégration des Énergies Éoliennes aux Réseaux Électriques

### 1.1 Introduction

Ces dernières décennies, l'humanité a commencé à s'intéresser à la problématique du changement climatique . La plupart des états ont adopté des solutions visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Cela va résulter une augmentation de la production d'électricité à base d'énergie éolienne, mais sa présence n'a jamais été d'une ampleur significative pour avoir un impact sur le fonctionnement du réseau [1]

### 1.2 Impacts des Énergies Éoliennes sur les Systèmes Électriques

En raison de la nature intermittente de la source d'énergie et des fluctuations qui en résultent au niveau de la puissance produite par une unité de production d'énergies éoliennes, le raccordement de celle-ci à un système électrique quelconque a un impact non négligeable qui dépend de la technologie utilisée et aussi du type de réseau. En général, on peut dire que plus le taux de pénétration est important, plus l'impact de l'intégration des énergies éoliennes dans les réseaux est significatif. On peut distinguer des impacts locaux qui concernent tous

les types des réseaux et les impacts globaux qui concernent en particulier les réseaux de transports interconnectés et les réseaux insulaires [2, 3, 4].

## 1.2.1 Impacts locaux

Ce sont les impacts qui se produisent dans le voisinage du point de raccordement de l'unité et qui peuvent être attribués directement à cette dernière. Les impacts locaux sont en général indépendants du taux de pénétration global des unités de production d'énergies renouvelables dans le système. Ils concernent deux principaux aspects : la capacité d'accueil du réseau et la qualité de tension.

### 1.2.1.1 Capacité d'accueil du réseau

**1.2.1.1.1 Courants en régime permanent :** Suite au raccordement d'un producteur (énergies éoliennes ou pas) sur le réseau, l'intensité du courant en fonctionnement normal parcourant un ou plusieurs éléments du réseau (lignes, câbles) peut augmenter. Il y a donc un risque de dépassement des valeurs admissibles pour les différents équipements de réseau. Ceci implique naturellement la première contrainte à respecter qui est de ne pas dépasser ces valeurs admissibles quel que soit la configuration et le point de fonctionnement de la centrale connectée et du système électrique dans lequel elle s'insère.

Lorsque l'installation d'énergies éoliennes est reliée au réseau, les contraintes thermiques éventuelles liées au régime permanent apparaissent en général sur les conducteurs proches de l'installation. Elles sont liées à la puissance de l'installation raccordée et aux caractéristiques des conducteurs existants.

**1.2.1.1.2 Courants de court-circuit :** L'impact sur le courant de court-circuit est surtout dû aux fermes éoliennes qui suivant la technologie utilisée, peuvent alimenter et donc accroître le courant de court-circuit circulant dans le réseau en cas de défaut. La contrainte ici est de ne dépasser ni les valeurs maximales admissibles pour les différents appareillages des réseaux et les conducteurs, ni le pouvoir de coupure des organes de protection. Chaque appareil de coupure possède un pouvoir de fermeture et un pouvoir de coupure sur défaut. Un dépassement des valeurs de dimensionnement de l'appareil de coupure a pour conséquence un risque de non coupure de l'arc ou de non fermeture du courant de défaut avec un fort

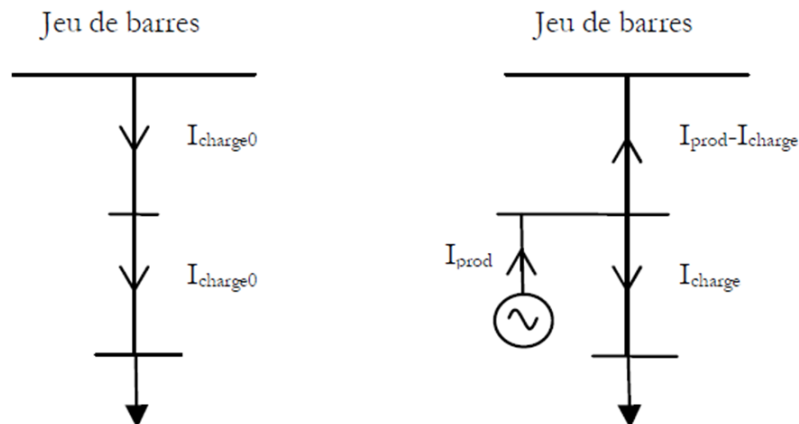


FIGURE 1.1: Courant en régime permanent avant et après raccordement d'un producteur sur réseau de distribution [5]

risque de destruction de l'appareillage [2].

### 1.2.1.2 Qualité de tension

Le terme qualité de la tension se réfère aux niveaux de tension, à la stabilité de la fréquence du réseau et à l'absence dans le réseau électrique de différentes formes de phénomènes électriques (comme par exemple les flicker ou les distorsions harmoniques). La prise en compte des problèmes décrits ci-dessous ainsi que leur évaluation permet de concevoir et dimensionner le dispositif de connexion de l'unité de production.

**1.2.1.2.1 Variations de tension :** Les changements de puissances actives et réactives dus aux sources, quel que soit leur nature se répercutent sur le profil de tension en régime permanent, selon les caractéristiques du réseau. La figure (1.2) illustre un exemple de profil de tension pour une ferme éolienne raccordée sur une artère de distribution. Sans la production éoliennes, la régulation de tension est basée sur les caractéristiques des charges et des systèmes passifs. Le profil de tension est facilement déterminable en ce qui concerne les structures radiales et les charges stables par ce que le flux de puissance est unidirectionnel, comme il montre la figure (1.3).

En présence de la production éoliennes, la régulation de tension est plus complexe, car elle dépend des sites, des dimensions, dispatching et les caractéristiques de la production éoliennes, comme le montre la figure (1.4). Une solution possible est un système de régulation

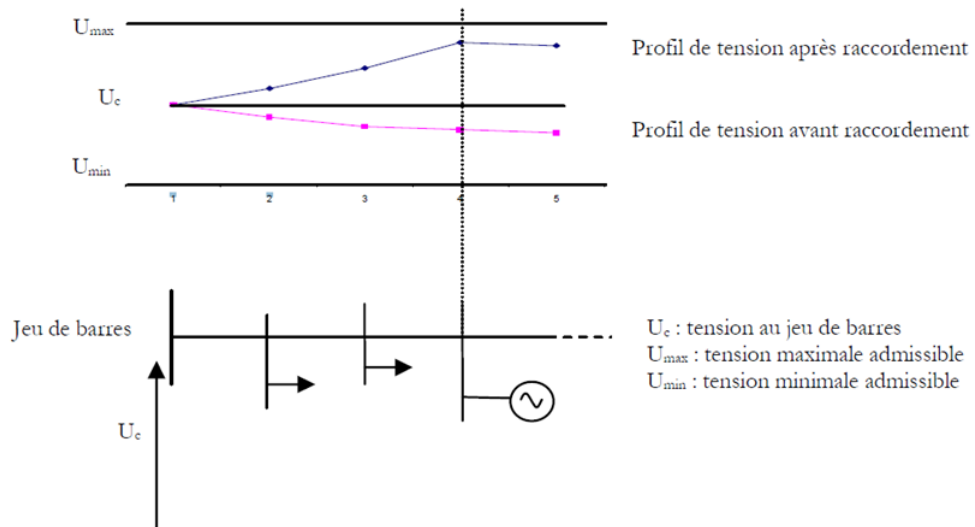


FIGURE 1.2: Profil de tension le long d'une ligne de distribution [5]

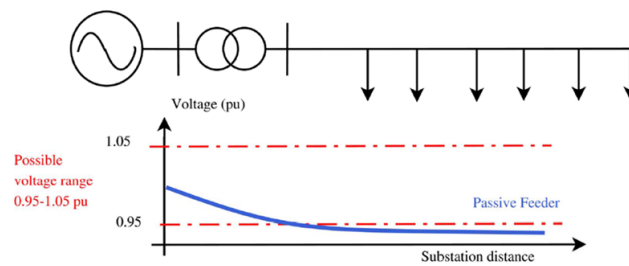


FIGURE 1.3: Profil de tension pour des charges passives [6]

de tension basé sur un contrôle coordonné de sous changeurs de prises des transformateurs HT/MT et des flux de puissance réactive dans les réseaux de distribution.

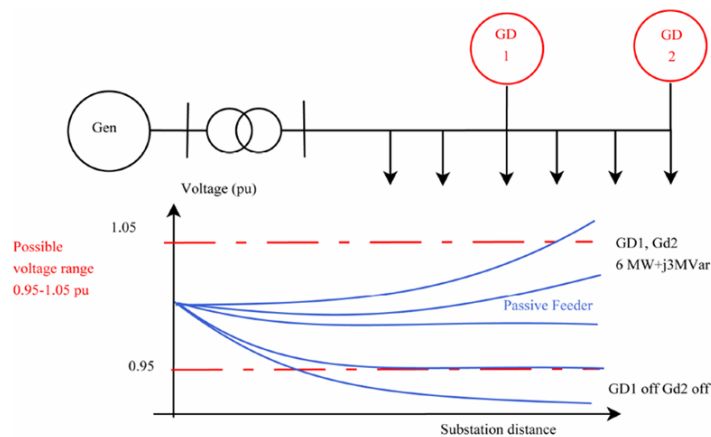


FIGURE 1.4: Différents profils de tension pour des charges actives [6]

**1.2.1.2.2 Flicker :** Le papillotement ou scintillement (flicker en anglais) est une fluctuation de tension de courte durée causée par des perturbations électromagnétiques ou par des variations de puissance sur le réseau porteur de cette tension. Ce phénomène peut survenir si l'unité de production d'énergies éoliennes est raccordée à un réseau ayant une faible puissance de court-circuit.

**1.2.1.2.3 Emission d'harmoniques :** Les harmoniques de tension et de courant sont toujours présents dans un réseau de distribution. Ils sont essentiellement provoqués par la présence de charges non linéaires et de convertisseurs de puissance. Ces harmoniques provoquent une surchauffe de l'équipement, un fonctionnement défectueux du système de protection, et des interférences dans les circuits de communication. Les dispositifs d'électronique de puissance utilisés pour optimiser la puissance extraite des unités de production d'énergies éoliennes (éoliennes à vitesse variables) présentent l'inconvénient d'être des sources d'harmoniques. Des standards concernant les taux maximum d'harmoniques générés par les générateurs éoliens ont été établis [7].

### 1.2.1.3 Plan de protection

Le plan de protection est un système coordonné de protections visant à isoler très rapidement un ouvrage en défaut (ligne, transformateur, jeu de barres, etc.) afin de garantir la sécurité des biens et des personnes. Différents types de relais mesurant différentes grandeurs physiques sont utilisés.

Le raccordement de la production d'énergie éoliennes peut entraîner des variations du sens (réseau de production) ou de l'amplitude des courants en régime permanent, des variations des courants de court-circuit, des modifications de la tension, des variations des impédances mesurées, etc. Ces variations peuvent avoir une influence sur le bon fonctionnement du plan de protection avec notamment des aveuglements de protection ou des déclenchements intempestifs.

## 1.2.2 Impacts globaux

À part les impacts locaux qui ont des effets dans le voisinage du point de raccordement, les unités de production d'énergies éoliennes peuvent avoir des impacts plus globaux à l'échelle

d'une région, surtout si elles sont raccordées au réseau de transport ou dans les réseaux insulaires.

### 1.2.2.1 Impact sur le fonctionnement des systèmes

La problématique majeure liée à l'intégration des énergies éoliennes dans les réseaux est de deux ordres :

- la variabilité de la production d'énergies éoliennes du fait des variations de l'énergie primaire qui est de plus non contrôlable. Des systèmes de stockage contrôlables sont alors nécessaires pour pallier à ces variations, en particulier pour satisfaire la demande en période de pointe.
- l'incertitude sur les prévisions météorologiques induisant une incertitude sur la production.

Les deux aspects cités ont des impacts liés surtout à la réalisation de l'équilibre production-consommation à divers horizons temporels. Outre ces préoccupations, restent celles liées à la sécurité du réseau du point de vue global.

**1.2.2.1.1 Capacité de transport :** La production d'énergie éolienne affecte le transit de puissance dans le réseau : elle peut changer le sens des flux, augmenter ou réduire les pertes. L'analyse des capacités de transport nécessite à la fois des études statiques (calcul de la répartition des flux de puissance) et dynamiques (analyse de la stabilité).

**1.2.2.1.2 Régulation :** Il s'agit ici de l'impact de l'incertitude de la production éoliennes sur l'allocation et l'utilisation de la réserve dans le système. L'échelle de temps considérée ici va de quelques secondes à une demi-heure.

**1.2.2.1.3 Dispatching :** Cet impact est dû à la variabilité et aux erreurs de prédiction de la production éoliennes. Ces deux aspects influent sur la gestion prévisionnelle de la production.

**1.2.2.1.4 Adéquation :** L'horizon de temps ici est de l'ordre de plusieurs années.

### 1.2.2.2 Comportement dynamique et stabilité du réseau

Les variations de la puissance peuvent avoir un impact sur le comportement dynamique du réseau, et parfois même sur sa stabilité pour des variations brusques et importantes. Le réseau doit être capable de supporter ces variations en conservant sa stabilité et en maintenant la tension et la fréquence sur le réseau dans les plages admissibles. L'impact sur le fonctionnement dynamique du réseau sera d'autant plus important si :

- le point de raccordement de l'installation de la production d'énergies éoliennes est faible (puissance de court-circuit faible, difficulté à maintenir la tension) ;
- le taux de pénétration en énergies renouvelables est important ;
- les unités de production sont concentrées dans les mêmes zones géographiques, par exemple des parcs éoliens sont proches les uns des autres et donc soumis à des conditions de vent similaires.

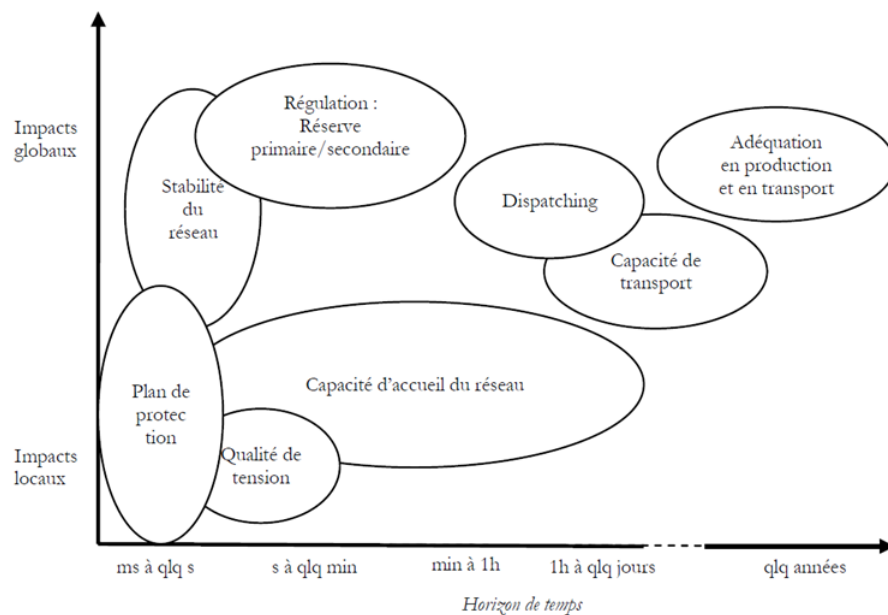


FIGURE 1.5: Impacts des énergies renouvelables sur les systèmes électriques [5]

## 1.3 Intégration des Parcs Éoliens dans les Réseaux Électriques

L'intégration à grande échelle des parcs éoliens pose aux réseaux d'énergie électrique de nouvelles contraintes par rapport aux sources d'énergies conventionnelles dont le comportement est bien maîtrisé. Afin de relever le défi de coordination d'une production d'électricité basée



sur l'exploitation de l'énergie éolienne avec le reste du système électrique, de nombreux pays ont imposé dans leur code de réseau de nouvelles exigences, relatives au raccordement et au fonctionnement des aérogénérateurs et parcs éoliens. L'objectif des codes de réseau est de fixer des règles techniques de raccordement au réseau de transport de l'électricité afin de garantir un niveau adéquat de sécurité et de fiabilité. Les principales exigences dans un code de réseau sont liées aux contrôles de la fréquence et de la tension.

La puissance électrique produite par les éoliennes est fluctuante. Elle varie avec la variation de la vitesse du vent. Ceci peut être considéré comme une perturbation de puissance injectée dans le système électrique et peut mettre en danger la stabilité du système. De plus, les éoliennes modifient la structure du réseau, cette modification change les comportements dynamiques des machines lors d'une perturbation, d'où l'intérêt d'élaborer de nouvelles exigences de raccordement et de fonctionnement des parcs éoliens, afin de garder au maximum les éoliennes connectées au réseau pendant et après l'élimination d'un défaut.

### 1.3.1 Taux de pénétration

Le taux de pénétration de l'éolien, c'est-à-dire la puissance que génèrent les éoliennes par rapport à la puissance totale consommée, doit alors être limité afin de pouvoir garantir la stabilité du réseau dans des conditions acceptables.

Théoriquement, la pénétration dans le réseau de ce moyen de production n'est pas limitée. Cependant, si on prend en compte les contraintes technico-économiques actuelles, un taux de pénétration éolien limité à 20% est généralement considéré. En dessous de cette valeur, on considère que la structure et le fonctionnement du réseau électrique ne doivent pas subir de changements très importants. Certains retours d'expériences par exemple au Danemark, indiquent que, pour des taux de pénétration supérieurs à 20 ou 30%, des problèmes de stabilité peuvent apparaître [8].

### 1.3.2 Installation d'un parc éolien

L'installation d'un parc éolien nécessite une procédure en plusieurs étapes impliquant tous les acteurs : porteurs de projet, pouvoirs publics et citoyens. L'ensemble de la procédure prend au minimum 5 ans. L'étape la plus importante, c'est le choix de la localisation qu'elle doit être suffisamment ventée, facile à relier au réseau électrique haute ou moyenne tension.

Le coût d'investissement constaté en 2010 et 2011 pour l'éolien terrestre est d'environ 1 300 Euro par kW installé. Il englobe le coût des études, des matériels, du raccordement, de l'installation, des frais de mise en route et de démantèlement [9].

Les installations d'une puissance maximale de 12 MW sont connectées au réseau de distribution, généralement de moyenne tension (MT). Normalement les installations d'une puissance supérieure à 12 MW sont connectées au réseau de transport (HT). À l'origine, le réseau MT était en principe conçu pour accueillir des consommateurs, l'intégration progressive de productions dans ce réseau peut conduire jusqu'à une inversion des flux de puissance au niveau des postes HT-MT. En fonction du taux de pénétration, ceci peut influencer avant tout la gestion de la tension, mais peut aussi conduire à des révisions du plan de protection et à des modifications de structure en raison de courants de court-circuit trop élevés [10].

## 1.4 Solutions Techniques

Lorsque des problèmes apparaissent lors des études d'insertion de l'éolien dans les réseaux électriques, plusieurs solutions sont proposées, les principales sont [11] :

- l'amélioration des techniques de la production décentralisée ;
- le coordination avec d'autres moyens de production ;
- le contrôle de charges ;
- les systèmes de compensation de réactif ;
- le stockage de l'énergie ;
- les protections directionnelles et les filtres.

Pour chaque problèmes et contraintes, il existe plusieurs solutions. Le choix de ces solutions se fera en fonction de critères économiques, sociaux et environnementaux et politiques.

## 1.5 Conclusion

L'intégration importante des énergies renouvelables dans les systèmes électriques entraîne la mutation de ces derniers d'une structure verticale vers une structure horizontale (avec des injections de puissance à tous les niveaux de tension, notamment dans le réseau de distribution).

La différence entre les caractéristiques de la production décentralisée par rapport à celles des unités de production conventionnelles conduisent à avoir des effets sur le réseau électrique.

Elle pose aux gestionnaires des réseaux de nouveaux défis techniques notamment à cause de la variabilité de la production.

# Chapitre 2

## Résultats de Simulation

### 2.1 Introduction

Dans le présent chapitre, nous étudions l'influence de l'intégration d'un parc éolien dans un réseau électrique sur la stabilité statique de tout le système. Comme application, nous avons choisi le réseau standard 9 bus IEEE, et résolu à l'aide d'un logiciel de simulation des réseaux électriques (PSAT).

Pour cela, nous présentons d'abord l'outil de simulation utilisé, puis nous étudions la stabilité en régime statique du réseau avec la production d'énergie éolienne. Les résultats obtenus étant ensuite interprétés et comparés.

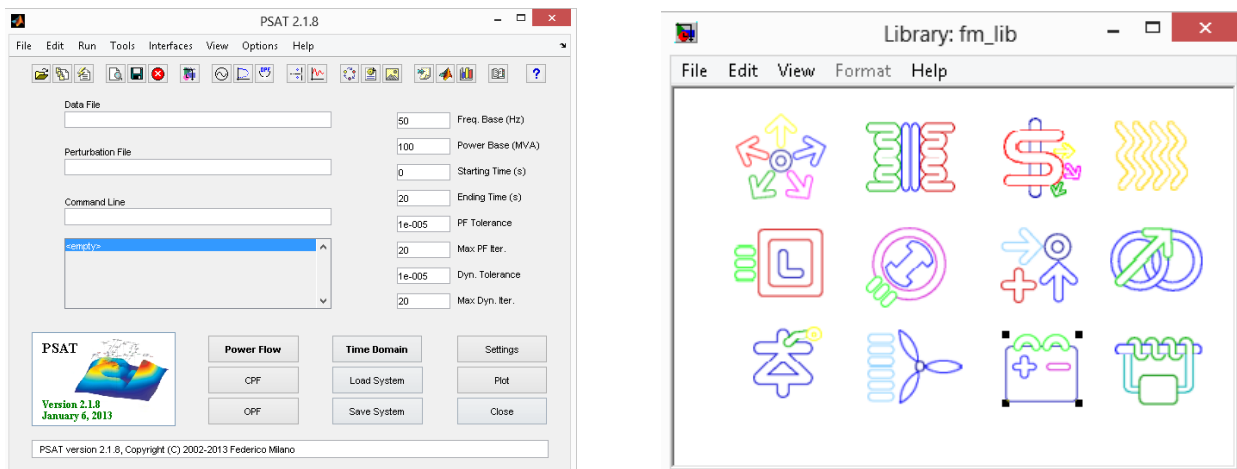
### 2.2 Présentation de l'Outil de Simulation

Au cours des vingt dernières années, la simulation est devenue l'un des outils majeurs d'aide à la planification et à la gestion des réseaux de transport d'électricité. La simulation des réseaux électriques est en fait un champ d'investigation extrêmement porteur de nouveaux développements scientifiques et technologiques.

Plusieurs outils de simulation ont été utilisés pour l'analyse de la stabilité tels que : EMTP, Etap, PowerWorld, PSAT, etc. Ces logiciels permettent de renseigner sur les différents facteurs d'un réseau électrique et de simuler les différents cas pour avoir les paramètres du réseau. Ils utilisent les mêmes concepts et algorithmes.

Dans le présent travail, nous avons choisi PSAT (Power System Analysis Toolbox) comme

outil de simulation. Développé en 2001 par Federico Milano, PSAT est une boîte à outils qui s'exécute sous environnement Matlab. Il permet de construire graphiquement les réseaux électriques, de les modifier, d'y opérer des simulations et de générer des résultats qu'on pourra analyser. Cet outil est dédié pour l'analyse statique et dynamique des réseaux électriques.



(A) Fenêtre principale

(B) Bibliothèque de Simulink

FIGURE 2.1: Interface de PSAT

Le PSAT inclut l'écoulement de puissance et l'écoulement de puissance optimal. Le logiciel fournit également la possibilité de simuler l'évolution du système dans le temps. Le temps de simulation peut être prescrit, et les changements des états du système peuvent être visualisés. Il permet aussi d'afficher l'évolution des paramètres physiques de réseau étudié (angles rotoriques, vitesses de rotation, tensions, puissances actives et réactives des machines) en fonction du temps suite à une perturbation. La méthode d'intégration numérique d'Euler modifiée est implémentée dans le simulateur [12].

Les étapes d'utilisation de PSAT se résument comme suit :

- Ouvrir un nouveau fichier ;
- Créer un réseau électrique à étudier en utilisant la bibliothèque de Simulink de PSAT ;
- Introduire les données numériques des éléments (générateurs, lignes, transformateurs, etc) ;
- Exécuter l'écoulement de puissance ;
- Exécuter la simulation dans le domaine temporel.

## 2.3 Configuration du Réseau d'Étude

Le réseau test présenté dans la figure (2.2), comporte trois alternateurs connectés aux jeux de barres 1, 2 et 3 à travers des transformateurs de puissance contribuant à l'alimentation de trois charges reliées respectivement aux nœuds 5, 6 et 8. Un parc éolien avec une charge locale est raccordé au réseau. Le parc contient 20 éoliennes de 1.4 MW chacune, soit un total produit de 28 MW. Les générateurs asynchrones à cage d'écureuil ne possèdent pas de circuit d'excitation, donc elles tirent leur énergie réactive du réseau auquel elles sont couplées. Les caractéristiques des éoliennes utilisées dans notre travail sont indiquées dans l'annexe (B).

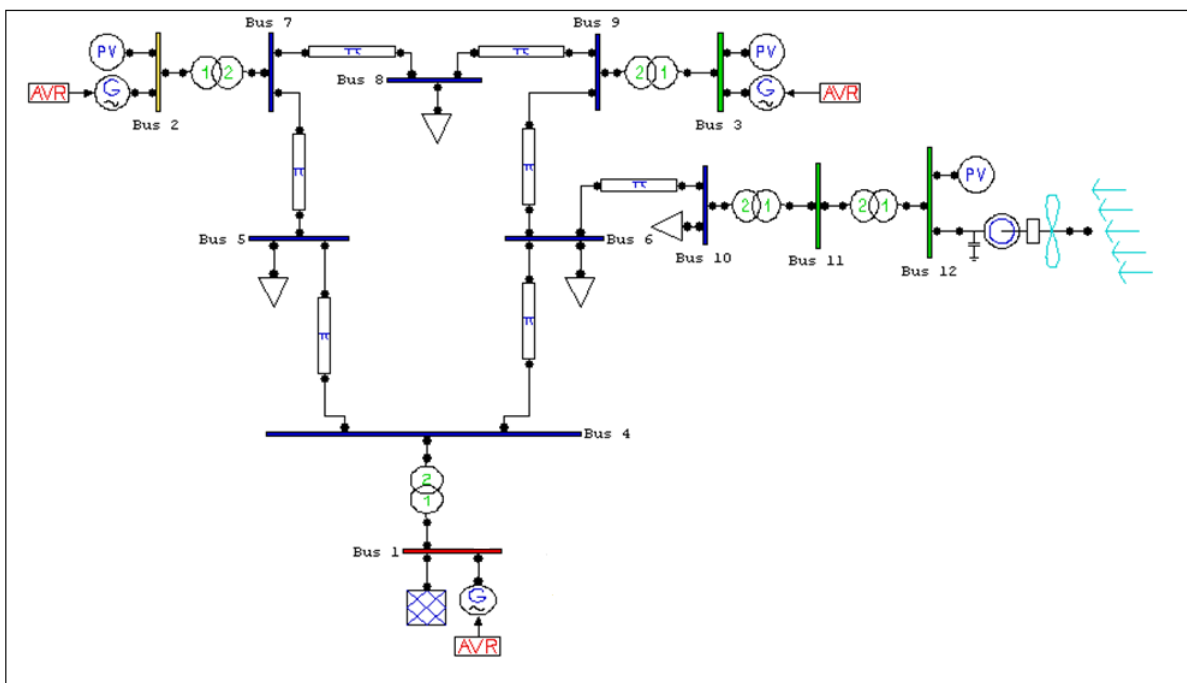


FIGURE 2.2: Topologie du réseau

## 2.4 Résultats de l'Écoulement de Puissance

Les résultats de l'écoulement de puissance sont donnés dans le tableau (2.1). Les tensions de tous les nœuds sont entre 0.95 p.u et 1.05 p.u (limites autorisées). Cependant, le générateur du nœud balancier étant le principal fournisseur de puissance réactive dans le réseau, et le générateur d'équilibrage entre la demande et la consommation.

TABLE 2.1: Écoulement de puissance

<i>Bus</i>	$V[p.u]$	$Phase[rad]$	$P_{gen}[p.u]$	$Q_{gen}[p.u]$	$P_{load}[p.u]$	$Q_{load}[p.u]$
Bus 1	1.04	0	0.53623	0.15526	0	0
Bus 2	1.025	0.17746	1.63	0.03375	0	0
Bus 3	1.025	0.10062	0.85	-0.18409	0	0
Bus 4	1.0318	-0.02879	0	0	0	0
Bus 5	1.0003	-0.05733	0	0	1.25	0.5
Bus 6	1.0318	-0.04211	0	0	0.9	0.3
Bus 7	1.0278	0.0806	0	0	0	0
Bus 8	1.019	0.03015	0	0	1	0.35
Bus 9	1.0367	0.05373	0	0	0	0
Bus 10	1.0378	-0.01345	0	0	0.1	0
Bus 11	1.0346	-0.00895	0	0	0	0
Bus 12	1.02	0.0129	0.28	-0.1782	0	0

## 2.5 Résultats de Simulation

Dans l'état statique de fonctionnement du réseau, la puissance générée par le parc éolien est fluctuante, c'est dû aux variations rapides de la vitesse du vent. La figure (2.3) représente la puissance active générée et la puissance réactive consommée par une éolienne dans un intervalle de temps de 50 s. La puissance de base considérée est 100 MW, donc 1 p.u correspondant à 100 MW.

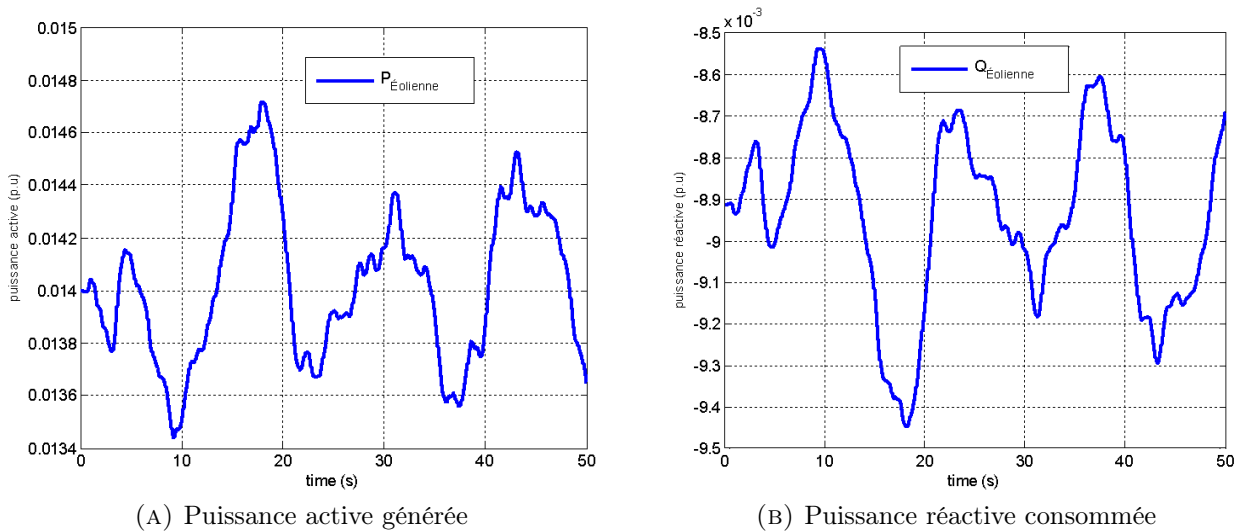
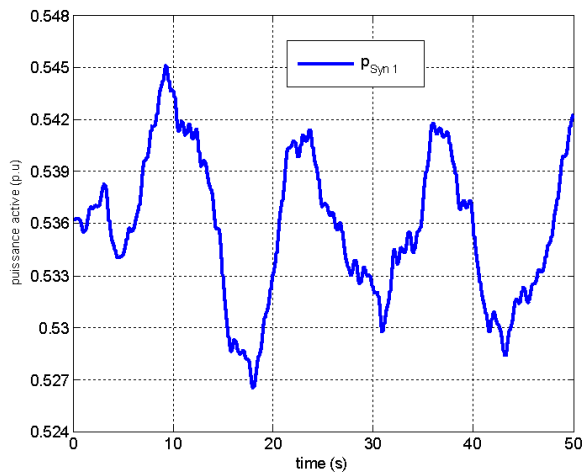
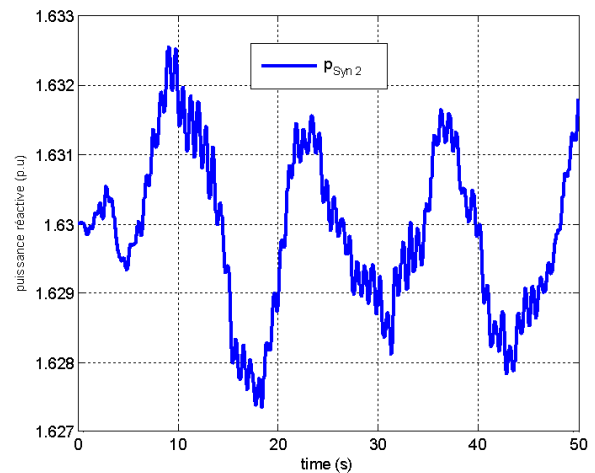


FIGURE 2.3: Puissance active et réactive de l'éolienne

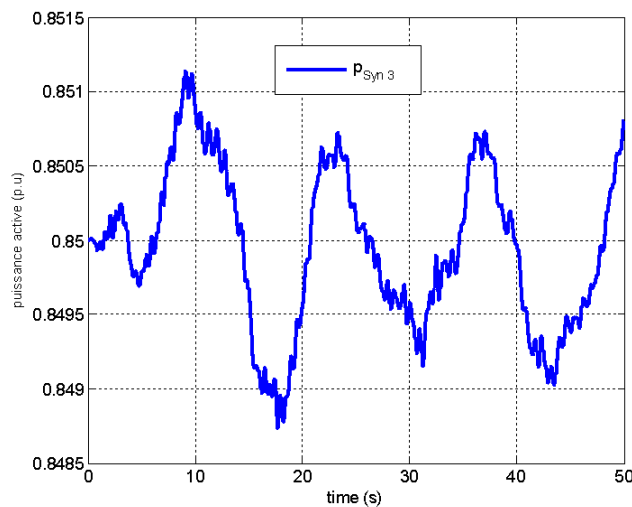
Les variations rapides de la tension causées par les variations de la puissance réactive, peuvent changer la puissance active demandée et causer des oscillations de puissances, comme illustre les figures (2.4) et (2.5).



(A) Puissance active de générateur 1



(B) Puissance active de générateur 2



(C) Puissance active de générateur 3

FIGURE 2.4: Puissance active des générateurs

La puissance active de générateur 1 varie entre 52,7 et 54,5 MW dans un intervalle de temps de 50 s, c'est une plage de variation de 1,8 MW, tandis que les générateurs 2 et 3 ont une plage de variation de 0,52 MW pour le générateur 2 et de 0,23 MW pour le générateur 3, parce que le générateur 1 est un générateur d'équilibrage, il produit la puissance nécessaire



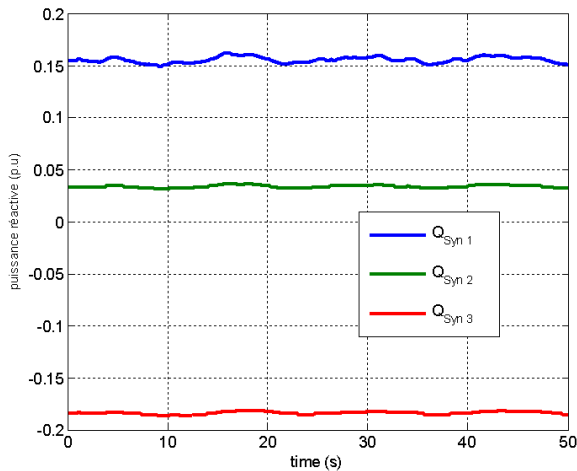


FIGURE 2.5: Puissance réactive

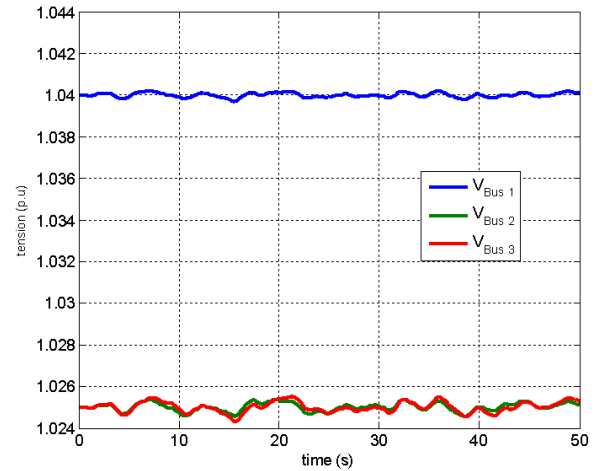


FIGURE 2.6: Tension des nœuds

pour avoir l'équilibre instantané entre la demande et la consommation, par contre les générateurs 2 et 3 sont des générateurs PV, la fluctuation de la puissance est due aux variations des puissances réactive injectées dans le réseau, ce qui modifie les puissances de transmission du réseau. De manière générale, les fluctuations des puissances ne sont pas importantes.

Les changements de puissances réactive des générateurs et du parc éolien influent sur le profil de tension en régime permanent du réseau. Donc des simulations sont nécessaires pour vérifier que ce profil s'inscrit dans un gabarit prédéfini. La figure (2.6) illustre les niveaux de tension pour les trois nœuds de réseau.

La variation de la puissance active injectée dans le réseau entraîne une variation de fréquence de ce dernier. La figure (2.7) représente la fréquence du réseau après l'intégration de parc éolien. Elle varie entre 60.03 et 59.95 Hz, la variation de la fréquence ne dépasse pas 0.05 Hz, donc elle est dans les limites autorisées.

Pour assurer un fonctionnement en générateur, il est nécessaire que la vitesse de rotation de la MAS soit au-delà du synchronisme, avec un glissement négatif inférieur ou égal à 1%. La vitesse de rotation du rotor de la génératrice à cage d'écureuil est représentée dans la figure (2.8). Le glissement varie entre -0.0047 et -0.0054, il est négatif, parce que la MAS fonctionne dans le mode générateur, et il est inférieur à 1%, cela confirme que le fonctionnement des éoliennes est dans un état standard.

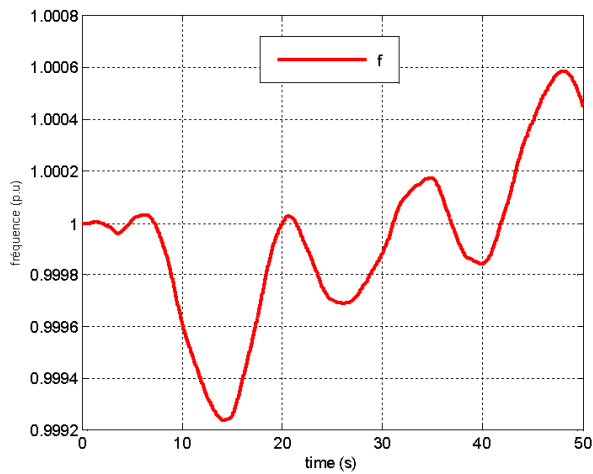


FIGURE 2.7: Fréquence de réseau

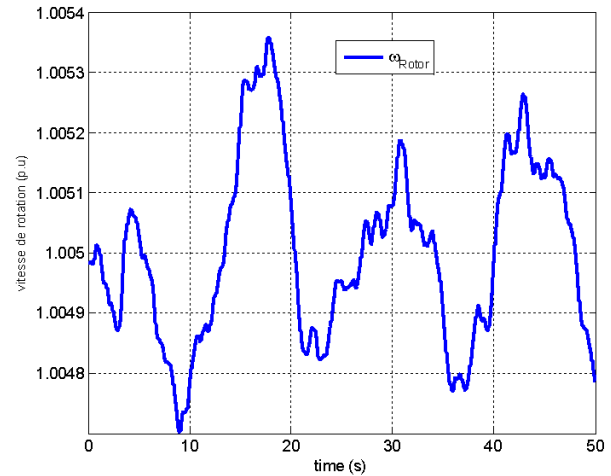


FIGURE 2.8: Vitesse de rotation

## 2.6 Conclusion

La variabilité de la puissance active produite par le parc éolien influe sur l'équilibre total entre les puissances actives produites et consommées y compris les pertes, cela va affecter la stabilité en fréquence de réseau.

Les changements de puissances réactive des générateurs et du parc éolien influent sur le profil de tension en régime permanent du réseau.

La production de parc éolien a un impact négatif sur le réseau électrique en régime statique.

# Conclusion générale

La production d'électricité à base d'énergie éolienne se distingue des moyens de production conventionnels par leur taille relativement petite, la variabilité de leurs énergies primaires et les technologies utilisées. L'intégration de production d'énergie éolienne impacte de façon notoire les systèmes électriques.

Le travail présenté dans ce projet concerne l'étude des impacts d'un parc éolien sur le réseau électrique en régime statique. En premier lieu, nous avons présenté des généralités sur l'intégration des énergies éoliennes aux réseaux électriques : son impact, ses conditions de raccordement, ses avantages et ses problématiques. Ensuite, nous avons abordé la partie simulation. Pour cela, nous avons choisi PSAT comme outil de simulation. C'est une boîte à outils qui s'exécute sous environnement Matlab.

Nous avons choisi pour la simulation, le réseau standard IEEE 3 machines 9 nœuds, avec un parc éolien et une charge locale.

On constate que les fluctuations de la puissance générée par les éoliennes ont un impact négative sur la stabilité en fréquence et en tension dans les réseaux électriques.

Pour améliorer la participation de la production des éoliennes dans la stabilité des réseaux électriques, il faut développer les techniques utilisées (types d'éoliennes, système de stockage..), et les algorithmes de contrôle prédictif de la puissance générée par les éoliennes.

# Annexe A

## Systeme 9 bus IEEE

### A.1 Caractéristiques des Machines Synchrones

TABLE A.1: Caractéristiques des Générateurs Synchrones

Paramètres	Générateur 1	Générateur 2	Générateur 3
$H$	23.64	6.40	3.01
$V[kV]$	16.5	18	13.8
$X_d[p.u]$	0.1460	0.8958	1.3125
$X'_d[p.u]$	0.0608	0.1198	0.1813
$X_q[p.u]$	0.0969	0.8645	1.2578
$X'_q[p.u]$	0.0969	0.1969	0.2500
$T'_{d0}[s]$	8.96	6.00	5.89
$T'_{q0}[s]$	0.310	0.5350	0.600

TABLE A.2: Données des Transformateurs

Transformateur	Ligne	Rapport[kV]	Réactance[p.u]
1	1-4	16.5/230	0.0576
2	2-7	18/230	0.0625
3	3-9	13.8/230	0.0586

## A.2 Données des Lignes

TABLE A.3: Données des Lignes

Ligne	Résistance [p.u]	Réactance [p.u]	Susceptance [p.u]
1-4	0.0000	0.0576	0.0000
2-7	0.0000	0.0625	0.0000
3-9	0.0000	0.0586	0.0000
4-5	0.0100	0.0850	0.0880
4-6	0.0170	0.0920	0.0790
5-7	0.0320	0.1610	0.1530
6-9	0.0390	0.1700	0.1790
7-8	0.0085	0.0720	0.0745
8-9	0.0119	0.1008	0.1045

## A.3 Données de Nœuds

TABLE A.4: Données de Nœuds

<i>Bus</i>	<i>Type</i>	$V[p.u]$	$Phase[p.u]$	$P_{load}[p.u]$	$Q_{load}[p.u]$	$P_{gen}[p.u]$	$Q_{gen}[p.u]$
1	SB	1.040	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	PV	1.025	9.30	0.00	0.00	163.00	6.70
3	PV	1.025	4.70	0.00	0.00	85.00	-10.90
4	PQ	1.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	PQ	1.000	0.00	125.00	50.00	0.00	0.00
6	PQ	1.000	0.00	90.00	30.00	0.00	0.00
7	PQ	1.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	PQ	1.000	0.00	100.00	35.00	0.00	0.00
9	PQ	1.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

## A.4 Données des Systèmes d'Excitation

TABLE A.5: Données des Systèmes d'Excitation

Paramètres	Générateur 1	Générateur 2	Générateur 3
$K_a$	20	20	20
$T_a[s]$	0.2	0.2	0.2
$K_f$	0.063	0.063	0.063
$T_f[s]$	0.35	0.35	0.35
$K_e$	1	1	1
$T_e[s]$	0.314	0.314	0.314

# Annexe B

## Machine Asynchrone

1.66 MVA, 575 V, 6 pôle, 60 Hz, triphasé

Résistance statorique  $R_s = 0.00706pu$

Résistance rotorique  $R'_r = 0.005pu$

Inductance statorique  $L_s = 0.171pu$

Inductance rotorique  $L'_r = 0.156pu$

Inductance de magnétisation  $L_m = 2.9pu$

Constant d'inertie  $H = 5.04$

# Bibliographie

- [1] Hristiyan Kanchev, “Gestion des flux énergétiques dans un système hybride de sources d’énergie renouvelable : Optimisation de la planification opérationnelle et ajustement d’un micro réseau électrique urbain”, Thèse de doctorat, École Centrale de Lille et l’Université Technique de Sofia, 2014.
- [2] Pierre Bousseau, Floriane Fesquet, Régine Belhomme, Samuel Nguéfeu et Thanh Chau Thai, “Solutions for the grid integration of wind farms – A survey”, European Wind Energy Conference and Exhibition, January - April 2006, Volume 9, Issue 1-2, pp 13–25.
- [3] J.G Sloopweg, “Wind Power : Modelling and Impact on Power System Dynamics”, Thèse de doctorat de l’Université de Technologie de Delft, 9 december 2003.
- [4] Tan, Yu Tiam, “Impact on the Power System with Large Penetration of Photovoltaic Generation”, Thèse de doctorat de l’Université de Manchester, 2004.
- [5] Rosario Miceli, Salvatore Favuzza, Fabio Genduso, “A Perspective on the Future of Distribution : Smart Grids, State of the Art, Benefits and Research Plans”, Energy and Power Engineering, 2013, pp36-42.  
<http://dx.doi.org/10.4236/epe.2013.51005>
- [6] Metz-Noblat et G. Jeanjean, “Stabilité dynamique des réseaux électriques industriels”, Cahier technique Schneider *N*<sup>0</sup> 185, édition janvier 1997.
- [7] M. Crape, “Commande et régulation des réseaux électriques”, Hermès Science, Paris 2003.
- [8] Herman Bayem, “Apport des méthodes probabilistes aux études d’intégration des énergies renouvelables aux systèmes électriques”, Electric power, Université Paris Sud - Paris XI, 2009.



- 
- [9] L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), Édition : novembre 2012. <http://www.ademe.fr>
- [10] B. Robyns, A. Davigny, C. Saudemont, A. Ansel, V. Courtecuisse<sup>1</sup>, B. François, S. Plumel, J. Deuse, "Impact de l'éolien sur le réseau de transport et la qualité de l'énergie", Journées du Club EEA « Ouverture des marchés de l'électricité », 15 et 16 mars 2006, Supélec, Gif-sur-Yvette.
- [11] EDF SEI, "Bilan prévisionnel pluriannuel investissements en production", Référentiel technique de raccordement HTB, 2008. <http://www.edf.fr/>
- [12] Federico Milano, "PSAT", Power System Analysis Toolbox Documentation for PSAT version 2.0.0, February 14, 2008.