

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la recherche Scientifique

**Université Mentouri de Constantine Faculté des Sciences de
L'ingénieur Département d'Electrotechnique**

N° d'ordre :

Série :

Mémoire

**Présenté en vue de l'obtention du diplôme de magister
En Electrotechnique**

Option : Modélisation et commande des machines électriques

Par

FAIROUZ KENDOULI

Etat de l'art et modélisation des microcentrales

Soutenu le : / /2007 devant le jury composé de :

Président : **LATRECHE Mohamed El-Hadi** **Prof** à l'Université de Constantine

Rapporteur : **BOUCHERMA Mohamed** **Prof** à l'Université de Constantine

Examineurs : **BOUZID Aissa** **Prof** à l'Université de Constantine

: **BENALLA Houcin** **Prof** à l'Université de Constantine

REMERCIEMENTS

Le travail développé dans ce mémoire a été réalisé au sein du laboratoire d'Electrotechnique Mentouri de Constantine.

Mes remerciements vont également aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ces travaux et ce document :

Monsieur Latreche Mohamed El-Hadi , Professeur à l'Université Mentouri de Constantine, pour avoir présidé ce jury.

Messieurs Bouzid Aissa , Professeur à l'Université Mentouri de Constantine, et Messieurs Benalla Houcin Professeur à l'Université Mentouri de Constantine, pour avoir accepté d'être les rapporteurs de ce mémoire.

Monsieur Boucherma Mohamed , Professeur à l'Université Mentouri de Constantine, pour avoir dirigé et orienté mes travaux.

J'aimerais maintenant remercier mes proches et en premier lieu mes parents à qui je dédie ce mémoire. Ce mémoire est également dédié à mon mari Azzedinne pour le soutien qu'il m'a apporté.

Merci à toutes les personnes que je n'ai pas citées et qui ont de près ou de loin participer à la réalisation de ce travail.

*A mes parents qui m'ont
soutenu pendant toute la
durée de ces longues études,*

A Azzedine,

A Abderahman.

SOMMAIRE

| | | |
|--|-------------|----------|
| <i>INTRODUCTION GENERALE</i> | Page | 1 |
| <i>Chapitre 1 Ressources énergétiques renouvelables</i> | | |
| I.1. Introduction | | 4 |
| I.2. Énergies renouvelables, définition, ressources et exploitation | | 4 |
| I.3. Rentabilité économique | | 7 |
| I.4. Les Avantages des énergies renouvelables | | 8 |
| I.4.1 Avantages sur le plan environnemental | | 8 |
| I.4.2 Avantages sur le plan social | | 8 |
| I.4.3 Avantages sur le plan économique | | 8 |
| I.4.4 Avantages sur le plan géopolitique | | 9 |
| I.5. Les inconvénients des énergies renouvelables | | 9 |
| I.6. L'avenir des énergies renouvelables | | 10 |
| I.7. Les principales sources d'énergies renouvelables et leur potentiel de développement | | 11 |
| I.7.1. La production de chaleur par les sources renouvelables | | 11 |
| I.7.1.1 Thermo solaire | | 11 |
| I.7.1.2 Géothermie | | 12 |
| I.7.1.3 Biomasse | | 13 |
| I.7.2. La production d'électricité par les énergies renouvelables | | 13 |
| I.7.2.1 Hydraulique | | 15 |
| I.7.2.2 Énergie de la mer | | 16 |
| I.7.2.3 Photovoltaïque | | 16 |
| I.7.2.4 Production éolienne | | 17 |
| I.8. Conclusion | | 18 |

Chapitre 2 l'énergie éolien et photovoltaïque dans le contexte des énergies renouvelables

| | |
|---|----|
| II.1. Introduction | 20 |
| II.2. Conversion de l'énergie éolienne | 20 |
| II.2.1. Croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne | 21 |
| II.2.2. Situation industrielle et économique | 22 |
| II.2.3. Avantages et désavantages de l'énergie éolienne | 23 |
| II.2.3.1 Les avantages | 23 |
| II.2.3.2 Les désavantages | 24 |
| II.2.4. Descriptif d'une éolienne | 25 |
| II.2.5. Principaux composants d'une éolienne | 25 |
| II.2.5.1 La tour | 26 |
| II.2.5.2 La nacelle | 26 |
| II.2.5.3 Le rotor | 27 |
| II.2.6. Différents technologies d'éoliennes | 27 |
| II.2.6.1. Fonctionnement à vitesse fixe | 27 |
| II.2.6.1.a Les avantages de la vitesse fixe | 27 |
| II.2.6.1.b L'inconvénient de la vitesse fixe | 27 |
| II.2.6.2. Fonctionnement à vitesse variable | 27 |
| II.2.6.2.a Les avantages de la vitesse variable | 27 |
| II.2.6.2.b Les inconvénients de la vitesse variable | 28 |
| II.2.7. L'intérêt de la vitesse variable | 28 |
| II.2.8. Différentes types d'aérogénérateurs | 29 |
| II.2.8.1 Eoliennes à axe vertical | 30 |
| II.2.8.2 Eoliennes à axe horizontal | 31 |
| II.2.9. Caractéristique puissance - vitesse d'éoliennes de grande puissance | 32 |
| II.2.10. Types de régulation de puissance | 33 |
| II.2.10.1 Un système à décrochage aérodynamique « stall » | 33 |
| II.2.10.2 Un système d'orientation des pales « pitch » | 34 |
| II.3. Conversion de l'énergie photovoltaïque | 36 |
| II.3.1 L'effet photovoltaïque | 36 |
| II.3.2. Utilisation d'un générateur PV | 37 |

| | |
|---|----|
| II.3.3. Cellule photovoltaïque | 38 |
| II.3.4. Fonctionnement | 38 |
| II.3.5. Les avantages de l'énergie photovoltaïque | 39 |
| II.3.6. Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque | 40 |
| II.3.7. Les genres de systèmes photovoltaïques | 40 |
| II.3.7.1 Systèmes autonomes | 40 |
| II.3.7.2 Systèmes hybrides | 41 |
| II.3.7.3 Systèmes connectés à un réseau | 41 |
| II.3.8. Modèle mathématique | 42 |
| II.3.8.a Schéma équivalent idéal de la cellule photovoltaïque | 42 |
| II.3.8.b Schéma équivalent réel de la cellule photovoltaïque | 44 |
| II.4. Conclusion | 45 |

Chapitre 3 Synthèse des modèles existants

| | |
|--|----|
| III.1. Introduction | 48 |
| III.2. Modes de couplage au réseau et réseaux autonomes | 48 |
| III.3. Les problèmes des sources d'énergie renouvelables | 49 |
| III.4. Les modèles existants dans le domaine éolien | 50 |
| III.5. Modèles existants dans le domaine photovoltaïque | 53 |
| III.6. Dispositifs de stockage de l'énergie | 54 |
| III.7. Systèmes en site isolé | 58 |
| III.8. Les systèmes multi sources | 58 |
| III.9. Conclusion | 63 |

Chapitre 4 Elaboration de modèles des systèmes de production

| | |
|---|----|
| IV.1. Introduction | 65 |
| IV.2. Modélisation de la chaîne de production éolienne | 65 |
| IV.2.1. Conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique | 65 |
| IV.2.1.1 Théorie de Betz | 65 |
| IV.2.1.2 Production d'énergie mécanique | 68 |

| | |
|---|---------|
| IV.2.1.3 Le multiplicateur | 69 |
| IV.2.1.4 Equation dynamique de l'arbre | 70 |
| IV.2.2. Les différentes chaînes de conversion d'énergie | 71 |
| IV.2.3. Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne | 71 |
| IV.2.3.1 Générateur synchrone | 72 |
| IV.2.3.2 Générateur Asynchrones | 72 |
| IV.2.4. Modélisation mathématique de la machine Asynchrones Doublement | |
| Alimenté | 74 |
| IV.2.4.1. Equations mathématiques de la MADA | 74 |
| IV.2.4.1.1 Axes de repère classiques | 75 |
| IV.2.4.1.2 Tensions statoriques et rotoriques | 75 |
| IV.2.4.1.3 Flux statoriques et rotoriques | 75 |
| IV.2.4.1.4 Equation mécanique | 75 |
| IV.3. Modélisation des panneaux photovoltaïques | 78 |
| IV.3.1 Panneau solaire réglable sur Matlab | 79 |
| IV.3.2 La caractéristique I (V) d'une cellule photovoltaïque | 79 |
| IV.3.3 La puissance | 80 |
| IV.4. Couplage des deux chaînes | 81 |
| IV.5. Résultats de simulation | 82 |
| IV.6. Conclusion | 90 |
| <i>CONCLUSION GENERALE</i> | 92 |
| <i>Bibliographie</i> | 95 |
| <i>ANNEXE</i> | 107 |

Introduction générale

La progression rapide de la demande énergétique mondiale et l'échéance des réserves d'énergies fossiles favorise le développement des énergies renouvelables, ces énergies, que l'on appelle renouvelables, ont été longtemps et pour la plupart les seules énergies disponibles, faibles en puissance, dispersées sur les territoires.

Le charbon, le pétrole, le gaz, concurrents à partir du 18^{ième} siècle et sources d'énergie beaucoup plus concentrées et plus efficaces, ne sont pas équitablement répartis sur les territoires, ils ont été sources de conflits.

Les gisements des ressources énergétiques traditionnelles, d'origines principalement fossiles, ne peuvent être exploités que pour quelques décennies, ce qui laisse présager d'une situation de pénurie énergétique au niveau mondial de façon imminente, D'une part.

D'autre part, les déchets des centrales nucléaires posent d'autres problèmes en terme de pollution des déchets radioactifs.

Pour subvenir aux besoins en énergie de la société actuelle, il est nécessaire de trouver des solutions adaptées et de les diversifier. Actuellement, il y a principalement deux façons possibles d'agir. La première est de diminuer la consommation des récepteurs d'énergie électrique et augmenter la productivité des centrales énergétiques en améliorant respectivement leur efficacité. Une deuxième méthode consiste à trouver et développer de nouvelles sources d'énergie.

Dans l'immédiat, nous disposons de ressources en énergie renouvelable inépuisables, que nous sommes en mesure d'exploiter de plus en plus facilement et proprement.

Néanmoins, les techniques d'extraction de la puissance de ces ressources demandent des recherches et développements plus approfondis visant à fiabiliser, baisser les coûts et d'augmenter l'efficacité énergétique.

Les pays peu pourvus en combustibles fossiles cherchent dans les énergies renouvelables une plus grande autonomie énergétique et d'indépendance politique. Le spectre de l'épuisement des ressources fossiles, l'angoisse du futur les ont fait nommer« *renouvelables* ».

Les énergies renouvelables peuvent être classées en trois grandes familles, l'énergie d'origine mécanique (la houle, éolien), énergie électrique (panneaux photovoltaïques) ou l'énergie sous forme de la chaleur (géothermie, solaire thermique,...etc.) en sachant qu'à la

racine de toutes ces énergies est l'énergie en provenance du soleil transformée ensuite par l'environnement terrestre.

Un état de l'art des énergies renouvelables est présenté dans le premier chapitre. Quelques chiffres montrent l'importance et l'évolution dans le temps de la production de l'énergie renouvelable mondiale.

Parmi les différentes sources identifiables d'énergie renouvelable, deux retiennent l'attention dans cette étude pour leur important potentiel, l'énergie éolienne et l'énergie solaire. Dans le second chapitre on a étudié les deux sources séparément, nous avons présenté un bref aperçu sur les énergies éoliennes et photovoltaïques, leur croissance d'exploitation, leurs principaux avantages et inconvénients et les différents modèles existants.

Considérant leurs caractéristiques saisonnières respectives, ces deux énergies ne se concurrencent pas mais au contraire, elles peuvent se valoriser mutuellement. C'est pourquoi on propose dans le troisième chapitre une série de modèles des systèmes hybrides composés de plusieurs sources d'énergie, qui consiste en l'exploitation optimale de la complémentarité entre elles.

Le but du quatrième chapitre sera la modélisation en vue de la simulation d'un système éolienne–photovoltaïque, quelques résultats de simulation d'une éolienne à vitesse variable reposant sur la machine asynchrone à double alimentation associé à un système photovoltaïque obtenue sous MATLAB-SIMULINK ont présenté.

Enfin, nous colorerons notre mémoire par une conclusion générale suivie de quelques perspectives envisagées dans nos travaux futurs.

I.1. Introduction

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20-30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables [Ger]. Les formes de production d'énergie non renouvelables engendrent une forte pollution environnementale par rejet des gaz à effet de serre [Ami], [Sho], [Slo], qui provoque un changement climatique irréversible ou dans le cas du nucléaire une pollution par radiations de longue durée qui pose le problème, aujourd'hui non résolu, du stockage des déchets radioactifs [Mi].

Comparé aux énergies classiques (fossiles et nucléaires), les énergies renouvelables présentent le double avantage de ne pas être source d'émissions de gaz à effet de serre lors de leur utilisation et de présenter des gisements renouvelables donc inépuisables [Ela]. Ce sont des énergies de flux, par opposition aux énergies dites de stock (gaz, fioul, charbon, uranium, ...etc.) dont les gisements sont limités.

I.2. Énergies renouvelables, définition, ressources et exploitation

Une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. C'est le cas de l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau, de la terre et de la biomasse, à l'échelle de la durée de vie de l'humanité. Ce n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires [Ger].

Les chocs pétroliers successifs depuis les années 70 ont démontré les risques économiques et géopolitiques de la production d'énergie reposant sur l'exploitation des ressources fossiles, dont les réserves sont mal réparties et épuisables [Ger].

De plus, une grande partie du monde ne sera sans doute jamais raccordée aux réseaux électriques dont l'extension s'avère trop coûteuse pour les territoires isolés, peu peuplés ou difficiles d'accès. Actuellement deux milliards et demi d'habitants, principalement dans les zones rurales des pays en développement, ne consomment que 1 % de l'électricité produite dans le monde [Site 1].

La consommation mondiale d'énergie ne cesse de croître (Figure 1-1 données 2000 selon [Mi]) posant des questions cruciales sur l'effet de serre et la diminution des ressources énergétiques.

Bien qu'il existe des scénarios multiples et contrastés, la majorité des prévisionnistes nous indiquent que la consommation d'énergie primaire commerciale devrait environ doubler d'ici 2030, passant de 9 à 18 Gtep et environ tripler d'ici 2050, passant à 25 ou 30 Gtep. Selon ces études les énergies fossiles ne devraient plus représenter en 2050 qu'au mieux les deux tiers de ces consommations contre 85 % actuellement [Pie].

Le développement de l'énergie nucléaire, dont la consommation en France est passée de 1,1 Tep en 1973 à 70,2 Tep en 1997, est freiné aujourd'hui, à juste titre, par des problèmes de sûreté nucléaire (rappelons la catastrophe de Tchernobyl, dont les effets se font ressentir jusqu'à nos jours et ceci même dans des régions situées à des milliers de kilomètres du lieu de la catastrophe), et d'environnement (déchets radioactifs) [Ama]. De plus les réserves en uranium, utilisé pour la fission nucléaire, sont limitées.

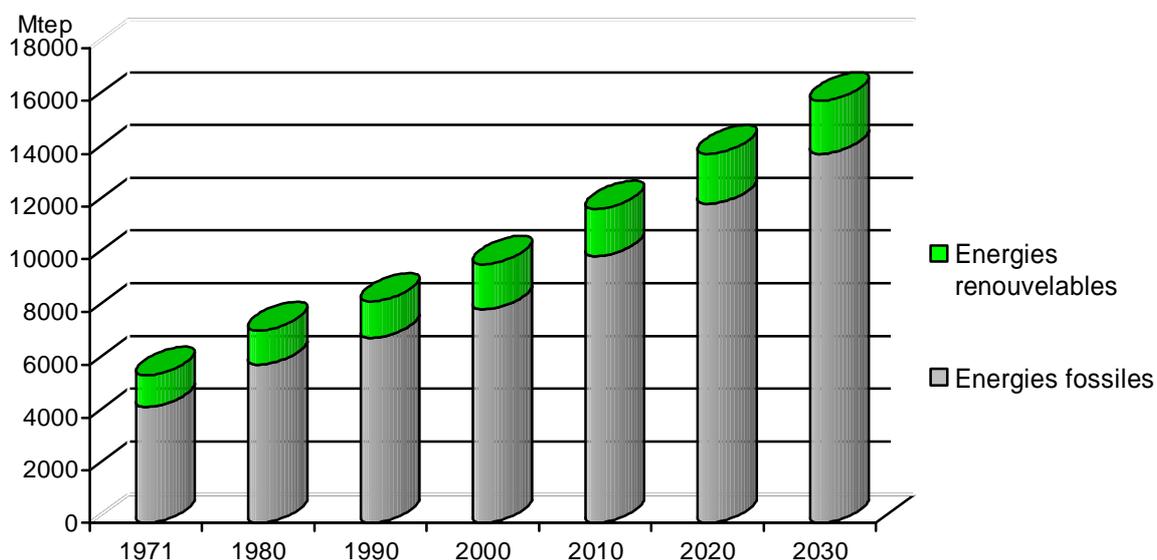
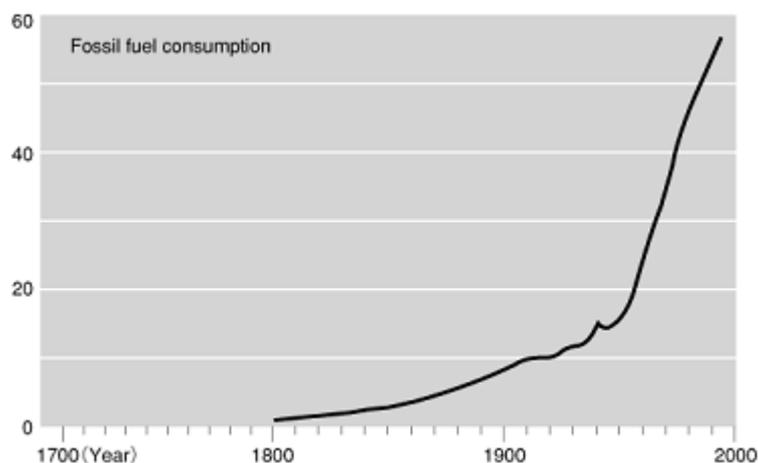


Figure 1-1 Consommation d'énergie primaire dans le monde et prévisions [Mi].

Il ne subsiste aujourd'hui plus beaucoup de doute sur le fait que la combustion massive de combustibles fossiles est responsable d'une très sensible augmentation de l'effet de serre naturel, c'est-à-dire d'un accroissement de la température moyenne à la surface du globe. Une extraordinaire corrélation entre cette consommation de carburants fossiles et la concentration de CO₂ dans l'atmosphère a été montrée (Figure 1-2) et constitue l'une des « preuves » les plus tangibles de l'impact des activités humaines [Mul 2004].



a) Consommation de carburants fossiles C/an (100 millions tons)

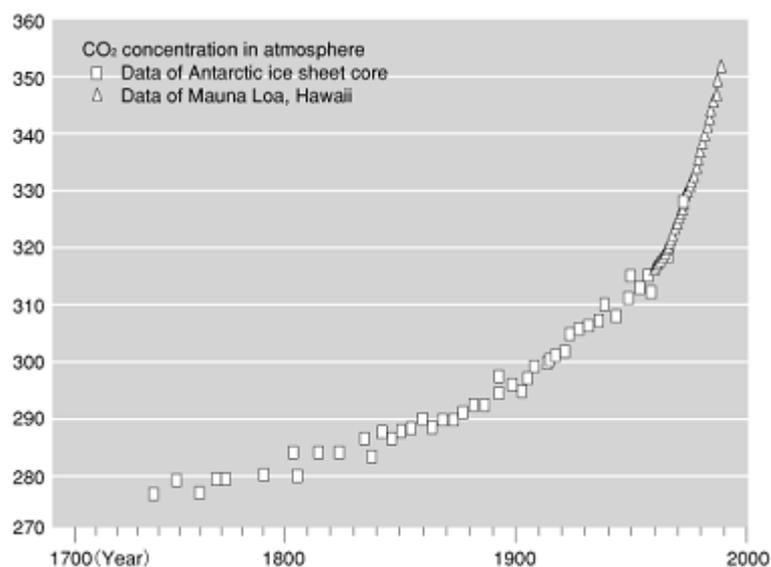
b) Concentration de CO₂

Figure 1-2 Corrélation consommation de carburants fossiles et concentration de CO₂
[Mul 2004].

Une tonne de carbone brûlée génère environ 3,7 tonnes de CO₂. Le CO₂ est responsable d'environ 50% de l'accroissement global de l'effet de serre. En 2002, nous avons renvoyé, dans l'atmosphère, 24 milliards de tonnes de CO₂. En à peine plus de deux siècles, nous aurons renvoyé dans l'atmosphère une quantité de carbone colossale [Mul 2004].

Aujourd'hui, plus de 85% de l'énergie produite est obtenue à partir des matières fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou de l'énergie nucléaire. La Figure 1-3 montre la répartition en termes d'énergie primaire dans le monde pour toutes les ressources actuelles [Mi].

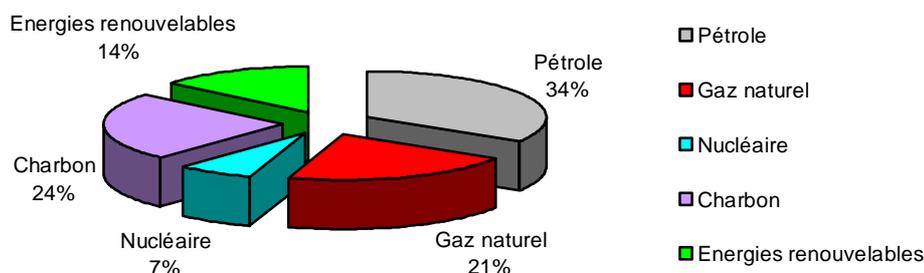


Figure 1-3 Répartition des sources primaires d'énergie dans le monde [Mi].

I.3. Rentabilité économique

Dans le contexte économique actuel, les installations à énergie renouvelable peuvent encore aujourd'hui avoir un coût important (exemple des panneaux solaires photovoltaïques) et sont donc plutôt réservées à des pays développés où elles peuvent dans d'autres cas être assez peu onéreuses (exemple de la combustion de la biomasse) et peuvent être utilisées dans les pays en voie de développement [Site 2]. La mise en œuvre d'une filière d'énergie renouvelable nécessite de faire un bilan économique. La mise en place des permis d'émission de gaz à effet de serre rend ces filières rentables.

Selon l'article de [Sho] et l'article de [Bul], le coût de ces énergies renouvelables est en diminution ces dernières années (Figure 1-4).

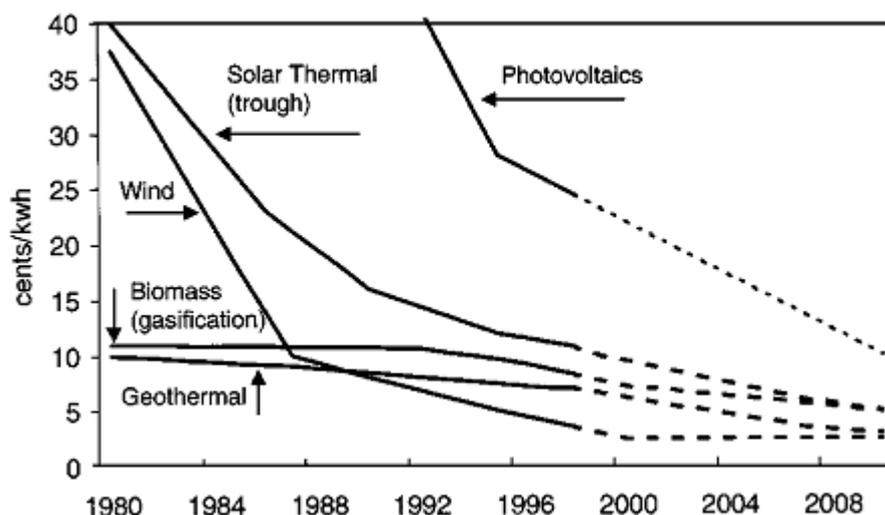


Figure 1-4 Le coût des énergies renouvelables [Bul].

I.4. Les Avantages des énergies renouvelables

Les énergies renouvelables associent des avantages sur le plan environnemental, social, économique, ainsi que géopolitiques :

I.4.1 Avantages sur le plan environnemental

- ∅ L'énergie renouvelable n'est pas limitée par l'épuisement de son gisement [Ram].
- ∅ La production de gaz à effet de serre est le plus souvent nulle [Sho]. Dans le cas de la biomasse, le gaz carbonique produit par la conversion thermochimique (combustion) est normalement compensé par la réabsorption par la flore [Ra].
- ∅ Les déchets produits par un système de production d'énergie renouvelable sont peu nombreux [Bul].

I.4.2 Avantages sur le plan social [Site 2]

- ∅ Les impacts en cas d'accident grave sont plus facilement maîtrisables comparés à ceux de l'industrie électronucléaire ou pétrolière.
- ∅ Les déchets sont peu dangereux.

I.4.3 Avantages sur le plan économique [Site 2]

- ∅ Le coût d'une énergie renouvelable est surtout fixé par l'investissement industriel. Il ne dépend pas des variations des cours du pétrole, du gaz ou des matières premières.

- ∅ Le démantèlement des systèmes de production d'énergie renouvelable est facile, rapide et peu coûteux.

1.4.4 Avantages sur le plan géopolitique

- ∅ Les énergies renouvelables améliorent l'indépendance énergétique [Site 2].

I.5. Les inconvénients des énergies renouvelables

- ∅ L'inconvénient majeur des énergies renouvelables vient de la non régularité des ressources (à l'exception de l'énergie géothermique) [Ela].
- ∅ Bien que la demande socio-politique en énergies renouvelables soit forte, celles-ci souffrent de leur faible concentration. En effet, alors que 100 grammes de carburant suffisent pour fournir 1 kWh, il faut, pour obtenir la même puissance, faire chuter 10 tonnes d'eau de 40 mètres pendant 1 heure, ou récupérer toute l'énergie cinétique de 20 000 m³ d'air (67 tonnes) circulant à 60 km/h pendant 1 heure, ou utiliser la puissance solaire pendant plus d'une heure par m², ou brûler environ 500 g d'écorces pendant une heure [Ra].
- ∅ Les énergies renouvelables consomment de l'espace et entrent en concurrence avec d'autres usages des territoires. On peut installer de 8 à 30 MW/km² en éolien et environ 200 MW/km² en solaire [Ra].
- ∅ L'une des propriétés qui limite l'utilisation de l'énergie renouvelable est lié au fait que la matière première (source de l'énergie) n'est pas transportable dans la majorité des cas contrairement aux sources traditionnelles comme le pétrole ou l'uranium qui est extrait des gisements respectifs et acheminé « sans gros problèmes » vers les distributeurs ou les usines qui peuvent être éloignées de milliers de kilomètres. Par contre, le lieu de « l'extraction » de l'énergie renouvelable est déterminant pour le lieu de transformation [Mi].
- ∅ Aujourd'hui, on assimile souvent le terme d'énergie renouvelable à celui d'énergie propre. Au sens strict et selon [Site 2], la définition est différente : une énergie propre ne produit pas de polluant, ou bien elle produit des polluants qui disparaissent rapidement. Par conséquent, une énergie renouvelable n'est pas nécessairement propre, et inversement. On peut citer le cas de la biomasse. L'énergie issue de la combustion de la biomasse est

propre à condition que la production ne soit pas excessive et permette à la flore de réabsorber tout le dioxyde de carbone dégagé [Ra].

- Ø La construction des installations nécessaires a parfois un impact sur le paysage. On cite souvent les éoliennes [Cam], et dans une moindre mesure les toitures solaires. C'est pourquoi des efforts sont faits pour tenter d'intégrer ces installations dans le paysage (peindre les éoliennes en vert par exemple si toutefois les oiseaux peuvent les distinguer).
- Ø La construction d'un barrage hydroélectrique a des conséquences lourdes : inondation de vallées entières, modification profonde de l'écosystème local [Cam].
- Ø Hormis les carburants issus de la biomasse et la chaleur géothermique qui diffuse régulièrement, les autres ressources renouvelables présentent un inconvénient majeur : leur fluctuation indépendamment de la demande. Que ce soit pour exploiter la chaleur rayonnée par le soleil, l'électricité PV ou éolienne, un stockage d'énergie se révèle indispensable [Mul 2004]. L'énergie solaire et ses dérivés (vent, chute d'eau, etc.) n'est pas disponible à la demande, il est donc nécessaire de compenser, en disposant d'un stockage suffisant, auprès du consommateur, du producteur.

La problématique du stockage s'applique différemment dans les sites isolés et de petites puissances où il est parfaitement envisageable, voire impératif d'associer un élément de stockage de type accumulateur électrochimique ou volant d'inertie [Mi]. Selon l'article de [Mul 2004], les solutions d'accumulateur ne manquent pas, mais elles sont toutes coûteuses.

I.6. L'avenir des énergies renouvelables

La fin du 20^{ème} siècle aura été la période de redécouverte de ces énergies ancestrales grâce à de nouvelles technologies de mise en œuvre, et nous sommes encore dans la phase initiale de ce phénomène.

Le fait de se situer en ce moment dans une telle phase est peu propice à une bonne évaluation du potentiel de ces énergies au cours du demi-siècle à venir. En effet dans la phase actuelle de redécollage de ces énergies on peut observer des taux de croissance très élevés, de 20 ou même 30 % par an, sur certaines filières tels le solaire photovoltaïque, l'énergie éolienne ou les biocarburants.

Les énergies renouvelables aujourd'hui requièrent des efforts de recherches, ces efforts pour être efficaces doivent relever d'une logique très décentralisée et irriguer une multitude de petites équipes. Il ne s'agit donc pas, si on veut être efficace, de crédits massifs venant se déverser sur ce secteur, ce ne sont pas les laboratoires de recherche, ni les entreprises qu'il convient de subventionner, mais pour un temps le prix des énergies qu'elles fourniront sur les marchés [Pie].

I.7. Les principales sources d'énergies renouvelables et leur potentiel de développement

Les énergies renouvelables peuvent permettre de produire soit de la chaleur seule : eau chaude pour le chauffage ou la production d'eau chaude sanitaire (géothermie, bois énergie, solaire, biogaz utilisé en chaudière), soit de l'électricité seule (éolien, biogaz utilisé dans des moteurs, solaire photovoltaïque, hydroélectricité, ...etc.).

I.7.1. La production de chaleur par les sources renouvelables

Une grande partie de l'énergie consommée par l'humanité est sous la forme de chaleur (chauffage, procédés industriels...etc.). Cette énergie est majoritairement obtenue par la transformation de l'électricité en provenance du nucléaire, gaz ou du pétrole [Mi]. Il existe des moyens de remplacer ces sources conventionnelles par des sources renouvelables.

I.7.1.1 Thermo solaire

Une des façons de profiter directement de l'énergie des photons émis par le soleil est le chauffage direct des capteurs thermiques. La solaire thermique basse température permet essentiellement le chauffage de l'eau sanitaire. Cette application de l'énergie solaire, industrialisée depuis plus de 25 ans, est actuellement en phase de croissance accélérée aux Etats-Unis, au Japon et en Europe.

En Europe, plus de 600 000 familles ont équipé leur habitation d'un chauffe-eau solaire, la croissance est rapide. L'Allemagne, la Grèce et l'Autriche ont beaucoup développé cette application et possèdent l'essentiel de la surface de capteurs solaires installée dans l'Union Européenne (plus de 75 %).

En France, des dizaines de milliers de chauffe-eau solaires individuels sont installés avec plus de 20 000 chauffe-eau installés [Ger].

Le grand inconvénient est l'impossibilité de transporter l'énergie ainsi captée à grande distance. Cette source est donc à utilisation locale (principalement chauffage individuel, piscines). En 2003 environ 14000 m² de capteurs de ce type ont été en utilisation en Union Européenne avec une croissance annuelle de 22% [Mi].

1.7.1.2 Géothermie

La géothermie est la seule source d'énergie dont l'énergie ne provient pas du soleil, mais des processus de désintégration à l'intérieur de la croûte terrestre. A part cela il existe également la géothermie volcanique.

Le principe consiste à extraire l'énergie contenue dans le sol [Mi]. La température croît depuis la surface vers le centre de la Terre. Selon les régions géographiques, l'augmentation de la température avec la profondeur est plus ou moins forte, et varie de 3 °C par 100 m en moyenne jusqu'à 15°C ou même 30°C [Mi]. La chaleur produite sert dans la plupart des cas à la production d'eau chaude sanitaire et au chauffage de bâtiments [Mul 2004].

Quatre types de géothermie existent selon la température de gisement [Mi]:

- Ø La haute (>180°C).
- Ø Moyenne (>100°C).
- Ø Basse (>30°C).
- Ø Très basse énergie (<30°C).

Les deux premiers types favorisent la production de l'énergie électrique. La géothermie basse énergie permet de couvrir une large gamme d'usages : chauffage urbain, chauffage de serres, utilisation de chaleur dans les processus industriels...etc. La géothermie très basse énergie nécessite l'utilisation des pompes à chaleur et donc une installation particulière [Mi].

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques. C'est donc une énergie fiable et disponible dans le temps. Cependant, il ne s'agit pas d'une énergie entièrement inépuisable dans le sens où un puits verra un jour son réservoir calorifique diminuer. Si les installations géothermiques sont technologiquement au point et que l'énergie qu'elles prélèvent est gratuite, leur coût demeure, dans certains cas, très élevé [Mi].

I.7.1.3 Biomasse

La biomasse désigne toute la matière vivante d'origine végétale ou animale de la surface terrestre. Généralement, les dérivés ou déchets sont également classés dans la biomasse, différents types sont à considérer : le bois – énergie, les biocarburants, le biogaz. Le bois énergie est une ressource très abondante. C'est la ressource la plus utilisée au monde. En Europe, c'est 51% de la part de l'énergie renouvelable qui appartient à ce mode de production d'énergie. Elle se concentre sur l'utilisation destinée au chauffage.

L'Union européenne projette d'atteindre une production de 17 millions de tonnes de biocarburant par an en 2010 par rapport au million produit actuellement. La principale motivation qui pousse à la production du biogaz est environnementale. Quelle que soit l'origine, le biogaz non valorisé contribue, du fait de ses fortes teneurs en méthane, à l'effet de serre, mais c'est le bilan global du cycle qui doit être considéré. Il peut être utilisé comme source brute ou après le processus d'épuration injecté dans les réseaux de distribution.

Longtemps le biogaz ne servait qu'à la production de la chaleur. De nos jours la filière carburant ainsi que la génération de l'électricité est en pleine expansion. En 1993, 6 millions de m³ ont été utilisés dans le monde. L'utilisation du biogaz n'est pas encore à son maximum, une croissance de cette technologie est donc à prévoir [Mi].

I.7.2. La production d'électricité par les énergies renouvelables

Une autre famille d'énergies renouvelables est celle où l'énergie produite est directement sous la forme électrique. A l'aide des panneaux solaires ou de génératrices hydrauliques et éoliennes, la puissance électrique peut être récupérée et immédiatement utilisée par un récepteur ou bien transportée vers les réseaux de distribution. Nous donnons ici une description sommaire de chaque ressource énergétique et la façon de produire l'énergie électrique [Mi].

La production d'électricité consomme actuellement environ le tiers de l'énergie primaire mondiale et la part des énergies renouvelables n'est que de 14% environ en 1998 [Mul]. Il apparaît donc de façon flagrante que l'électricité, bien qu'énergie finale propre par excellence, contribue très largement à la dégradation de l'environnement ainsi qu'à l'épuisement de ressources non renouvelables (combustibles fossiles et uranium) [Mul]. C'est pourquoi, l'une des mesures pour préparer un développement réellement durable consiste à accroître la part des ressources renouvelables pour la production d'électricité. Le taux de croissance mondial de la production d'électricité est de 2,4% /an [Mul 2004].

La Figure 1-5 montre la courbe de croissance de la production mondiale d'électricité avec une prévision jusqu'en 2020.

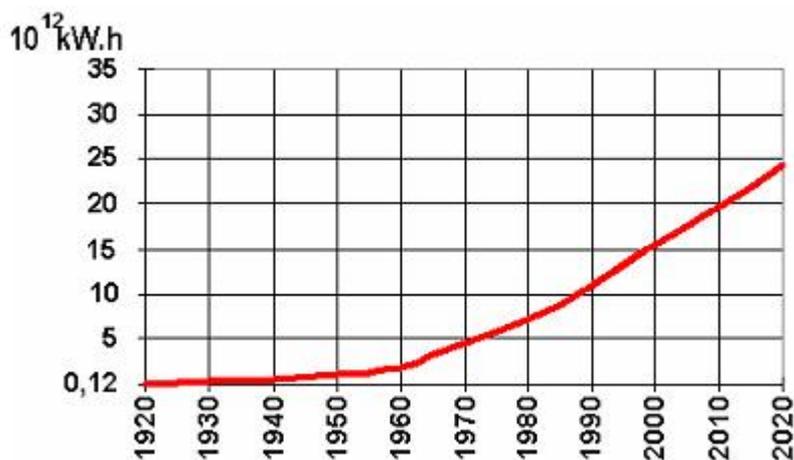


Figure 1-5 Evolution et prévision de la production mondiale d'énergie électrique (10¹² kWh = 1000 TWh) [Mul 2004].

Actuellement presque 98% de l'électricité aux Etats-Unis est produit de ressources fossiles (charbon 52%, 20% nucléaire, 16% gaz naturel, et 3% huile) et de l'hydro-électricité (7%), 2% restant est produit des ressources renouvelables [Hal].

Toutes les ressources renouvelables sont en forte croissance [Kot]. La Figure 1-6 donne la vue sur la répartition de la production d'électricité entre les différentes sources renouvelables ainsi que leurs prévisions pour les années à venir [Mi].

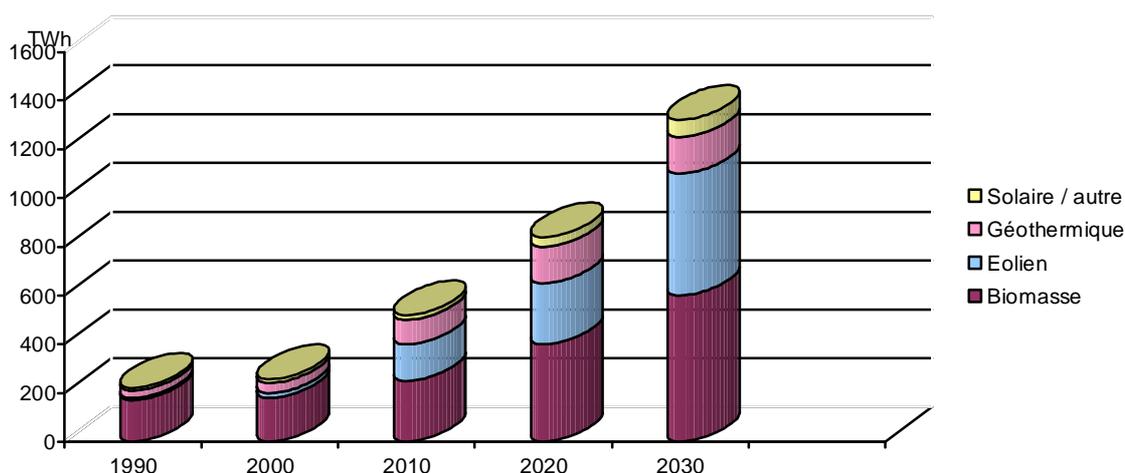


Figure 1-6 Production mondiale de l'électricité basée sur les énergies renouvelables [Mi].

Parmi toutes les sources de production d'électricité, celle d'origine éolienne subit de très loin le plus fort taux de croissance depuis plus de 10 ans [Mul 2004]. De 2000 à 2001, le taux de croissance mondial de la puissance éolienne installée a été de plus de 40%. Le Tableau (1-1) montre le classement des pays dans la production d'énergie renouvelable électrique en 2000 (ce classement illustre la quantité d'énergie produite, pas la part d'énergie renouvelable dans la consommation nationale) [Site 2].

| | HYDROELECTRIQUE | GEO THERMIQUE | ÉOLIEN | SOLAIRE |
|----|------------------------|----------------------|---------------|----------------|
| 1. | Canada | États-Unis | Allemagne | Japon |
| 2. | États-Unis | Philippines | Etats-Unis | Allemagne |
| 3. | Brésil | Italie | Espagne | États-Unis |
| 4. | Chine | Mexique | Danemark | Inde |
| 5. | Russie | Indonésie | Inde | Australie |

Tableau 1-1 Classement des pays dans la production d'énergie renouvelable électrique en 2000 [Site 2].

1.7.2.1 Hydraulique

L'hydroélectricité, c'est-à-dire la production d'électricité à partir de la force de l'eau, est apparue au milieu du XIXe siècle dans la continuité des moulins qui exploitaient directement la force motrice de l'eau. Appelée la "houille blanche", elle a été synonyme d'un développement économique très important [Ger].

Cette source représentait en 1998 environ 20% de la production mondiale de l'énergie électrique. Certains pays (dont la France) sont déjà « saturés » en sites hydroélectriques exploitables et ne peuvent pratiquement plus progresser dans ce domaine. Les sites de petite puissance (inférieures à 10 kW) sont des solutions très prisées dans les applications aux petits réseaux isolés. Une forte stabilité de la source ainsi que les dimensions réduites de ces sites de production sont un grand avantage [Ra].

En Europe, en 1999, on comptait environ 10000 MW de puissance hydraulique installée. A l'horizon 2100, cette puissance devrait passer à plus de 13000 MW [Ra].

1.7.2.2 Énergie de la mer

L'énergie des vagues est encore une fois une forme particulière de l'énergie solaire. Le soleil chauffe inégalement les différentes couches atmosphériques ce qui entraîne des vents eux-mêmes responsables par frottement des mouvements qui animent la surface de la mer (courants, houle, vagues). Les vagues créées par le vent à la surface des mers et des océans transportent de l'énergie. Lorsqu'elles arrivent sur un obstacle elles cèdent une partie de cette énergie qui peut être transformée en énergie électrique.

L'énergie en provenance du mouvement des eaux de la mer est une énergie très difficilement récupérable bien qu'elle représente un potentiel immense. Les investissements sont très lourds dans un environnement hostile et imprévisible. Cette énergie est à exploiter dans l'avenir et ne représente qu'une toute petite quantité de l'énergie produite à ce jour par rapport aux autres ressources exploitées [Mi].

1.7. 2.3 Photovoltaïque

Le rayonnement solaire représente une ressource renouvelable d'énergie énorme, de loin la plus importante. L'énergie reçue à la surface de la terre varie, par m², de 1100 kWh à 52300 kWh/an [Ger].

L'effet photovoltaïque permet de transformer directement la lumière solaire en énergie électrique. La production d'électricité par générateur photovoltaïque est liée à l'intensité, à la durée de l'ensoleillement et à l'orientation du panneau par rapport au soleil. Pour l'instant, la production photovoltaïque est plutôt réservée à l'alimentation en site isolé d'équipements et d'habitations où le coût élevé du raccordement au réseau la rend compétitive [Ger].

Malgré le fait que depuis les premières mises en œuvre, les prix ont chuté d'un facteur 100, il faut un ensoleillement important pour arriver à un coût encore insuffisamment compétitif du kWh. C'est pourquoi pour l'instant, la production photovoltaïque est plutôt réservée à l'alimentation en site isolé d'équipements et d'habitations où le coût élevé du raccordement au réseau la rend compétitive [Ger].

Des progrès technologiques sont en cours pour rendre l'énergie photovoltaïque plus compétitive. En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules et de leurs associations, le rendement des systèmes photovoltaïques peut être augmenté par les solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale (techniques dites MPPT) [Mi].

Plusieurs travaux intéressants à ce sujet ont été publiés [Alt], [Sny], [Xia], [Mut], [Sun], [Liu], [Jai], [Miy], [Ahn]. Cette dernière caractéristique est assez commune avec la production d'énergie éolienne. Selon l'article de [Bul]. Le coût de l'énergie photovoltaïque est en forte diminution, se coût est diminué de plus que 50\$/W en 1980, à l'environ de 5\$/W en 2001 comme le montre la Figure (1-4). L'article [Mar] décrit la méthodologie pour calculer le coût de production d'un système photovoltaïque.

Les panneaux solaires sont très pratiques. L'intégration dans les bâtiments est facile et devient même esthétique, pour les sites isolés et dispersés qui demandent peu d'énergie, c'est une solution idéale (télécommunication, balises maritimes...etc.).

La technique photovoltaïque malgré sa complexité est aussi en très forte croissance. En 2001, en Europe on comptait environ 250 MW installés et en 2003 ce chiffre est monté jusqu'au 560 MW de puissance installée [Mi]. L'industrie photovoltaïque des États-Unis a montré des taux de croissance annuels de 20 à 30% [Hal]. La Figure 1-7 montre l'évolution mondiale de cette ressource qui est en très nette progression depuis le début du siècle.

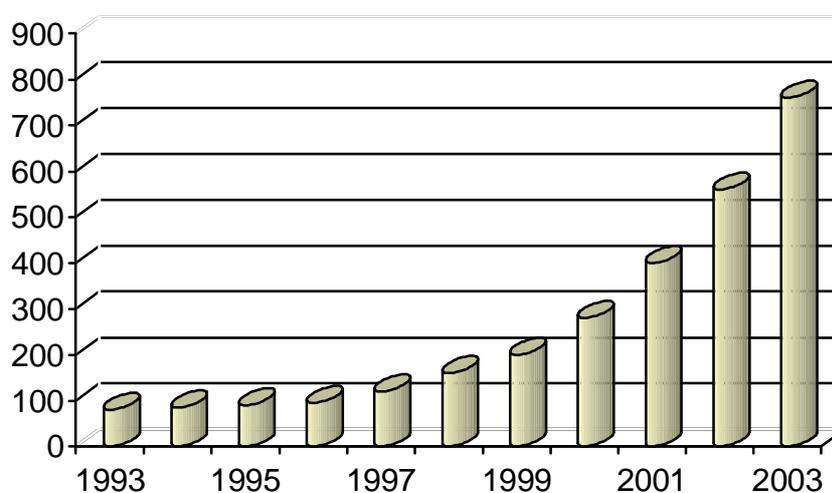


Figure 1-7 Evolution de la production mondiale de cellules photovoltaïques en MW [Mi].

1.7.2.4 Production éolienne

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée

depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers.

Dans l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an. En Europe, principalement sous l'impulsion Allemande, Scandinave et Espagnole, on comptait en 2000 environ 15000 MW de puissance installée. Ce chiffre a presque doublé en 2003, soit environ 27000 MW pour 40000MW de puissance éolienne installée dans le monde.

En prévision, pour l'année 2010, on peut espérer une puissance éolienne installée en Europe de l'ordre 70000 MW [Mi].

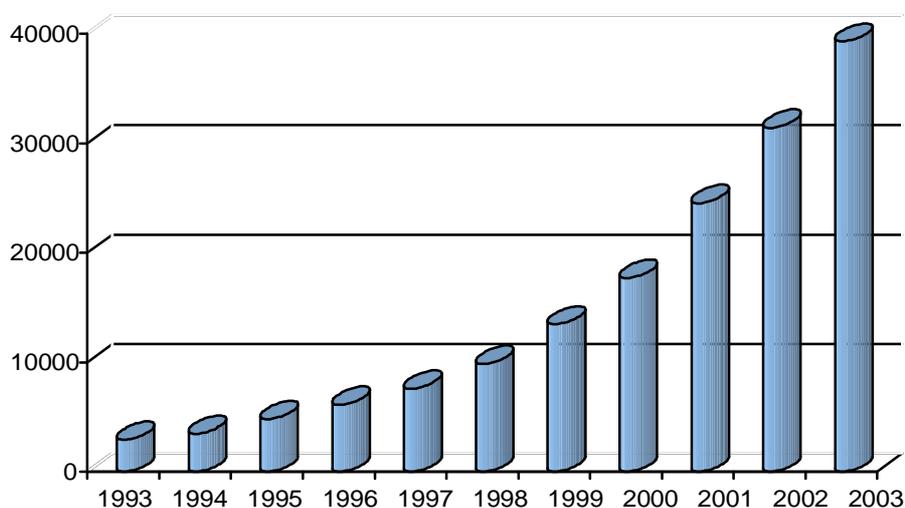


Figure 1-8 Puissance éolienne cumulée dans le monde en MW [Mi].

I.8. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de présenter une brève description du domaine des énergies renouvelables existantes tant pour la production de chaleur que d'électricité. On a cité les principales sources d'énergies renouvelables et leur potentiel de développement. On a vu que la production d'énergie basée sur les énergies renouvelables constitue un excellent moyen de protéger l'environnement et d'acquiescer une sécurité à long terme sur le plan énergétique.

Dans ce qui suit nous nous intéresserons seulement à la production d'électricité par l'énergie éolienne et photovoltaïque car il nous semble que le vent et le soleil sont les ressources les mieux partagées et donc celles qui se prêtent le mieux à la production décentralisée d'électricité.

II.1. Introduction

Les technologies des énergies renouvelables: solaires et éoliennes, deviennent de plus en plus compétitives au point de vue économique et leur utilisation dans les sites isolés non raccordés au réseau prend de plus en plus d'importance dans toutes les parties du globe.

Après avoir présenté les différentes sources d'énergies renouvelables existantes, nous focalisons notre attention sur la production d'électricité éolienne et photovoltaïque. Ainsi les différentes solutions technologiques permettant d'exploiter les ressources solaire et éolienne sont présentées.

II.2. Conversion de l'énergie éolienne

Parmi toutes les énergies renouvelables contribuant à la production d'électricité, l'énergie éolienne tient actuellement le rôle de vedette. Elle est l'une des plus prometteuses, en termes d'écologie, de compétitivité, de champ d'application et de création d'emplois et de richesses. Son potentiel est énorme, il est estimé à 30.10^{15} kWh pour l'ensemble du globe et entre 5 et 50.10^{12} kWh /an pour la part terrestre exploitable. En France, on estime les ressources éoliennes exploitables annuellement à environ 70.10^8 kWh terrestres et 500.10^9 kWh en offshore soit plus que la consommation intérieure actuelle d'électricité (environ 400.10^8 kWh) [Ger].

Un nombre croissant de pays adhère au Protocole de Kyoto élaboré en 1997, et l'énergie éolienne est devenue l'un des moyens les plus efficaces d'atteindre les objectifs qui y sont énoncés. Selon l'organisme américain « Energy Information Administration », la consommation mondiale d'électricité, qui était de 12 833 TWh en 1999, passera à 22 230 TWh en 2020. Cette hausse sera principalement attribuable aux pays en développement, où deux milliards de personnes sont encore privées d'électricité [Cha].

L'association européenne de l'énergie éolienne (EWEA) et Greenpeace ont présenté une étude visant à promouvoir le développement de la filière éolienne et proposent un scénario pour produire 12 % de l'énergie électrique mondiale à partir du vent en 2020 [Fic].

Le Tableau 2-1 montre le nombre d'emplois que permettrait de créer l'utilisation de l'énergie éolienne par rapport aux autres technologies utilisées pour produire de l'électricité [Cha].

| TECHNOLOGIE | EMPLOIS /TWH /ANNEE |
|----------------|---------------------|
| Nucléaire | 100 |
| Géothermique | 112 |
| Charbon | 16 |
| Thermo solaire | 248 |
| Éolienne | 542 |

Tableau 2-1 Création directe d'emplois [Cha].

II.2.1 Croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne

L'exploitation de l'énergie éolienne pour produire de l'électricité a eu des hauts et des bas. Les causes de ces fluctuations sont diverses : guerres, crises d'autre types d'énergie, volonté de préserver l'environnement, évolution de la technologie, changement de politique énergétique ... etc. [Cam].

C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité [Poi]. L'intérêt pour l'exploitation de l'énergie éolienne à grande échelle déclina à la fin de la 2^{ème} guerre mondiale [Cam].

C'est avec la crise pétrolière des années 70 que cet intérêt ressurgit. Ainsi plusieurs pays commencèrent à investir de l'argent pour notamment améliorer la technologie des aérogénérateurs, ce qui donna naissance aux aérogénérateurs modernes.

Le premier marché véritablement significatif fut celui de la Californie, entre 1980 et 1986, où l'industrie de l'énergie éolienne peut se développer. Ensuite les aides financières diminuèrent aux Etats unis mais augmentèrent en Europe. Ce qui permit un développement important de cette industrie dans les pays tels que l'Allemagne et le Danemark. Le marché mondial passa de 200 MW/an en 1990 à 5500MW/an en 2001 [Cam].

La production d'énergie éolienne a connu une croissance extraordinaire au cours de la dernière décennie [Swi]. L'éolien a eu une croissance moyenne annuelle de 40% ces 5 dernières années. Ce développement s'est surtout exprimé en Europe. La Figure 2-1 montre l'installation mondiale de l'énergie éolienne depuis les années 1980 [Sho].

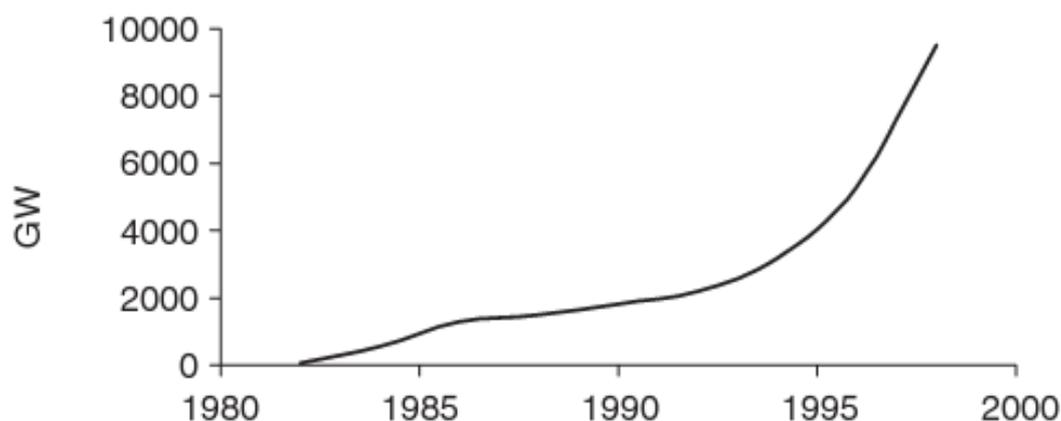


Figure 2-1 L'installation mondiale de l'énergie éolienne [Sho].

Cette progression est énorme par rapport à d'autres types d'énergie plus traditionnelles, telle que l'énergie nucléaire avec une croissance de 1% ou le charbon qui n'a pas du tout augmenté dans les années 90 [Cam].

II.2.2 Situation industrielle et économique

En 2004, la filière éolienne est en évolution rapide avec l'implantation de nouvelles fermes éoliennes alors qu'elle est de 15 000 MW en Allemagne, de 5 000 MW en Espagne et de 3 000 MW au Danemark.

La puissance installée globale dans le monde est d'environ 36 000 MW dont 42 % en Allemagne, 18 % en Espagne, 17,5 % aux Etats-Unis, 9 % au Danemark et moins de 3 % en Chine, aux Pays-Bas, en Italie...etc., et 1 % pour la France.

Si le gisement éolien français est considérable, les puissances installées sont cependant très en retrait par rapport à celles des autres pays européens.

En raison des récentes directives européennes et de tarifs d'achat incitatifs, la production d'électricité d'origine éolienne a connu un rythme de progression très élevé en Europe. La capacité européenne représente maintenant 72,3 % de la puissance éolienne mondiale installée (47 317MW à la fin 2004) [Ra].

Les pays en développement disposent pour certains d'un potentiel éolien significatif dont le développement reste néanmoins soumis à la concurrence des autres sources d'énergie et au caractère plus ou moins incitatif des financements accessibles [Ra].

Les perspectives sont tout aussi spectaculaires. L'EWEA (European Wind Energy Association) estime que 12% de l'électricité mondiale sera d'origine éolienne en 2020 et plus de 20% en 2040 [Ra].

Le coût de l'énergie éolienne est en baisse constante depuis plusieurs années. Ce prix dépend de nombreux facteurs et diffère d'un pays à l'autre, et d'un site à l'autre puisque la vitesse du vent est un des facteurs de plus d'importance (la puissance produite par une éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent). Malgré tout, on peut dire que le coût de cette énergie a été divisé par deux ces 10 dernières années. Parmi les facteurs ayant provoqué cette baisse, on peut citer la baisse des prix des aérogénérateurs, l'augmentation de la rentabilité et de la disponibilité et la baisse des coûts de maintenance. Avec la tendance vers des turbines toujours plus grande, la baisse des coûts d'infrastructure que cela entraîne et les réductions du coût des matériaux, le prix de l'énergie éolienne continue à diminuer régulièrement. Il faut de plus noter qu'en prenant en compte le coût correspondant à la pollution produite par les différentes sources d'énergie, le coût de l'énergie éolienne est encore plus compétitif [Cam].

II.2.3. Avantages et désavantages de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des désavantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

II.2.3.1 Les avantages

- Ø L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, écologique, fiable, économique, et inépuisable, c'est une énergie qui respecte l'environnement [Smi], [Site 5], [Ham], [Ram].
- Ø Bien que ne pouvoir envisager de remplacer totalement les sources traditionnelles d'énergie, l'énergie éolienne peut toutefois proposer une alternative intéressante et renouvelable. Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de CO₂ [Tec]. Chaque mégawatheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO₂ rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique [Site 6].
- Ø L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs [Cam], [Site 6].

- Ø L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires [Cam].
- Ø Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace [Site 6].
- Ø C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales [Site 6].
- Ø La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à de nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles [Cha].
- Ø C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables [Ram 2002], selon l'article [Swi] le coût de l'éolienne a diminué presque 90% depuis le début des années 80. Le coût de l'énergie éolienne continue de diminuer grâce aux percées technologiques, à l'accroissement du niveau de production et à l'utilisation de grandes turbines [Cha].
- Ø Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Car elle répond au besoin énergétique de ces pays. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique déjà existant [Cam].
- Ø L'énergie éolienne se révèle une excellente ressource d'appoint d'autres énergies, notamment durant les pics de consommation, en hiver par exemple [Site 6].

II.2.3.2 Les désavantages

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages :

- Ø L'impact visuel : Ca reste néanmoins un thème subjectif [Cam].
- Ø Les bruits mécaniques ou aérodynamiques [Cha].
- Ø Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux [Site 6].
- Ø La source d'énergie éolienne étant stochastique [Ram 2002], la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne.
- Ø Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes utilisant

des sources d'énergie classiques, comme les groupes électrogènes à essence, mais à long terme, ils constituent une source d'énergie économique et ils demandent peu d'entretien [Site 5].

Il a fallu plusieurs décennies pour réaliser des éoliennes silencieuses, esthétiques et résistantes aux conditions météorologiques très capricieuses [Mul 2004].

II.2.4. Descriptif d'une éolienne

Une éolienne est constituée par une tour au sommet de laquelle se trouve la nacelle. Etant donné que la vitesse du vent augmente lorsque l'on s'éloigne du sol, une tour peut mesurer entre 50 et 80 m de haut. Typiquement une éolienne de 1 MW a une hauteur de 80 mètres, la tour a la forme d'un tronc en cône où, à l'intérieur, sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, les appareillages de connexion au réseau de distribution ainsi que l'échelle d'accès à la nacelle regroupe tout le système de transformation de l'énergie éolienne en énergie électrique et divers actionneurs de commande [Ela].

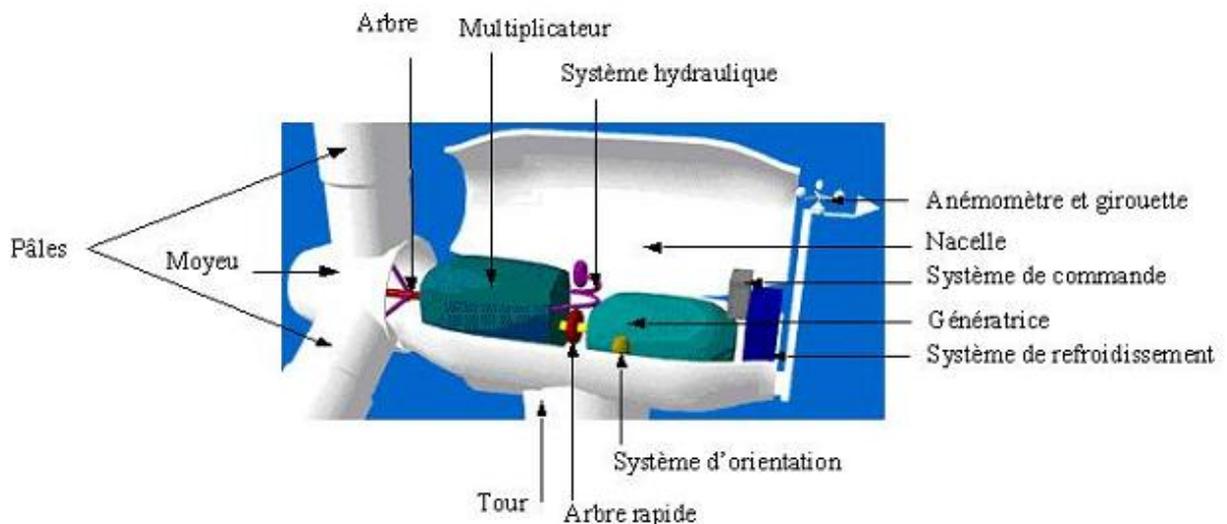


Figure 2-2 éléments constituant une éolienne [Ela].

II.2.5. Principaux composants d'une éolienne

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

II.2.5.1 La tour

Son rôle est d'une part de supporter l'ensemble « rotor plus nacelle » pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, de manière à sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi la captation de l'énergie. Certains constructeurs proposent ainsi différentes hauteurs de tour pour un même ensemble « rotor plus nacelle » de manière à s'adapter au mieux à différents sites d'implantation [Tec].

II.2.5.2 La nacelle

Regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, multiplicateur. Le frein qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau [Poi]. [Tec] présente les différents composants d'une nacelle :

- Ø Le multiplicateur de vitesse : il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique.
- Ø L'arbre secondaire comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.
- Ø La génératrice : c'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.
- Ø Un contrôleur électronique chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble « rotor plus nacelle » face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle.

II.2.5.3 Le rotor

Formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre des pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire.

Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées [Poi].

II.2.6. Différents technologies d'éoliennes

Il existe essentiellement deux technologies d'éoliennes, celles dont la vitesse est constante et celles dont la vitesse variable. Les avantages principaux des deux types de fonctionnement sont les suivants :

II.2.6.1. Fonctionnement à vitesse fixe

II.2.6.1.a Les avantages de la vitesse fixe

- Ø Simplicité d'implantation [Ela], [Cam].
- Ø Plus grande fiabilité [Ela].
- Ø Pas besoin de système électronique de commande [Cam].
- Ø Moins cher [Ela].

II.2.6.1.b L'inconvénient de la vitesse fixe

- Ø En vitesse fixe le maximum théorique de puissance n'est pas atteint [Mac].

II.2.6.2. Fonctionnement à vitesse variable

II.2.6.2.a Les avantages de la vitesse variable

- Ø Une meilleure exploitation de l'énergie du vent [Ela].
- Ø La réduction des oscillations du couple et des efforts mécaniques [Ela].
- Ø Il est possible d'augmenter la vitesse de rotation du rotor lors de rafales, tout en stockant

l'énergie supplémentaire en forme d'énergie rotative jusqu'à la fin de la rafale. Cela requiert évidemment un système de contrôle très intelligent qui est en mesure de distinguer entre une vraie rafale et simplement des vitesses élevées du vent. De cette manière, on arrive à réduire le couple maximal [Naq1988].

II.2.6.2.b Les inconvénients de la vitesse variable

- ∅ L'inconvénient principal du raccordement indirect au réseau est son coût [Site7].
- ∅ Convertisseur de puissance « complexe » [Mac].
- ∅ Perte énergétique lors du processus de conversion CA-CC-CA [Site7].

II.2.7. L'intérêt de la vitesse variable

La caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse est représentée sur la Figure 2-3.

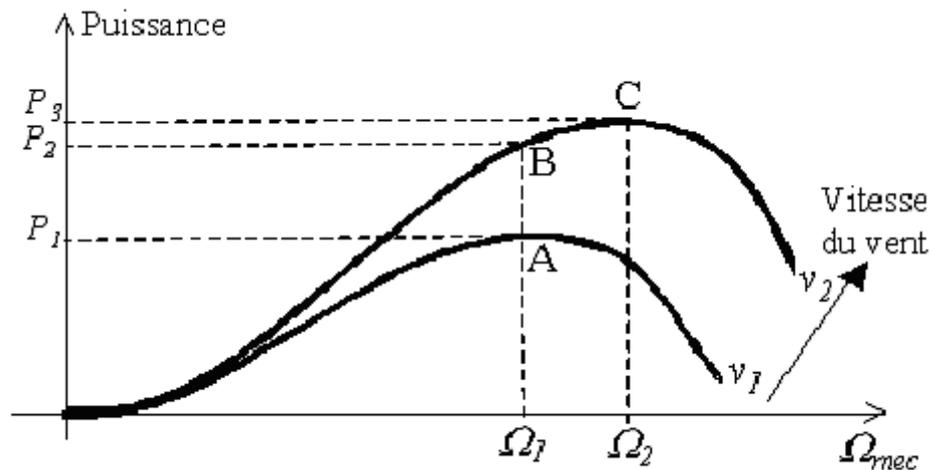


Figure 2-3 Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent [Ela].

Pour une vitesse de vent v_1 et une vitesse mécanique de la génératrice Ω_1 , on obtient une puissance nominale P_1 (point A). Si la vitesse du vent passe de v_1 à v_2 , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance P_2 se trouve sur la 2^{ème} caractéristique (point B). La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la

génératrice à une vitesse supérieure Ω_2 . Il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée [Ela].

L'intérêt de la vitesse variable est montré par A.Miller dans [Mil], il propose un contrôle avec la machine asynchrone, le contrôle utilise des convertisseurs standard. Les simulations montrent que l'ondulation de la puissance électrique est sensiblement réduite et que le fonctionnement est stable lorsque la vitesse du vent varie. Ce contrôle montre une augmentation de l'énergie total généré, avec la comparaison d'autres systèmes à vitesse fixe.

Au vu de la caractéristique suivante (Figure 2-4), il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe, les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités.

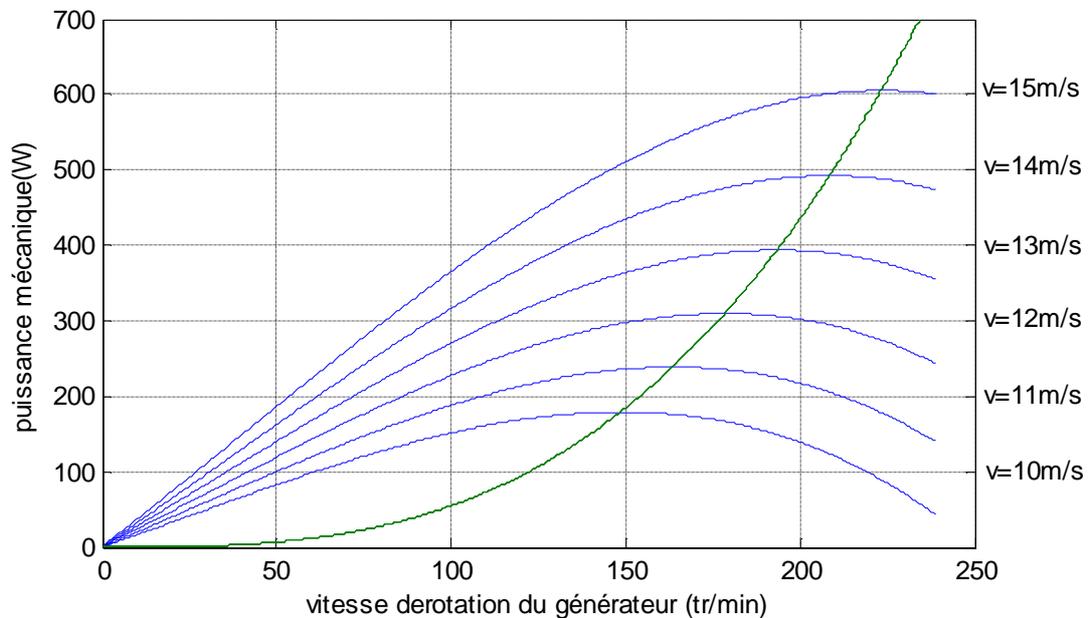


Figure 2-4 Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné.

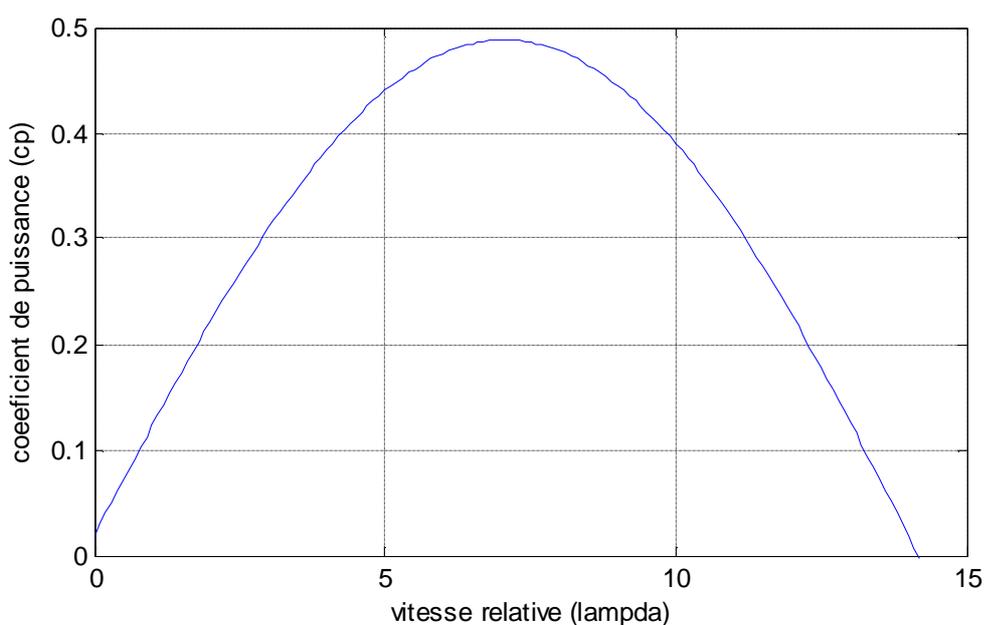
II.2.8. Différents types d'aérogénérateurs

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. Deux familles de voilures existent : les aérogénérateurs à axe vertical (VAWT) et à axe horizontal (HAWT), le Tableau 2-2 présente une classification des turbines éoliennes.

| ECHELLE | DIMÉTRE DE L'HÉLICE | PUISSANCE DELIVRÉE |
|---------|---------------------|--------------------|
| Petite | Moins de 12 m | Moins de 40 KW |
| Moyenne | 12 m à 45 m | De 40 KW à 1 MW |
| Grande | 46 m et plus | 1 MW et plus |

Tableau 2-2 Classification des turbines éoliennes [Iva].

Le graphique de la Figure 2-5 donne une vue sur les coefficients de puissance C_p en fonction de la vitesse réduite.

Figure 2-5 Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine (λ).

II.2.8.1 Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. Selon [Site 8] Les avantages théoriques d'une machine à axe vertical sont les suivants :

- Ø Elle vous permet de placer la génératrice, le multiplicateur...etc. à terre.
- Ø Un mécanisme d'orientation n'est pas nécessaire pour orienter le rotor dans la direction du vent.

Les inconvénients principaux sont les suivants :

- Ø L'efficacité globale des éoliennes à axe vertical n'est pas impressionnante.
- Ø L'éolienne ne démarre pas automatiquement. Cependant, ceci ne constitue qu'un inconvénient mineur dans le cas d'une éolienne raccordée au réseau, étant donné qu'il est alors possible d'utiliser la génératrice comme un moteur absorbant du courant du réseau pour démarrer l'éolienne).

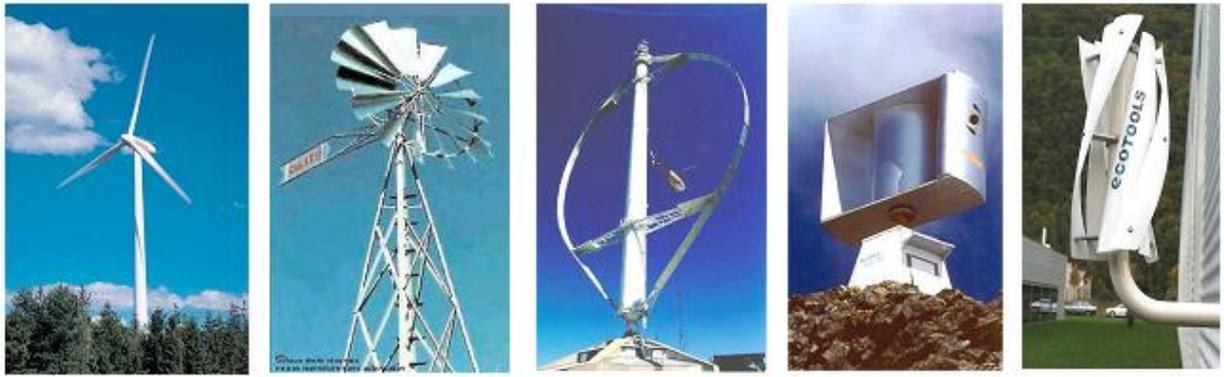
Des 1988 Naqra et Dubé [Naq 1988] étudient le cas des turbines pour les éoliennes à axe vertical associés à des machines à rotor bobiné. Les simulations montrent que l'ondulation de la puissance électrique est sensiblement réduite et que le fonctionnement est stable lorsque la vitesse du vent varie.

II.2. 8. 2 Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien.

Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical en réalisant des études multicritères [Poi].

Aujourd'hui, pratiquement les seules éoliennes commerciales sont à axe horizontales. Les éoliennes à axe vertical ont été prometteuses dans les années 80 et au début des années 90, mais leur faible rendement aérodynamique ainsi que les fluctuations élevées de la puissance électrique générée les ont écartées du marché [Cam].



a) Eoliennes à axe horizontal

b) Eoliennes à axe vertical

Figure 2-6 Technologies d'éoliennes [Ger].

II.2.9. Caractéristique puissance - vitesse d'éoliennes de grande puissance

La caractéristique puissance-vitesse d'une éolienne peut se décomposer en trois zones (Figure 2-7).

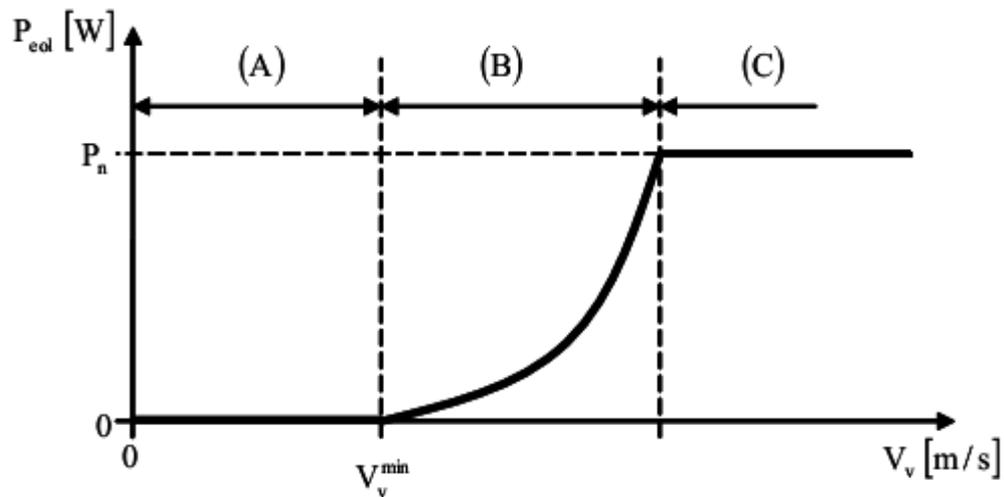


Figure 2-7 Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent [Mi].

Après une (zone A) où aucune puissance n'est délivrée pour des vitesses du vent inférieures à la vitesse du démarrage v_{\min} une section de fonctionnement normal existe. Si on extrait alors la puissance maximale de la turbine (MPPT) celle-ci évolue alors selon le cube de la vitesse du vent (zone B). Quand la puissance nominale P_n est atteinte, elle doit être limitée (zone C) [Mi].

La puissance éolienne captée par une aéro turbine est proportionnelle au cube de la vitesse

du vent. Il existe une vitesse de vent à partir de laquelle la puissance mécanique transmise par l'aéroturbine est supérieure à la puissance nominale de la machine électrique. Divers éléments de l'aérogénérateur sont dimensionnés en fonction des charges, vitesse de rotation et puissances correspondantes à cette vitesse de vent. Ces éléments ne peuvent pas supporter des valeurs de ces grandeurs supérieures à certaine limite [Cam]. Il faut donc limiter la puissance captée par l'aéroturbine lorsque le vent devient trop important (zone C).

Le contrôle MPPT (Maximum Power Point Tracking) fait l'objet de divers travaux. Par exemple, les publications [Kha], [Dat], présente un algorithme complet de commande. L'objectif est de capter le maximum d'énergie possible.

II.2.10. Types de régulation de puissance

Il y a deux méthodes principales pour contrôler la puissance aérodynamique recueillie par la turbine et ainsi limiter cette puissance lorsque la vitesse du vent est trop élevée.

II.2.10.1 Un système à décrochage aérodynamique « stall »

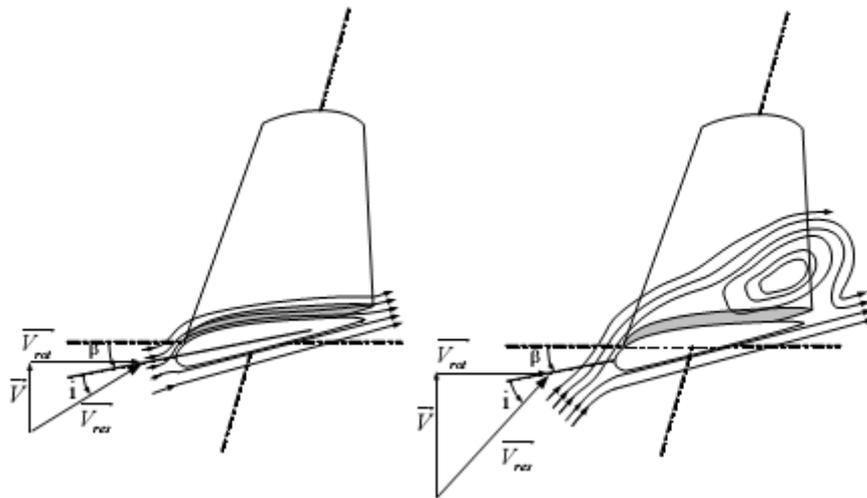


Figure 2-8 Flux d'air sur un profil de pale " stall " [Poi].

V : Vecteur vitesse du vent.

B : Angle de calage des pales d'une éolienne à axe horizontal.

I : Angle d'incidence des pales d'une éolienne à axe horizontal.

V_{rot} : Composante de la vitesse du vent due à la rotation de la turbine.

V_{res} : Résultante des vecteurs V et V_{rot} .

Lorsque l'angle d'incidence i devient important, c'est à dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale V_n , l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale (Figure 2-8) et par conséquent une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation [Poi].

Ce système est simple et relativement fiable mais il manque de précision car il dépend de la masse volumique de l'air et de la rugosité des pales [Poi].

Selon l'article de [Mul], les éoliennes à vitesse variable, de puissance nettement supérieure, utilisent un système d'orientation des pales. Les constructeurs justifient ces choix par des considérations technico-économiques.

II.2. 10.2 Un système d'orientation des pales « pitch »

L'utilisation d'un système d'orientation des pales permet, par une modification aérodynamique, de maintenir constante la puissance de la machine pour une vitesse de vent supérieure à v_n (Figure 2-9) et Permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent pour maintenir une puissance sensiblement constante (zone C de la Figure 2-7).

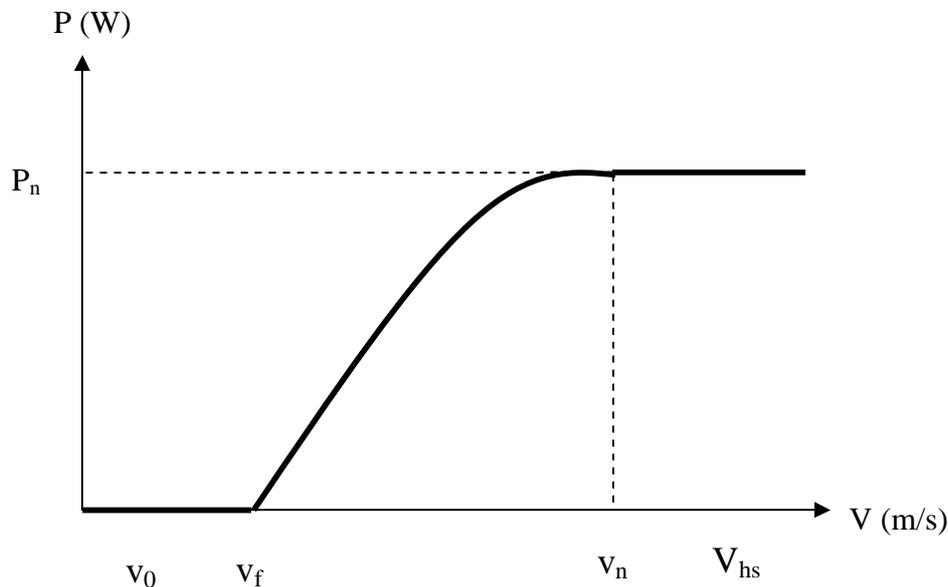


Figure 2-9 Génération à puissance électrique constante (pâles orientables) [Ela].

Avec

- v_f , la vitesse pour laquelle le générateur commence à fournir de la puissance.

- v_{hs} , la valeur de la vitesse pour laquelle la machine doit être arrêtée.

- P_n , la puissance nominale de l'éolienne.
- v_0 , la valeur de vitesse pour laquelle le rotor de la turbine commence à tourner.
- v_n , la valeur de vitesse pour laquelle la puissance nominale est atteinte.

Le système d'orientation des pales sert essentiellement à limiter la puissance générée. Avec un tel système, la pale est tournée par un dispositif de commande appelé « pitch control ». En réglant l'angle d'orientation des pales, on modifie les performances de la turbine, et plus précisément le coefficient de puissance. Les pales sont face au vent en basses vitesses, puis, pour les fortes vitesses du vent, s'inclinent pour dégrader le coefficient de puissance [Ela].

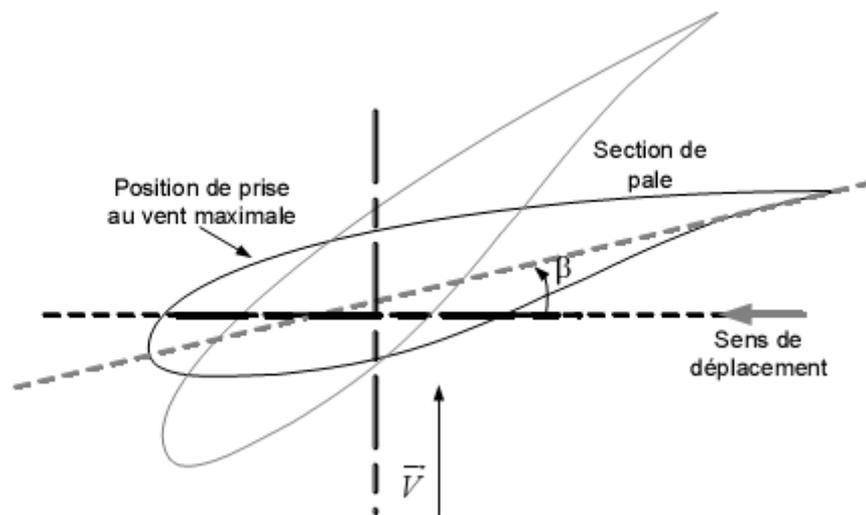


Figure 2-10 Variation de l'angle de calage d'une pale [Poi].

Camblong [Cam] étudie, la commande d'une éolienne à vitesse variable et régulation pitch. Il utilise pour cela une simulation numérique basée sur des modèles simples représentés sous formes d'équations d'état.

Le système de régulation de la puissance par orientation des pales possède les avantages suivants [Ela]:

- ∅ Il offre une production d'énergie plus importante que les éoliennes à décrochage STALL pour la plage de fonctionnement correspondant aux fortes vitesses de vent.
- ∅ Il facilite le freinage de l'éolienne, en réduisant la prise du vent des pales, ce qui limite l'utilisation de freins puissants.
- ∅ Ce type de régulation réduit les efforts mécaniques lors des fonctionnements sous

puissance nominale et sous grandes vitesses.

Ces avantages sont montrés dans l'article [Mul 1999], les auteurs étudié la commande d'une éolienne à vitesse variable avec régulation pitch. La simulation montre qu'il permet d'effectuer un contrôle actif de la puissance pour de larges variations de vent, ce type de régulation réduit les efforts mécaniques lors des fonctionnements sous puissance nominale et sous grande vitesse et permet également de freiner la turbine si nécessaire.

Certains aérogénérateurs combinent les avantages des deux systèmes en réalisant un contrôle **stall-actif**.

En 2000, environ 60% des aérogénérateurs utilisaient la régulation « **stall** » mais les grandes machines d'aujourd'hui utilisent presque en exclusivité le contrôle « **pitch** » [Cam].

II.3. Conversion de l'énergie photovoltaïque

Bien que l'énergie photovoltaïque soit connue depuis de nombreuses années comme source pouvant produire de l'énergie électrique allant de quelques milliwatts au mégawatt, elle reste encore à un stade anecdotique et ne se développe pas encore dans de grandes proportions, notamment à cause du coût trop élevé des capteurs. De plus, plusieurs problèmes techniques doivent être résolus pour amener ces systèmes à un degré de maturité suffisant pour en faire des produits industriels à part entière. Les problèmes concernent autant le matériau de conversion photovoltaïque, qui reste cher à synthétiser, que la chaîne de conversion électrique, qui présente beaucoup de pertes lors d'utilisations mal adaptées [Alo].

II.3.1 L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque se manifeste par l'apparition d'une différence de potentiel à la jonction entre un métal et un semi-conducteur ou entre deux semi-conducteurs lorsque le dispositif reçoit un rayonnement lumineux de longueur d'onde adéquate. Ainsi une cellule photovoltaïque peut convertir l'énergie solaire en énergie électrique en mettant en jeu ce phénomène physique optoélectronique. Industriellement les matériaux les plus utilisés sont à base de silicium. Les performances de rendement énergétique atteintes industriellement sont de 13 à 14 % pour les cellules à base de silicium monocristallin, 11 à 12 % avec du silicium polycristallin et enfin 7 à 8% pour le silicium amorphe [Ger].

II.3.2 Utilisation d'un générateur PV

L'utilisation directe de l'énergie sortant d'un générateur PV est possible. Par exemple, un panneau PV commercialisé peut être directement connecté à une charge de type batterie. Il faut cependant que la charge accepte la tension et le courant continu délivrés par le générateur. Une autre précaution doit être prise pour éviter de détériorer le générateur par un retour de courant sur ce dernier (Figure 2-10-a). Ainsi, fréquemment, une diode anti-retour est placée entre la source et la charge. Cependant, dans ce cas de connexion directe, le panneau n'est exploité au mieux qu'au point de fonctionnement pour lequel la tension nominale de la charge est égale à la tension optimale du générateur VOPT [Alo].

Une connexion indirecte entre la charge et le générateur par l'intermédiaire d'un convertisseur statique est parfois nécessaire (Figure 2-10-b).

Les raisons sont de plusieurs types [Alo] :

- ∅ Les formes des tensions et des courants délivrés par le générateur ne sont pas compatibles avec la charge (cas d'une charge devant être alimentée en sinusoïdal).
- ∅ La tension nécessaire à la charge est très élevée par rapport à celle délivrée par un panneau.
- ∅ La tension et/ou le courant de la charge doivent être contrôlés.
- ∅ La production de puissance du générateur PV doit être maximisée par l'intermédiaire d'une loi de commande de type MPPT.

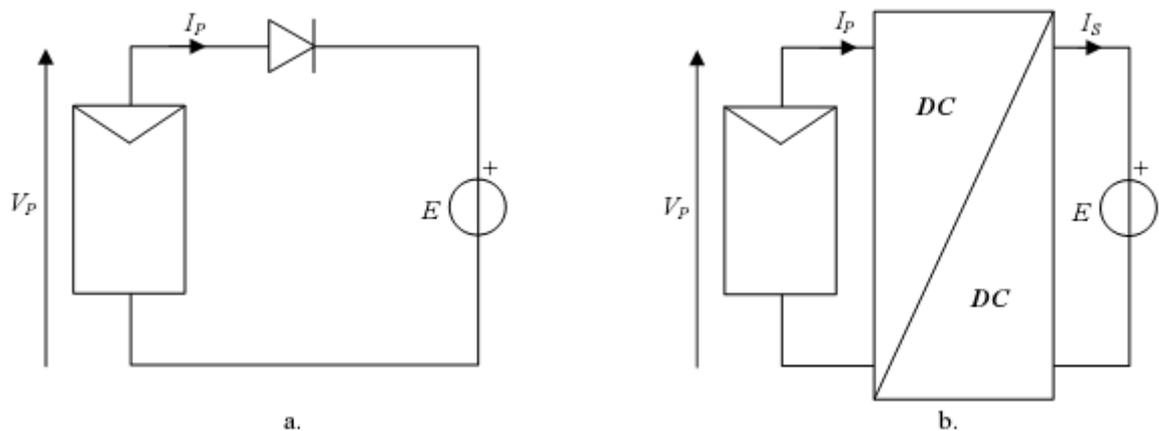


Figure 2-10 Connexions d'un générateur PV à une charge [Alo].

- a. Connexion directe.
- b. Montage avec convertisseur statique.

La contribution de la filière photovoltaïque ne deviendra probablement significative que plus tard entre 2020 et 2050 lorsque les coûts d'investissement auront suffisamment diminué [Mul].

II.3.3. Cellule photovoltaïque

Typiquement une cellule photovoltaïque produit moins de 2 Watts sous approximativement 0,5 Volt. Une association série de plusieurs cellules donne un module et une association série et/ou parallèle de plusieurs modules permet de réaliser un panneau photovoltaïque [Ger].

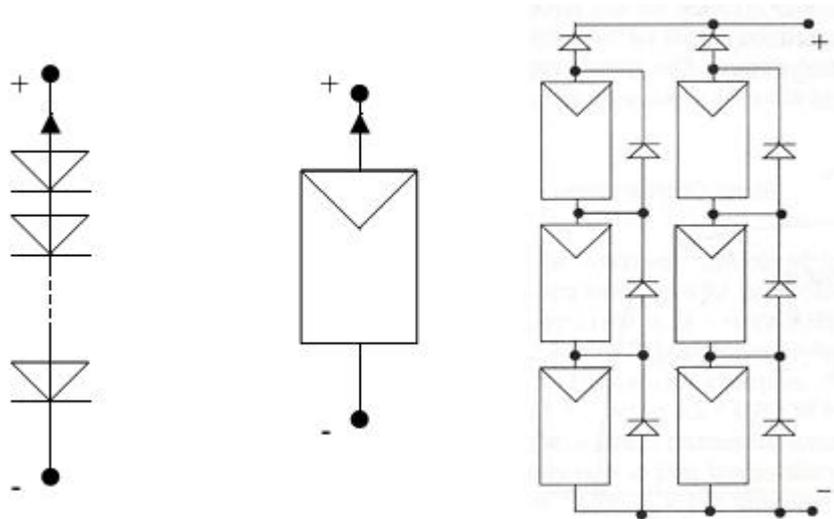


Figure 2-12 Cellules, module et panneau photovoltaïques [Ger]

Le passage d'un module à un panneau se fait par l'ajout de diodes de protection, une en série pour éviter les courants inverses et une en parallèle, dite diode by-pass, qui n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de production associée [Ger].

II.3.4. Fonctionnement

En général, les cellules photovoltaïques sont constituées de matériaux semi-conducteurs spéciaux qui permettent aux électrons, qui sont excités lorsque le matériel est exposé à la lumière

du soleil, d'être libérés de leurs atomes. Une fois libérés, ils se déplacent dans le matériau et forment un courant électrique. Le courant circule dans une seule direction (comme aux bornes d'une pile) et c'est pourquoi on dit que cette électricité est à courant continu.

L'énergie produite par les modules photovoltaïques peut être utilisée immédiatement ou emmagasinée dans les accumulateurs pour être consommée plus tard. Généralement, le surplus d'énergie produit par les systèmes PV autonomes durant les périodes d'ensoleillement est emmagasiné dans les accumulateurs. Ces derniers fournissent ensuite l'électricité nécessaire pendant la nuit ou lorsqu'il n'y a pas suffisamment de rayonnement solaire. Dans ces systèmes, la puissance électrique du champ de modules et la capacité des accumulateurs sont soigneusement déterminées afin d'obtenir un rendement optimal [Mi].

En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules et de leurs associations, le rendement des systèmes photovoltaïques peut être augmenté par les solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale (techniques dites MPPT).

Plusieurs travaux intéressante à ce sujet ont été publiés [Alt], [Sny], [Xia], [Mut], [Sun], [Liu], [Jai], [Miy], [Ahn]. Cette dernière caractéristique est assez commune avec la production d'énergie éolienne.

II.3.5. Les avantages de l'énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque offre de multiples avantages:

- Ø La production de cette électricité renouvelable est propre [Grand], n'est pas toxique [Ter].
- Ø Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables [Chia], [Busq].
- Ø L'énergie photovoltaïque Particulièrement attractive pour les sites urbains [Wang], dus à leur petite relative taille, et leur opération silencieuse [Rod], [Sun], [Chia], [Ram 2002].
- Ø La lumière du soleil étant disponible partout [Chia], l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville [Site 9].
- Ø L'électricité photovoltaïque est produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur [Site 9].

- Ø Les matériaux employés (verre, aluminium) résistent aux pires conditions climatiques (notamment à la grêle) [Site 9].
- Ø La durée de vie des panneaux photovoltaïques est très longue. Certains producteurs garantissent les panneaux solaires pour une durée de 25 ans [Bus].

II.3.6. Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque [Site 9]

- Ø Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
- Ø Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
- Ø Le coût très élevé qu'on a déjà discuté [Ram 2002].
- Ø Faible rendement de conversion.
- Ø S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente.
- Ø Pollution à la fabrication.

Malgré les inconvénients, le marché photovoltaïque ne cesse pas de trouver des applications et de s'agrandir. En plus, la technologie photovoltaïque est dans un processus de maturation dans laquelle les inconvénients pourraient s'attendrir, surtout à ce qui concerne les coûts de fabrication.

II.3.7. Les genres de systèmes photovoltaïques

Les trois genres de systèmes photovoltaïques que l'on rencontre généralement sont les systèmes autonomes, hybrides et connectés à un réseau. Les deux premiers sont indépendants du service public de distribution d'électricité, on les retrouve souvent dans les régions éloignées du réseau.

II.3.7.1 Systèmes autonomes

Les systèmes autonomes dépendent uniquement de l'énergie solaire pour répondre à la demande d'électricité, ils peuvent comporter des accumulateurs qui emmagasinent l'énergie produite par les modules au cours de la journée servant la nuit ou lors des périodes où le rayonnement solaire est insuffisant. Ces systèmes peuvent également répondre aux besoins d'une application (par exemple, le pompage de l'eau) sans recours aux accumulateurs. En règle générale, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie

électrique la plus économique.

II.3.7.2 Systèmes hybrides

Les systèmes hybrides, qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité, sont composés d'un générateur photovoltaïque combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois. Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée, lorsqu'il n'y a pas assez de lumière solaire à certains moments de l'année, ou si vous désirez diminuer votre investissement dans les champs de modules photovoltaïques et les batteries d'accumulateurs.

II.3.7.3 Systèmes connectés à un réseau

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque connectés à un réseau sont une résultante de la tendance à la décentralisation du réseau électrique. L'énergie est produite plus près des lieux de consommation et non pas seulement par de grandes centrales thermiques ou hydroélectriques. Au fil du temps, les systèmes connectés à un réseau réduiront la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution. Un système connecté à un réseau produit sa propre électricité et achemine son excédent d'énergie vers le réseau, auprès duquel il s'approvisionne au besoin, ces transferts éliminent le besoin d'acheter et d'entretenir une batterie d'accumulateurs.

L'énergie photovoltaïque est utilisée depuis de nombreuses années pour électrifier des sites isolés (off-grid), comme les chalets en montagne par exemple.

Depuis la fin des années 90, cette énergie renouvelable est en forte expansion au niveau mondial pour l'équipement de sites raccordés au réseau (grid-connected), comme le montre le graphique suivant [Site 9] :

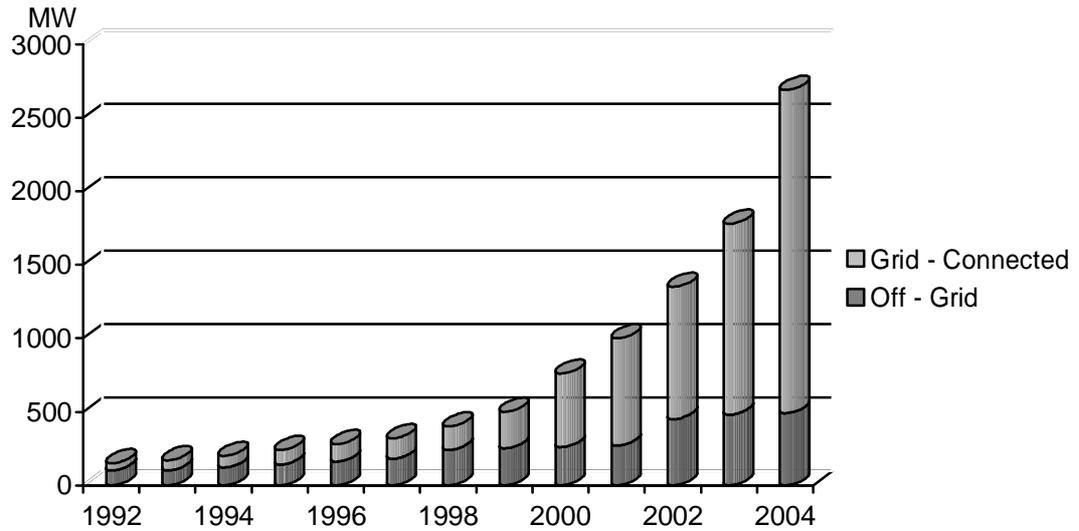


Figure 2-13 Utilisation de l'énergie photovoltaïque pour les sites isolés ou raccordés au réseau
[Site 9]

La croissance de cette filière au niveau mondial est actuellement de 30% par an. Selon les politiques nationales, le développement du photovoltaïque est différent d'un pays à l'autre.

II.3.8. Modèle mathématique

La caractéristique du panneau solaire est semblable à celle d'une diode. Ce qui est normal car une cellule solaire est modélisé par des diodes en parallèle avec une source de courant.

II.3.8.a Schéma équivalent idéal de la cellule photovoltaïque

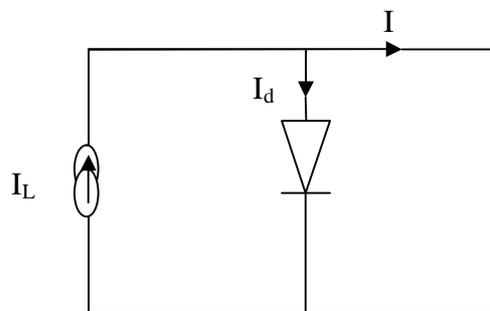


Figure 2-14 Schéma équivalent idéal de la cellule PV.

Le courant à la borne de la cellule est :

$$I = I_L - I_d \quad (\text{II.1})$$

Avec :

I_L : Photo- courant.

I_d : Courant traversant la diode.

I : Courant du panneaux.

$$I_d = I_s \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.2})$$

Avec :

Q : Charge de l'électron ($1.9 \cdot 10^{-19}$ coul).

K : La constante de Boltzman.

I_s : Courant de saturation.

V : Tension à la borne de la diode.

T : Température absolue (en kelvin).

Le schéma si dessous représente les différents courants I , I_d et I_L .

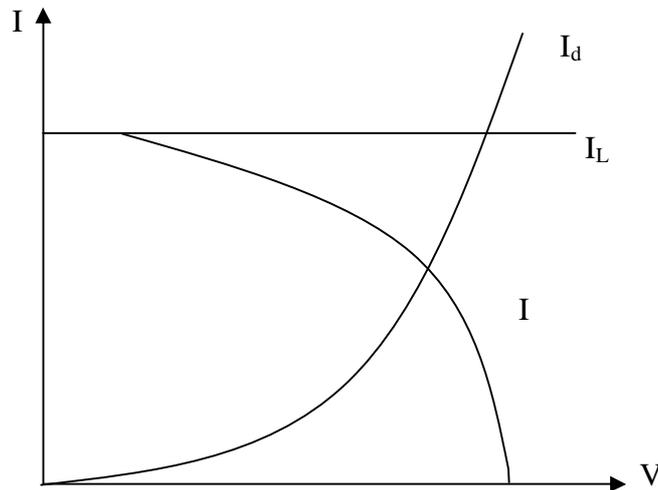


Figure 2-15 La caractéristique $I(V)$ d'une cellule solaire (schéma idéal).

II.3.8.b Schéma équivalent réel de la cellule photovoltaïque

La technologie des systèmes photovoltaïques a connu un développement rapide et a joué un rôle très important dans le domaine de l'électronique de puissance proposant ainsi des alimentations électriques sans pollution. Les générateurs photovoltaïques sont constitués de plusieurs modules configurés suivant le besoin [Moh]. Le schéma équivalent réel d'un module est donné par la Figure 2-16.

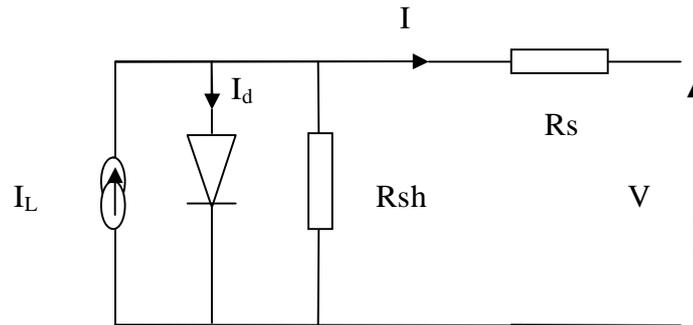


Figure 2-16 Schéma équivalent réel électrique de la cellule PV réelle.

$$I = I_L - I_s \left(\exp q \left(\frac{V + R_s I}{n k T} \right) - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.3})$$

Avec :

I : Le courant généré par la photopile (A).

I_L : Le photo courant généré (A).

I_s : Le courant de saturation (A).

K : Constante de Boltzman.

T : Température absolue (en kelvin).

v : La tension aux bornes de la cellule (V).

n : Facteur de qualité de la cellule ($1 \leq n \leq 2$).

R_s : Résistance série (Ω).

R_{sh} : Résistance shunt (Ω).

II.4. Conclusion

L'électricité provenant des sources renouvelables est intermittente, dépendante des conditions climatiques. La production d'électricité à partir seulement d'une des deux sources d'énergie éolien ou photovoltaïque, est un objectif très souvent limité par le prix de revient final du kWh électrique produit, en raison de l'irrégularité du vent et de la discontinuité dans le temps du rayonnement solaire qui posent le problème du stockage d'énergie.

Considérant leurs caractéristiques saisonnières respectives, ces deux énergies ne se concurrencent pas mais au contraire peuvent se valoriser mutuellement. Ce se qu'on propose dans le suivant chapitre.

III.1. Introduction

La réalisation de l'interconnexion de plusieurs sources d'énergies renouvelables (hydrauliques, PV, éoliennes...etc.) sous forme d'un micro réseau isolé demeure l'une des ambitions majeurs de l'électrification rurale décentralisée. Cette interconnexion devrait contribuer à réduire les disparités entre villages engendrées par un accès inégal aux ressources naturelles.

Le couplage de plusieurs sources a pour avantage :

- Ø Accroître la fiabilité du système.
- Ø Augmenter les puissances à satisfaire.
- Ø Réduire les coûts de production.

Cependant, il augmente la complexité du système et le nombre de données physiques qui entrent dans son fonctionnement.

III.2. Modes de couplage au réseau et réseaux autonomes

Qu'ils soient solaire ou éolien, les systèmes de production d'électricité décentralisés sont, en général, couplés au réseau sans système de stockage ou bien isolés du réseau et donc associés à un dispositif de stockage de l'énergie.

Le principal avantage des systèmes couplés au réseau est qu'ils permettent de revendre l'énergie produite et non consommée sur place. Par contre, ces systèmes ne peuvent fonctionner qu'en présence du réseau. Dans le cas d'une coupure de ce dernier, bien qu'ayant son propre système de production d'électricité, le producteur indépendant se trouve privé d'électricité.

Le producteur-consommateur isolé du réseau est tributaire des conditions météorologiques. Ainsi, si l'on a plusieurs jours successifs défavorables à la production d'électricité, le producteur-consommateur risque également d'être privé d'électricité lorsque son dispositif de stockage sera complètement déchargé [Ger].

Dans [Ger], O. Gergaud choisi une architecture combinant les avantages de ces deux solutions. Elle est à la fois couplée au réseau et associée à un dispositif de stockage de l'énergie.

Les avantages de cette combinaison sont :

- Ø Possibilité de revendre le surplus d'énergie produite, la revente de surplus d'énergie permettrait, dans la plupart des cas, de compenser les coûts d'une connexion au réseau principal.
- Ø Exploitation du système même si le réseau est défaillant.
- Ø Sécurité d'approvisionnement quelles que soient les conditions météorologiques.

III.3. Les problèmes des sources d'énergies renouvelables

Le problème majeur associé aux sources d'énergie décentralisées ne participent en générale pas aux services système (réglage de la tension, de la fréquence, démarrage en autonome ou black-start, possibilité de fonctionner en îlotage...etc.). Le fait de ne pas participer aux services système amène ce type de source à se comporter comme des générateurs passifs du point de vue électrique [Ela].

Le réglage de la tension et de la fréquence est dès lors reporté sur les alternateurs classiques. Le taux de pénétration de la production décentralisée, c'est-à-dire la puissance qu'elle génère par rapport à la puissance consommée, doit alors être limité afin de pouvoir garantir la stabilité du réseau dans des conditions acceptables [Ela]. Ceci est particulièrement vrai pour les sources à énergie renouvelable dont la source primaire est difficilement prévisible et très fluctuante, comme c'est le cas de l'éolien pour lequel certains retours d'expérience indiquent que lors de taux de pénétration supérieur à 20 ou 30% des problèmes de stabilité peuvent apparaître. La Figure 3-1 montre un enregistrement de la puissance générée par une éolienne à vitesse fixe de 300 KW (ancien site de Dunkerque au nord de la France) soumis à un vent moyen de 12 m/s. Cet enregistrement, qui illustre le caractère très fluctuant de la puissance générée par ce type d'éolienne, montre que cette puissance peut subir des variations de plus de 100 KW par 3 sec [Cim].

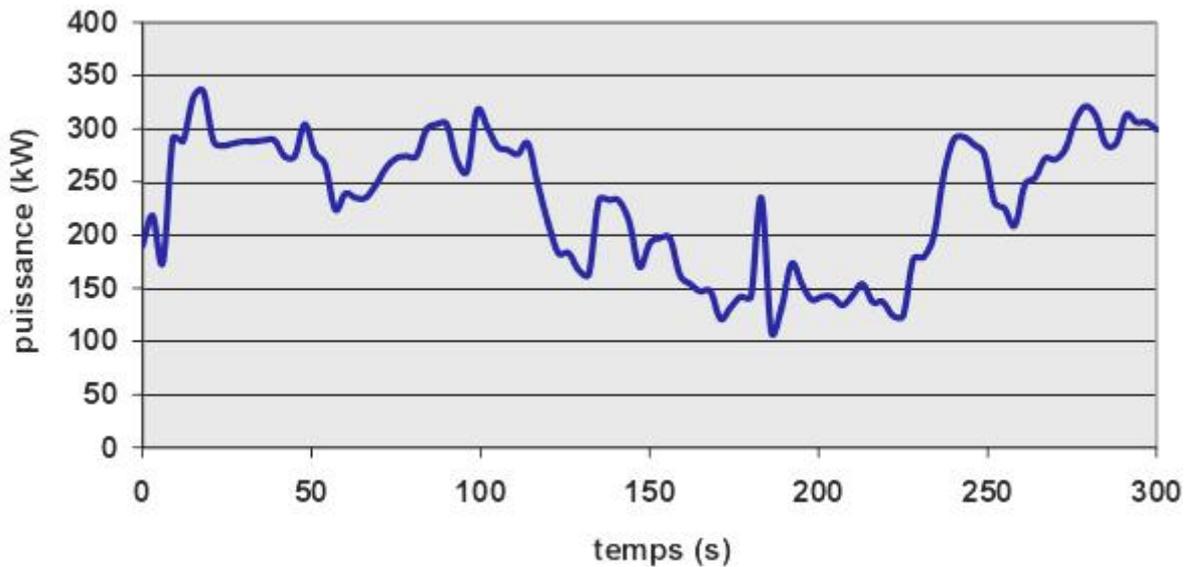


Figure 3-1 Exemple de puissance générée par une éolienne à vitesse fixe de 300 KW [Cim].

Les systèmes de production décentralisés sont fort sensibles aux perturbations du réseau. Les creux de tension ou les variations de fréquence entraînent souvent la déconnexion de la production lors d'un incident sur le réseau. Cette déconnexion peut engendrer un déséquilibre production / consommation et, par effet domino, accélérer l'avènement d'un incident majeur dans le réseau.

D'autre part, la possibilité de fonctionner en îlotage permettrait à la production décentralisée de continuer à alimenter des consommateurs isolés du réseau suite à un défaut sur celui-ci, et ainsi de limiter le nombre de clients affectés par ce défaut [Cim].

III.4. Les modèles existants dans le domaine éolien

Les types de modèles utilisés dans le domaine de l'énergie éolienne sont aussi nombreux que les objectifs fondamentaux pour lesquels ces modèles sont développés.

Certains modèles permettent par exemple d'étudier l'adéquation d'un site pour l'installation d'un parc éolien. Ils représentent les caractéristiques topographiques, aérodynamiques et météorologiques liées à cet endroit. Comme dans l'article de Benoudjit chalabia [Cha 2006], pour le site de Ain Amenas.

D'autres modèles examinent le comportement aérodynamique des pales d'une éolienne [Mul 1999]. L'objectif de ces études est de vérifier et d'optimiser la conception des pales d'une éolienne en accord avec certains critères tels que la maximisation des forces utiles, la minimisation des charges non désirées, l'ajustement des caractéristiques des pales à une vitesse

de vent nominal concrète...etc. L'étude d'une part des forces aérodynamiques sur les pales et d'autre part du vent à l'origine de ces forces est très complexe [Cam].

Il existe également des modèles économiques permettant l'étude des coûts de fabrication ou d'installation d'aérogénérateurs [Her]. Karki [Kar 2004] a par exemple développé des modèles de coût permettant d'optimiser l'implantation d'un système éolien, selon un critère lié au coût du Kwh produit.

D'autres types de modèles sont également développés pour l'examen d'éléments concrets d'un aérogénérateur (convertisseur, multiplicateur, freins...etc.), l'étude de l'impact environnemental (bruit, impact visuel...etc.) [Cam].

Des estimations récentes ont montré qu'actuellement près de 2.2 milliards d'individus ne sont toujours pas raccordés aux grands réseaux d'électricité, ce qui représente environ 44% de la population mondiale [Kou]. Nombreux sont les auteurs ayant développé des modèles pour l'électrification rurale décentralisée. Par exemple Rodrigues Amenado [Rod 2002] présente un modèle d'une ferme éolienne (Yerga wind farm), situé dans le nord de l'Espagne avec 37 turbines éoliennes à vitesse variable, avec des génératrices asynchrones à double alimentation, délivrent une puissance totale évaluée à 24.42 MW.

L'intégration d'un grand nombre de fermes éoliennes a un impact significatif sur la fiabilité des systèmes de génération électriques [Sho 2005].

S. El Aïmani nous donne un exemple d'une ferme éolienne, constituée de 3 éoliennes de 300 KW basées sur une génératrice asynchrone à vitesse variable [Ela 2002].

Selon Nicolas Fichaux [Fic 2003], le marché éolien maritime est un élément clef du développement de l'industrie éolienne car les sites offshore présentent des caractéristiques attractives :

- Ø L'énergie produite pourrait être de 40 % supérieure aux sites terrestres, car la rugosité de la surface marine est faible par rapport à la terre.
- Ø Les conflits d'utilisation des sites offshore semblent moindres qu'à terre (réduction des impacts visuels, bruit, occupation du territoire ...etc.).

En Allemagne, l'implantation de 1,2 GW en offshore a été proposée, en considérant des turbines de 2 à 5 MW. Le secteur de l'éolien offshore est donc un secteur dynamique, en plein essor. Le plus grand parc offshore en service actuellement est celui de Middelgrunden au

Danemark (20 éoliennes de 2 MW). Le programme allemand table sur plus de 15 000 MW offshore en 2020 [Site 10].

Plusieurs exemples d'implantations d'éoliennes de petite ou moyenne puissance ont été répertoriés en milieu urbain ou semi urbain [Gri 2006].

- Ø L'éolienne du lycée Léonard de Vinci (Calais-France) installée a une puissance de 132 kW et la production attendue est de 200 000 kWh/an. L'objectif de cette opération est de produire une partie non négligeable de la consommation annuelle du site.
- Ø Trois éoliennes de 6 kW (Fortis-France) sont installées depuis début janvier 2004 à Bobigny. L'énergie produite a pour objectif de fournir tout ou partie de l'éclairage.
- Ø Une éolienne de marque hollandaise Wind wall de 6 kW a été implantée en 2005 sur le toit d'un bâtiment collectif de Pas de Calais (France). La production annoncée est de 7 à 8 000 kWh/an.
- Ø En Allemagne une éolienne Enercon 40, d'une puissance nominale de 400 kW est en fonctionnement depuis le 1 août 1997. Son diamètre est de 40,3 m. La production d'énergie était de 960 600 kWh/an en 1998. Cette éolienne est placée à environ 200 m des habitations les plus proches.
- Ø Au Royaume Uni dans une école primaire l'éolienne est de la marque Gazelle avec une puissance de 20 kW. Il s'agit d'une éolienne à 3 pales dont chacune mesure 5,3 m. La hauteur du mât est de 14,5 m. L'éolienne est placée dans l'enceinte d'un groupe scolaire à environ 30 m des bâtiments.

On retrouve dans les pays en développement les principales applications de l'énergie éolienne : des éoliennes de parc raccordées au réseau, et des installations autonomes pour les sites ou villages isolés, avec des matériels plus rustiques et plus faciles en ce qui concerne l'entretien et la maintenance dans ce dernier cas.

Au Maroc, l'Office National de l'Electricité (ONE) développe le parc éolien d'Al Koudia Al Baïda est situé au nord de Tétouan. Le projet concédé a été mis en service en 2000. La puissance est de 50 MW, avec 84 aérogénérateurs de 600 kW, sur une ligne de crêtes d'une dizaine de kilomètres, entre 400 et 600 m d'altitude, et avec une production attendue de 200 millions de kWh/an. Le site bénéficie d'un potentiel éolien élevé, régulier et peu turbulent [Ra].

En Mauritanie, le programme Alizés, financé par l'Union Européenne, la Coopération française et la Région Nord - Pas de Calais, a permis d'installer 101 éoliennes de pompage sur 92 villages, soit 20 000 personnes approvisionnées en eau [Ra].

Les applications en site isolé, en système autonome, constituent une autre utilisation de l'énergie éolienne et requièrent des machines de plus faible puissance, de quelques centaines de watts à 200 kW, de conception plus rustique et robuste.

Les îles, les zones montagneuses, les endroits d'accès difficile ou tout simplement les zones dépourvues de réseau électrique, notamment dans les pays en développement, constituent les sites privilégiés de cette technologie [Ra].

III.5. Modèles existants dans le domaine photovoltaïque

Beaucoup de travaux ayant été effectués dans les années 70 sur l'énergie solaire, ont été sollicités pour redémarrer des axes de recherches sur l'amélioration du traitement de cette énergie. L'objectif était de rendre plus fiable et moins coûteux ce traitement pour des productions à grande échelle [Alo].

Le potentiel énergétique solaire en Algérie est très important, la moyenne annuelle de l'éclairement solaire sur une surface inclinée est environ $7 \text{ kWh/m}^2/\text{jour}$ [Ham 2005]. Plusieurs systèmes de pompage sont installés surtout pour l'alimentation en eau potable. Ces installations ont été effectuées par les opérateurs publiques et privés afin de contribuer au développement socio-économique de ces régions.

Dans le travail de A. Hamidat [Ham 2005], l'auteur propose une étude sur les performances électriques et hydrauliques, ainsi qu'une analyse économique comparative entre les systèmes de pompage photovoltaïque qui existent sur le marché algérien.

Pour améliorer les systèmes PV-Batteries tout en conservant leur qualité de respect de l'environnement, une idée, apparue dans les années 90, est d'utiliser l'hydrogène pour stocker l'énergie à long terme. De nombreuses recherches ont été menées sur les systèmes Solaire-Hydrogène [Bus].

Plusieurs travaux sur les systèmes de pompage photovoltaïque (SPPV) ont été publiés ([Had], [Mes], [Ham 2005]) pour les zones rurales des pays en voie de développement qui affrontent des grands problèmes dus au déficit en eau. Ces problèmes sont spécialement accentués dans des zones désertiques. Le déficit en eau dans les zones arides et semi-arides est

une question vitale pour les populations. L'amélioration des conditions de vie dans ces zones est liée à la recherche des solutions adéquates à ce problème. Le pompage solaire photovoltaïque (PV) représente la solution idéale pour l'approvisionnement en eau partout où le réseau électrique est absent.

Dans le domaine de l'électrification rurale, Stathis Tselepis nous donne dans la publication [Tse] un prototype d'un système photovoltaïque autonome pour alimenter des maisons isolées dans l'île de Kithnos située dans la Grèce, il montre que le coût est compétitif quand la distance au réseau est supérieure à 1 Km. On peut également installer des systèmes de plusieurs centaines ou milliers de watts pour alimenter des maisons, des applications industrielles ou commerciales, des écoles et des cliniques...etc.

Très rapidement, nous nous sommes aperçus que, même si les systèmes de production photovoltaïque faisaient des progrès considérables, ils ne pourraient à eux seuls représenter une source d'énergie fiable. En effet, les variations de production étant fortement couplées aux données météorologiques, la production ne pouvait pas forcément être assurée lorsque l'utilisation s'en faisait sentir. Il faut donc penser à coupler les systèmes PV à d'autres sources d'énergie ainsi qu'à des moyens de stockage. L'éolien paraissait prometteur car il était souvent complémentaire en production.

En effet, les vents soufflent plus fort la nuit et la production d'énergie éolienne aurait pu compenser, dans ces horaires, celle inexistante du PV.

III.6. Dispositifs de stockage de l'énergie

Dans le cas d'une unité de production non raccordée au réseau la présence d'un dispositif de stockage s'impose dans la mesure où la consommation et la production sont fortement découplées. Le stockage représente une part très importante du coût total de l'installation, d'autant plus que la durée de vie des accumulateurs est bien inférieure à celle des panneaux photovoltaïques et des convertisseurs [Ger].

Pour un système raccordé au réseau, un dispositif de stockage ne semble nécessaire qu'en cas de défaillance du réseau [Ger].

Le système de stockage est dimensionné, comme on l'a vu précédemment, par sa capacité de stockage, mais pas seulement. Il doit en effet également répondre aux critères suivants :

- Ø Puissance crête déterminée.

- ∅ Bon rendement en charge et en décharge dans la gamme de puissance en production, et en consommation.
- ∅ Pertes d'auto-décharges faibles.
- ∅ Coûts réduits.

Les accumulateurs électrochimiques représentent aujourd'hui la solution qui a la plus grande maturité industrielle et qui semble offrir le meilleur compromis coût-performances pour cette application [Ger].

Les batteries ont de très bons rendements, de l'ordre de 80-85 %, et un prix très compétitif, si l'on considère la technologie plomb. Mais ses inconvénients sont nombreux [Bus] :

- ∅ La durée de vie est variable entre 6 mois et 15 ans selon la technologie et son utilisation.
- ∅ En ce qui concerne la sécurité, un local ventilé doit être dédié aux batteries et la maintenance demande des précautions.

Des travaux de recherche sont en cours sur des solutions alternatives à fort potentiel de vie comme le stockage inertiel. Par exemple cárdenas présente dans [Cár] le stockage d'énergie par masse tournant (volant d'inertie) dans le but est de développer la stratégie de commande permettant d'extraire une puissance désirée en stockant ou restituant de l'énergie.

L'association d'un système inertiel de stockage d'énergie au générateur éolien est étudiée dans [Cim], selon l'auteur Il y a plusieurs raisons pour ce choix:

- ∅ Bonne dynamique.
- ∅ Bon rendement.
- ∅ Durée de vie similaire à l'éolienne.

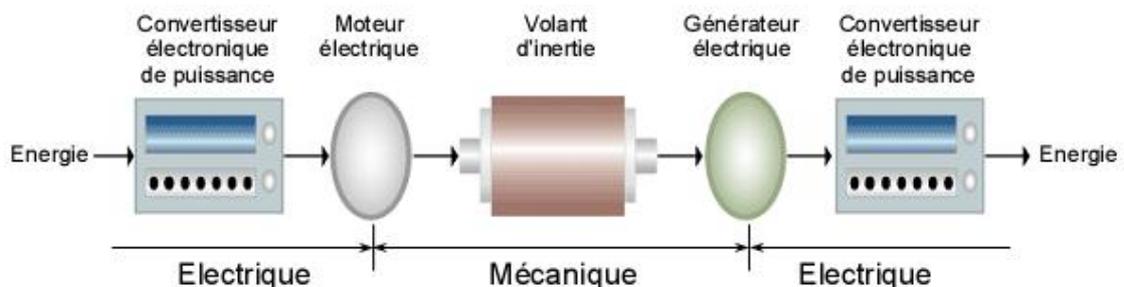


Figure 3-2 Transfert de l'énergie dans un système inertiel de stockage d'énergie [Cim].

Les premiers résultats expérimentaux concernant l'association des générateurs éoliens avec des SISEs « systèmes inertiel de stockage d'énergies » ont été publiés vers la fin des années 80s et le début des années 90s. Les différentes études ont montré que l'association d'un SISE avec un système éolien+diesel apporte des avantages importants [Cim] :

- Ø Baisse de la consommation de fuel.
- Ø Durée de vie plus longue pour les groupes diesel.
- Ø Meilleur contrôle de la puissance fournie aux consommateurs.

Le SISE constitue un tampon d'énergie permettant la régulation de la puissance fournie aux consommateurs. Dans les premières applications, le couplage du SISE est fait sur le réseau triphasé, comme on le voit dans la Figure 3-3 [Cim]

Les premiers générateurs éoliens étaient couplés directement aux réseau (Figure 3-4) ce qui imposait une vitesse de rotation constante. Le développement de l'électronique de puissance a rendu possible le couplage des générateurs éoliens au réseau par l'intermédiaire des convertisseurs électronique de puissance. Cela permet aux éoliennes de fonctionner à vitesse variable, afin d'extraire le maximum de puissance au vent [Lud].

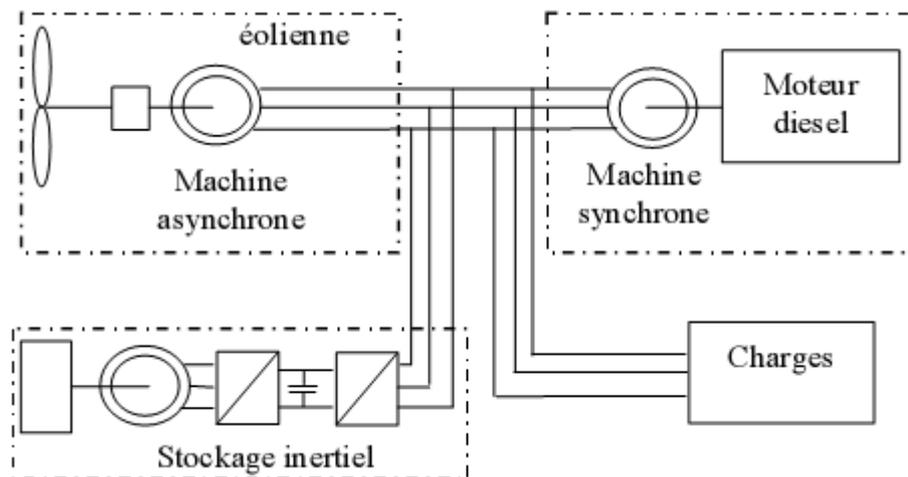


Figure 3-3 Couplage du SISE avec un système éolien+diesel [Lud].

Dans la Figure 3-4 on peut voir le schéma d'une éolienne à vitesse variable avec machine asynchrone à aimant permanents (MSAP). Ce type d'éolienne est approprié à l'alimentation des charges isolées, car elle permet le démarrage en autonome ou le black-start.

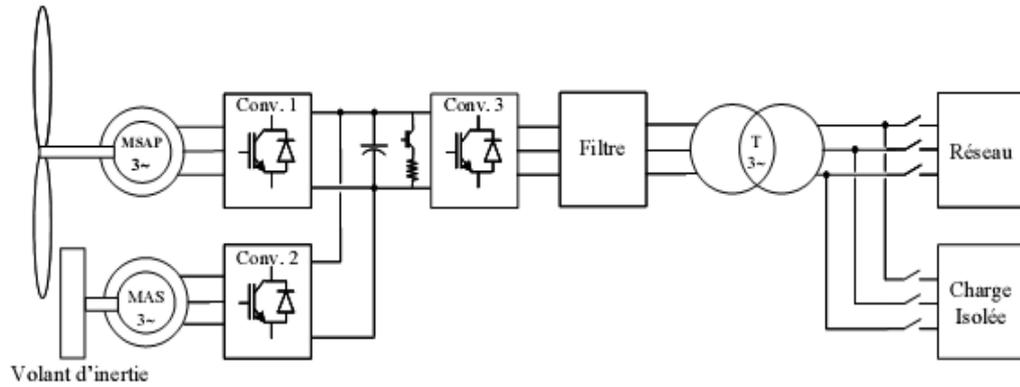


Figure 3-4 Eolienne à vitesse variable associé au stockage en vue d'un fonctionnement sur réseau ou sur charge isolées [Cim].

Parmi les applications (éolien+diesel), cárdenas présente dans [Càr] une éolien à vitesse variable avec stockage inertiel, il ajoute un générateur diesel dans le cas de faibles vitesses du vent, lorsque l'énergie stockée dans le volant d'inertie ne compense pas la charge.

On peut citer l'article de [peñ], dans cet article l'auteur présente un système éolien à vitesse variable associé à un générateur diesel qui utilise la machine asynchrone à double alimentation.

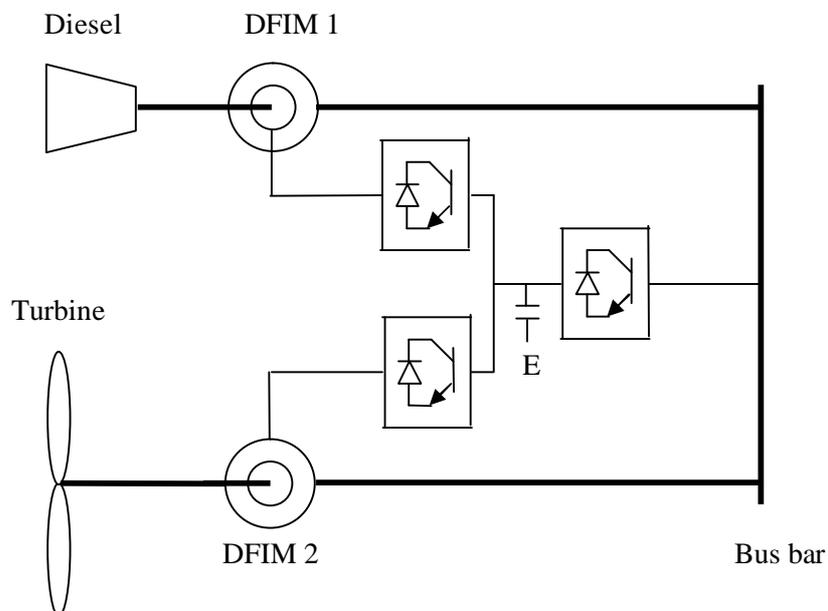


Figure 3-5 Systèmes de conversion éolien-diesel [Pñ].

III.7. Systèmes en site isolé

Pour les systèmes en site isolé, une solution couramment employée consiste à associer les aérogénérateurs ou bien les générateurs photovoltaïques à un ou des groupes électrogènes, souvent diesel.

Une autre solution couramment employée consiste à utiliser un bus continu intermédiaire avant de transformer l'énergie en courant alternatif. Dans le cas des très petites puissances, l'énergie est directement consommée en courant continu (Figure 3-6).

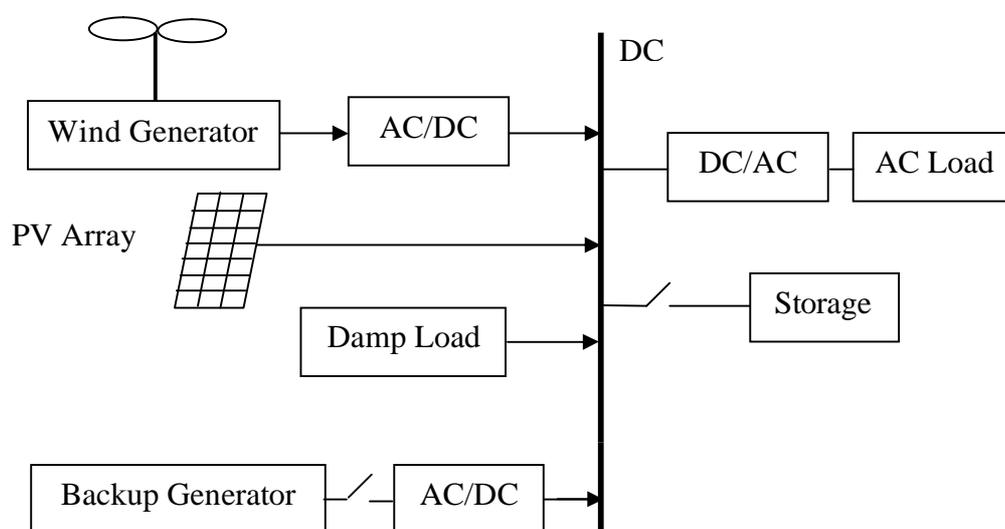


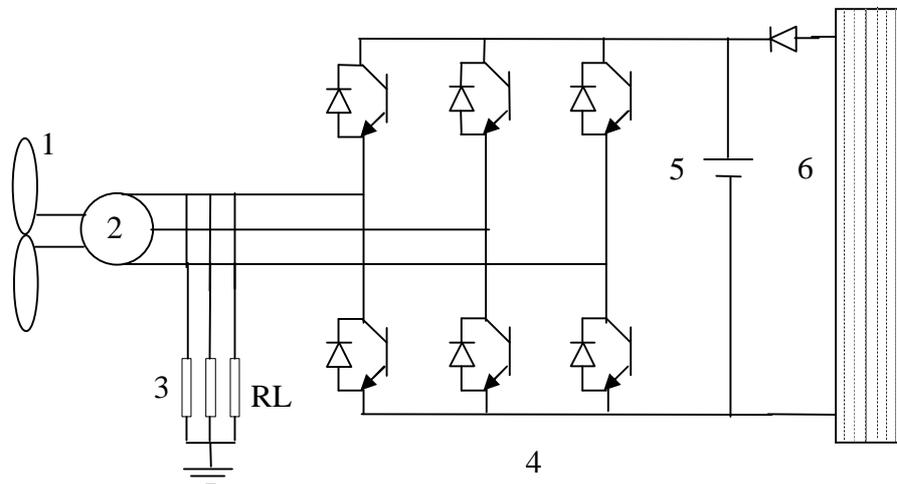
Figure 3-6 Système éolien-PV [Neh].

Le bus continu présente l'avantage d'interconnecter plus aisément divers systèmes de production (éolien, photovoltaïque, pile à combustible...etc.) et des batteries électrochimiques qui peuvent se trouver directement en tampon sur de tels bus [Ger].

III.8. Les systèmes multi sources

La non régularité des ressources renouvelables et les fluctuations de la demande en puissance selon les périodes annuelles ou journalières ne sont pas forcément en phase avec les ressources. Par exemple, en hiver il y a un besoin énergétique plus important pour le chauffage et l'éclairage mais les journées d'ensoleillement sont plus courts. La solution à retenir est certainement la diversification voire le couplage entre plusieurs sources, par exemple du solaire

avec l'énergie éolienne [Bil]. Arul Daniel [Dan 2004] propose un système hybride isolé (off-grid) composé de ces deux sources d'énergie, qui consiste en l'exploitation optimale de la complémentarité entre elles.



- | | | |
|-----------------|------------------------|------------|
| 1-Wind turbine | 2- Induction Generator | 3- Load |
| 4-IGBT Inverter | 5-Battery bank | 6-PV Array |

Figure 3-7 Couplage de deux systèmes éolien et PV [Dan 2004].

On peut citer la publication de O. GERGAUD [Ger 2001], leur travail s'inscrit dans la modélisation complète d'un système de production photovoltaïque et éolien de puissance réduite (20 modules de 2 kW et 2 éoliennes de 750 W chacune) couplé au réseau via un bus continu et associé à un dispositif de stockage électrochimique (48 V – 15 kWh).

Les études sur le couplage entre le photovoltaïque et d'autres sources d'énergies ont débuté en 2000 à travers le projet «Méthodologie de Conception de Centrales Modulaires Photovoltaïques et Eoliennes», dans le cadre du programme CNRS/ECODEV ADEME [Site 11].

Un modèle photovoltaïque + éolien + batterie, avec un générateur de réserve (backup), est présenté dans [Neh] par M. Hashem Nehrir, Brock J. LaMeres, Giri Venkataramanan, Victor Gerez, L. A. Alvarado, ce microréseau est autonome et situé dans un site isolé dans le sud de Montana au États unis (Figure 3-8).

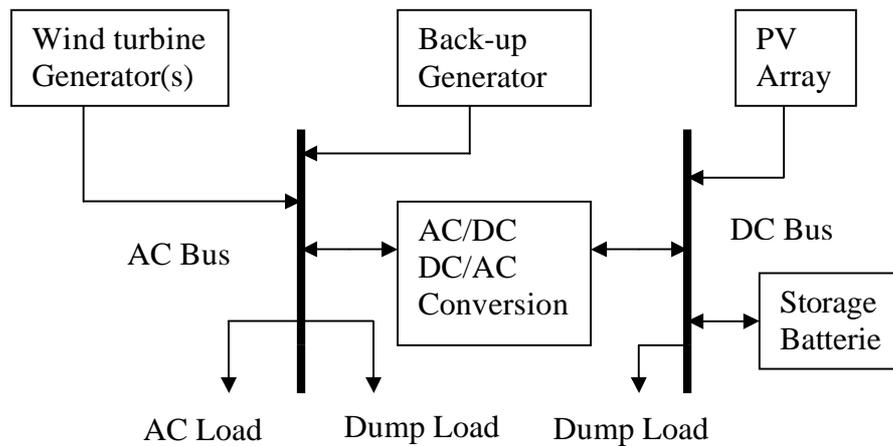


Figure 3-8 Configurations d'un système autonome éoliennes – PV [Neh].

Le générateur de réserve (backup) fournit de l'énergie si $|\Delta P| < 0$ et lorsque la batterie ne couvre pas la charge.

Avec :

$$|\Delta P| = P_{\text{éolien}} + P_{\text{PV}} - P_{\text{demande}} \quad (\text{IV-1})$$

ΔP : L'excès de la puissance.

Le modèle est constitué d'une charge résistive (Dump Load), qui consomme l'excès de la puissance fournie, qui peut être utilisé pour chauffer de l'eau. Le coût du système est économiquement justifié, si la charge est loin au réseau de plus de trois Km.

L'ajout d'un groupe électrogène à un système de production d'énergies renouvelables présente les avantages suivants [Kou] :

- Ø Augmenter la fiabilité du système.
- Ø Alimenter des charges plus énergivores.
- Ø Diminuer de manière importante le coût de l'électricité produite par une diminution importante de la taille des générateurs solaire et éolien.

D.Koussa propose dans [Kou] un dimensionnement d'un système hybride (éolien + photovoltaïque + diesel) pour alimenter une maison type non raccordée au réseau, située dans différentes zones climatiques algériennes (Adrar, Batna, Tamanrasset, Ghardaïa).

Le choix de ces sites a été basé sur la disponibilité des données météorologiques. Dans cet article, un programme de simulation a été mis au point pour prédire le comportement du système en entier.

D'après l'analyse faites sur les résultats, la combinaison des deux sources d'énergies relie à un système d'appoint (groupe électrogène) engendre un profit énergétique considérable. Pour les sites de Ghardaïa et Adrar la charge est complètement couverte respectivement par un aérogénérateur et 28 panneaux photovoltaïques et un aérogénérateur et 25 panneaux photovoltaïques. À l'exception du mois de novembre – décembre, la couverture de cette charge représente un faible déficit qui peut être couvert par un groupe électrogène au lieu d'un ensemble de 8 panneaux photovoltaïques. Pour le site de Tamanrasset, le potentiel éolien étant très faible alors que le potentiel solaire semble plus satisfaisant ainsi la couverture de la charge peut être effectuée par un ensemble de 32 panneaux photovoltaïques. A cette couverture rejoindre un groupe électrogène a été ajouter pour pouvoir remédier au déficit représenté par le système photovoltaïque durant les mois de septembre et mai. Par contre, pour le site de Batna, le potentiel énergétique solaire semble relativement faible pour la période hivernale. Ainsi la couverture de la charge sera surtout engendrée par un système éolien compensé par un ensemble de panneaux photovoltaïques.

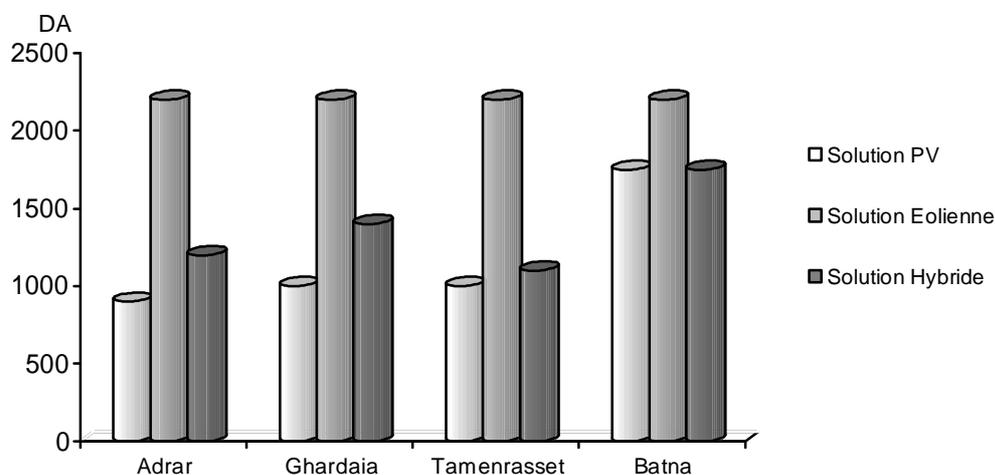


Figure 3-9 Présentation du prix total installé pour chacun des systèmes [Kou].

Ricardo Rüther étudié dans [Rüt] un système hybride Diesel / PV dans la région d'Amazonie (Brésil), les auteurs montre que ce système peut être l'option la plus compétitive, le tableau ci-dessous montre que dans ce modèle, l'utilisation des batteries n'offre aucun avantage.

| CAS | CONSOMMATION ANNUELLE DU DIESEL (L) | LA DIFFERENCE (L) |
|-----------------------------|-------------------------------------|-------------------|
| Diesel seul | 66.373 | ----- |
| Diesel+21KW PV | 58.747 | -7.626 |
| Diesel+10h Batterie | 68.554 | +2.181 |
| Diesel+10h Batterie+21KW PV | 58.735 | -7.638 |

Tableau 3-1 La consommation du diesel dans un système hybride (Diesel / PV) avec et sans batteries [Rüt].

V. Nayar a proposé dans [Nay] un système PV connecté au réseau trop perturbé (grid-connected) pour fournir la puissance non interrompue, ce modèle est constitué d'une batterie et d'un générateur diesel de réserve, Deux systèmes identiques ont été installés dans deux villes indiennes. Le système n'utilise pas la batterie pour rencontrer la charge quand le réseau est disponible, toutefois la batterie est utilisée pour compenser la puissance réactive exigée, ce modèle fonctionne depuis 1997 sans interruption (Figure 3-10)

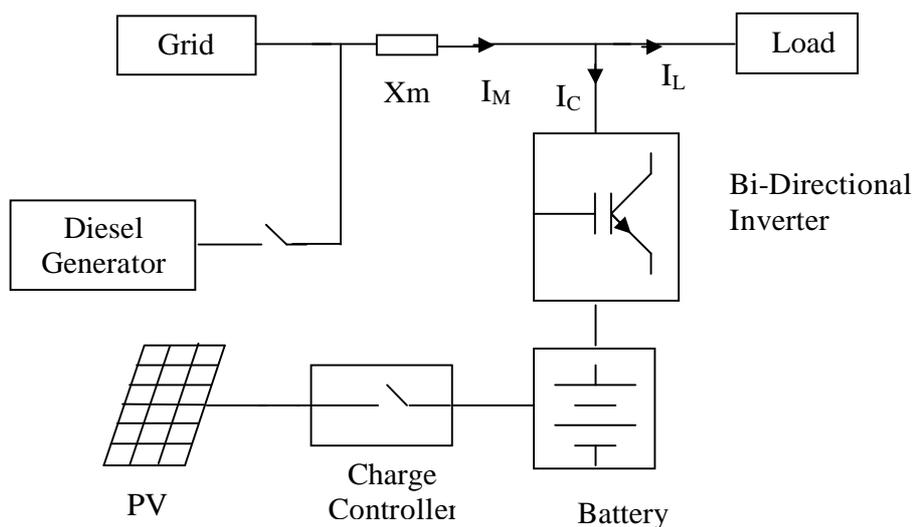


Figure 3-10 Modèle d'un système PV - Diesel connecté au réseau [Nay].

Dans les régions isolées alimentées par des centrales diesel (les îles par exemple), le recours à l'éolien paraît particulièrement intéressant [Site 10].

Selon l'article [War] de C. L. Warner, R.W. Taylor, C. M. Ribeiro, M. Moszkowicz, A. J. V. Borba, la région d'Amazonie (Brésil) est un endroit idéal pour les mini centrales isolées, il est extrêmement riche de ressources renouvelables (PV, éolien, biomasse, et hydroélectrique). Cette article nous donne deux exemples des microcentrales hybride pour alimenté deux villages isolé pour minimiser la consommation des carburants, et pour augmenté la duré de vie des générateurs diesel. Le premier est un système hybride (photovoltaïque + diesel + batterie), installer dans le village de Campinas. Le deuxième est un système hybride (photovoltaïque + éolien + batterie), installer dans le village de Joanes relié à la centrale de Salvaterra.

Selon les auteurs, le projet présente de nombreux avantages, une meilleur exploitation des ressources renouvelables, l'amélioration des conditions économiques et sociales pour les population rural due à la disponibilité d'une alimentation électrique fiable. Mais les coûts sont très hauts dans ces régions.

L'analyse de coût des trois modèles éolienne, photovoltaïque, et hybride éolienne photovoltaïque, sont présenté dans [Kel]. La comparaison du coût annuel montre que l'utilisation d'un système éolien autonome est la meilleure configuration pour le site d'étude (Montana), on plus il demande un minimum de capacité de stockage. L'étude de stabilité d'un système hybride éolien/PV est présenté dans [Wang 2004].

[Bor] a développé une méthode pour calculer le nombre optimal des batteries et des modules photovoltaïques pour un système autonome éolien/ photovoltaïque.

III.9. Conclusion

Le rôle d'un système hybride de production d'électricité sans interruption dans les régions isolées n'est pas seulement d'apporter « une puissance énergétique », mais un outil de développement social et économique des zones rurales.

D'après l'analyse faite sur les modèles existants, on distingue que le choix d'une microcentrale type dépend du cite d'implantation (conditions météorologiques).

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons d'abord la modélisation de la chaîne de conversion éolienne, puis suivra celle de la chaîne de conversion photovoltaïque. Nous souhaitons élaborer des modèles des deux systèmes de production afin de déterminer la puissance qu'ils peuvent nous fournir pour des conditions météorologiques données ou estimées.

IV.2. Modélisation de la chaîne de production éolienne

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique [Ela].

La multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs en Génie Electrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie [Poi]. Les différents types de générateurs électriques que l'on peut trouver sur des éoliennes ont présenté.

IV.2.1. Conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique

L'éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site [Gri].

IV.2.1.1 Théorie de Betz

La théorie globale du moteur éolien à axe horizontal a été établie par Albert Betz. A. Betz suppose que le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini en amont d'une vitesse V et à l'infini en aval d'une vitesse v .

La production d'énergie ne pouvant se faire que par la conversion de l'énergie cinétique, la vitesse v est nécessairement inférieure à V .

Soit donc :

V : La vitesse de l'air en amont.

v : La vitesse de l'air en aval.

V' : La vitesse qui traverse la surface S .

M : La masse d'air qui traverse l'éolienne.

r : La densité de l'air.

La variation d'énergie cinétique de l'air Δ_E est :

$$\Delta_E = \frac{1}{2} \cdot M \cdot (V^2 - v^2) \quad (\text{IV.1})$$

La puissance de l'éolienne P est alors :

$$P = \frac{1}{2} \cdot r \cdot S \cdot V' \cdot (V^2 - v^2) \quad (\text{IV.2})$$

Par ailleurs, la force de l'air (F) sur l'éolienne est :

$$F = r \cdot S \cdot V' \cdot (V - v) \quad (\text{IV.3})$$

D'où

$$P = F \cdot V' = r \cdot S \cdot V'^2 \cdot (V - v) \quad (\text{IV.4})$$

En identifiant les équations IV.2 et IV.4, il vient :

$$V' = \frac{V + v}{2} \quad (\text{IV.5})$$

Et donc :

$$P = \frac{1}{4} \cdot r \cdot S \cdot (V^2 - v^2) \cdot (V + v) \quad (\text{IV.6})$$

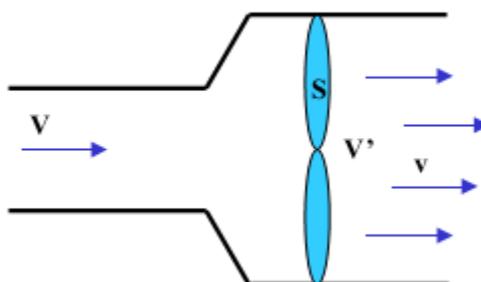


Figure 4-1 Théories de Betz schéma de principe [Rog].

La puissance de l'éolienne sera alors maximale quand sa dérivée $\frac{\partial P}{\partial v}$ sera nulle, soit pour $V = \frac{v}{3}$.

La puissance est alors maximale et vaut :

$$P = \frac{16}{27} \cdot \frac{r \cdot S \cdot V^3}{2} \quad (\text{IV.7})$$

On peut donc en déduire que même si la forme des pales permet d'obtenir $V = \frac{v}{3}$, on ne récupère au mieux que 0.593 fois l'énergie cinétique de la masse d'air amont. On écrira en notant la vitesse du vent amont $V = v_{wind}$

$$P = C_p \cdot \frac{r \cdot S \cdot v_{wind}^3}{2} \quad (\text{IV.8})$$

Où

C_p : est le coefficient de puissance de l'éolienne (valeur maximale 0.593).

Le coefficient C_p dépend de la vitesse du vent en amont v_{wind} , du nombre de pales, de leur rayon, de leur angle de calage et de leur vitesse de rotation.

En pratique, on atteint des valeurs de 0.45 à 0.5 pour les meilleures éoliennes actuelles [Rog]. Le ratio de vitesse est définie comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent:

$$I = \frac{R \cdot \Omega}{v} \quad (\text{IV.9})$$

L'évolution du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne. L'identification du coefficient de puissance est présentée dans [Ken] avec la méthode de Newton Raphson.

A partir de relevés réalisés sur une éolienne l'expression du coefficient de puissance a été approchée, pour ce type de turbine, par l'équation suivante [Ela] :

$$C_p = (0.5 - 0.167 \cdot b) \cdot \sin\left[\frac{p(I + 0.1)}{15 - 0.3b}\right] - 0.00184(I - 3) \cdot b \quad (\text{IV.10})$$

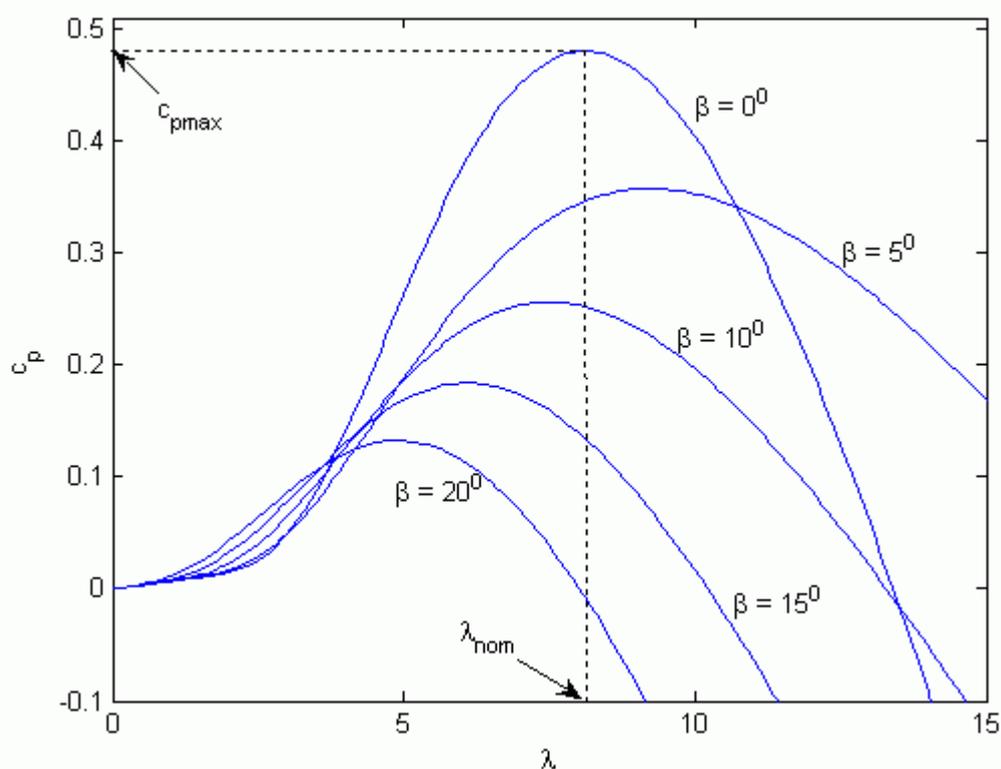


Figure 4-2 Le coefficient de puissance en fonction de ratio de vitesse λ et l'angle de calage b .

IV.2.1.2 Production d'énergie mécanique

La puissance mécanique récupérée par une turbine éolienne peut s'écrire sous la forme :

$$P_{aer} = C_p(I, b) \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \quad (\text{IV.11})$$

Où

C_p : Le coefficient aérodynamique de puissance de la turbine.

ρ : La densité de l'air (approx. 1.22 kg/m^3 à la pression atmosphérique à 15°C).

S : La surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale.

v : La vitesse du vent.

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique est donc directement déterminé par:

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (\text{IV.12})$$

IV.2.1.3 Le multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice (Figure 2-12). Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

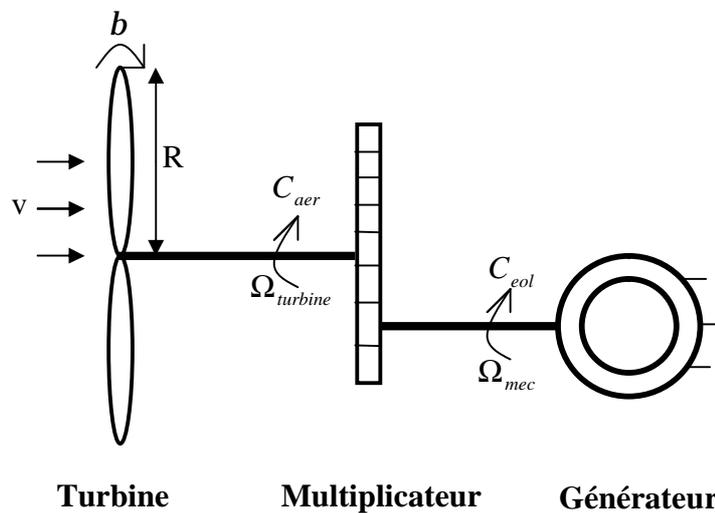


Figure 4-3 Schéma de la turbine éolienne.

$$C_r = \frac{C_{aer}}{G} \quad (\text{IV.13})$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (IV.14)$$

Avec :

G : Gain du multiplicateur de vitesse.

IV.2.1.4 Equation dynamique de l'arbre

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie $J_{turbine}$ et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine.

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_r \quad (IV.15)$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total (C_{mec}) appliqué au rotor :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (IV.16)$$

Où

J : est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice. Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{vis} , et le couple C_r .

$$C_{mec} = C_r - C_{em} - C_{vis} \quad (IV.17)$$

Le couple résistant du aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f :

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \quad (IV.18)$$

Le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine est représenté sur la Figure (4-4).

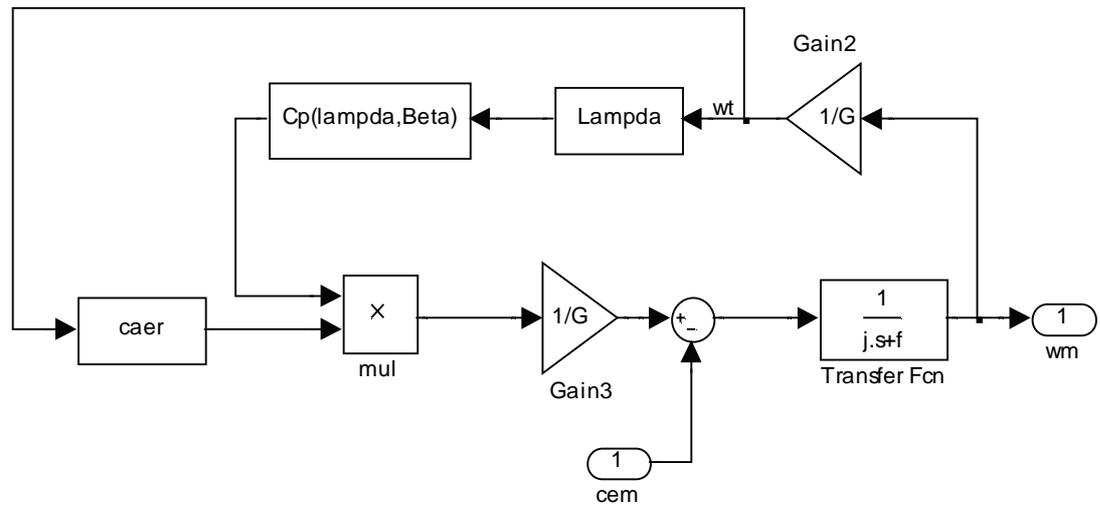


Figure 4-4 Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne [Matlab-Simulink].

IV.2.2. Les différentes chaînes de conversion d'énergie

On peut regrouper les générateurs éoliens selon différentes catégories. Ils peuvent être classés selon :

- Ø La nature du convertisseur électromécanique (machine synchrone, asynchrone, à courant continu...etc.).
- Ø La nature de l'accouplement mécanique (présence de multiplicateur de vitesse ou attaque directe).
- Ø Le type de fonctionnement (vitesse fixe ou variable).
- Ø Le type de capteur (à axe vertical ou horizontal).

Ces différentes catégories peuvent se croiser, par exemple, une éolienne peut être à vitesse variable, posséder un multiplicateur de vitesse et une génératrice asynchrone [Lud].

IV.2.3. Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne

Il existe sur le marché plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques [Mi].

IV.2.3.1 Générateur synchrone

C'est ce type de machine qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires).

Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien, ceux de 500 kW à 2 MW sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille. De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur - réseau, les fluctuations du couple capté par l'aéroturbine se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique produite. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau. Elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance. Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplés. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple dans le train de puissance.

Certaines variantes des machines synchrones peuvent fonctionner à de faibles vitesses de rotation et donc être directement couplées à l'aéroturbine. Elles permettent ainsi de se passer du multiplicateur, élément présent sur la plupart des aérogénérateurs et demandant un important travail de maintenance [Cam].

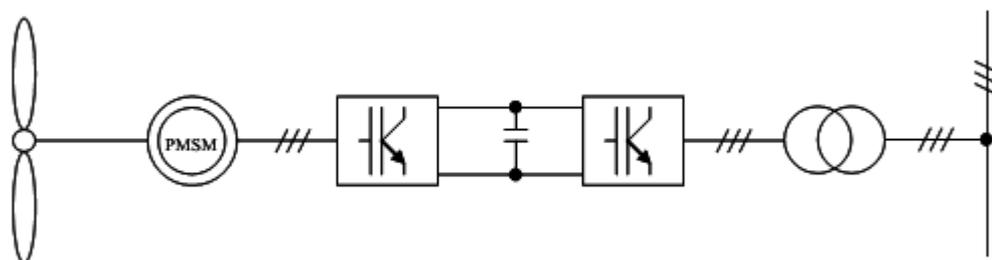


Figure 4-5 Système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents [Mi].

IV.2.3.2 Générateur Asynchrones

Il y a encore quelques années, pratiquement toutes les éoliennes fonctionnaient à vitesse fixe. Elles contenaient pour la plupart un générateur asynchrone à cage d'écureuil. C'est en grande partie les progrès technologiques réalisés sur les composants d'électronique de puissance et la réduction des prix correspondant qui ont rendu leur utilisation dans les nouveaux

aérogénérateurs possible. L'introduction de convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine électrique. Comme on l'a indiqué sur la Figure 4-6, ceci entraîne une amélioration du rendement énergétique du système.

La vitesse variable permet également d'améliorer la qualité de la puissance électrique produite, en introduisant de la souplesse dans la réaction du système face aux fluctuations brusques de la vitesse du vent. L'inconvénient principal de ce genre de système est le surcoût introduit par l'incorporation des convertisseurs de puissance. Ce coût dépendant de la taille de ces convertisseurs, il devient relativement important pour les éoliennes de grande taille. De plus les performances des composants électroniques utilisés par ces convertisseurs tels que les transistors IGBT diminuent à partir d'une certaine puissance.

Avec l'utilisation des machines asynchrones à rotor bobiné, la plus grande partie de la puissance est directement distribuée au réseau par le stator et moins de 25% de la puissance totale passe par les convertisseurs de puissance à travers le rotor. Ceci donne l'occasion d'utiliser des convertisseurs plus petits et donc moins coûteux. L'inconvénient de ce système est la présence de balais au rotor, ce qui demande un travail de maintenance plus important.

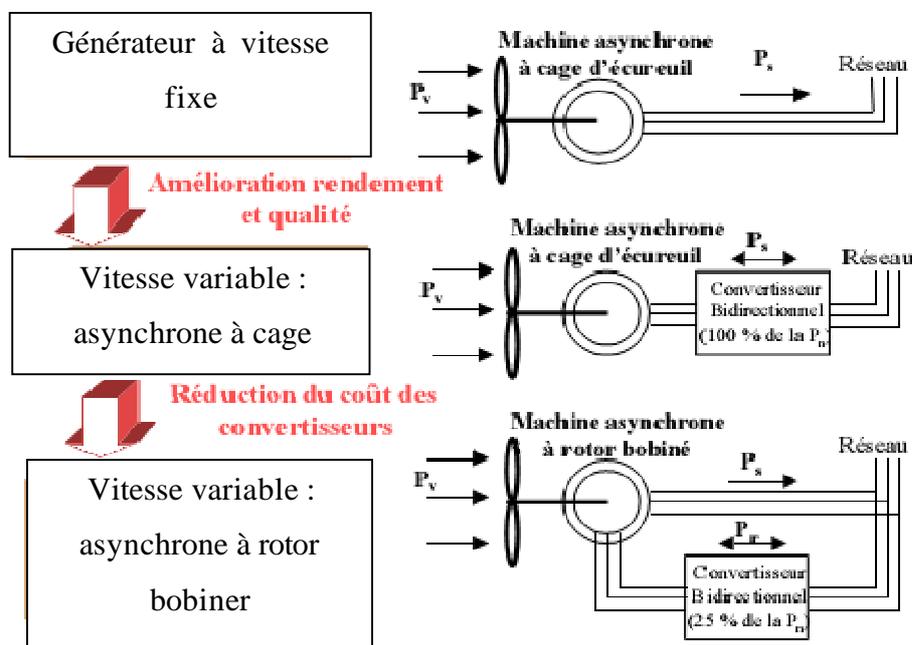


Figure 4-6 Evolution de la configuration électrique [Cam].

Deux variantes de ces machines synchrones et asynchrones pourraient se développer dans les prochaines années : des générateurs synchrones à aimant permanent directement couplés à la

turbine (Jeumont, Lagerwey, WinWind, Windformer) ou des générateurs asynchrones doublement alimenté au stator. Ce dernier n'est pas encore complètement au point mais aurait un avantage sur les Générateurs Asynchrones Doublement Alimentés (GADA) à rotor bobiné, puisqu'il n'a pas de bagues, élément des machines asynchrones à rotor bobiné demandant une certaine maintenance.

Même si elles ne sont pas utilisées dans l'industrie éolienne, d'autres types de machines auraient techniquement la possibilité d'être utilisées dans notamment les aérogénérateurs à vitesse variable. Les machines à courant continu présentent une excellente marge de variation de la vitesse de rotation, une bonne réponse dynamique et une excellente capacité de surcharge, mais elles sont chères et ont un grand poids. Les générateurs à réluctances variables sont des machines mécaniquement robustes, ils ont de plus un bon rendement à toutes les vitesses et un large marge de variation de la vitesse de rotation et leur commande est simple. Ce type de machine pourrait être un candidat pour de futures éoliennes [Cam].

Aujourd'hui, 80% des nouveaux aérogénérateurs contiennent des Générateurs Asynchrones Doublement Alimenté (à rotor bobiné). C'est le type de machine choisi pour l'étude de recherche menée dans cette thèse. Cette machine est également étudiée par exemple dans [Ela], [Dri], [Poi], [Cam].

IV.2.4. Modélisation mathématique de la Machine Asynchrones Doublement Alimenté

IV.2.4.1. Equations mathématiques de la MADA

Les modèles des machines électriques les plus utilisés sont basés sur la théorie unifiée des machines électriques. Cette théorie est basée sur la transformation de park, qui rapport les équations électriques statoriques et rotoriques à un système cartésien d'axes dq .

IV.2.4.1.1 Axes de repères classiques

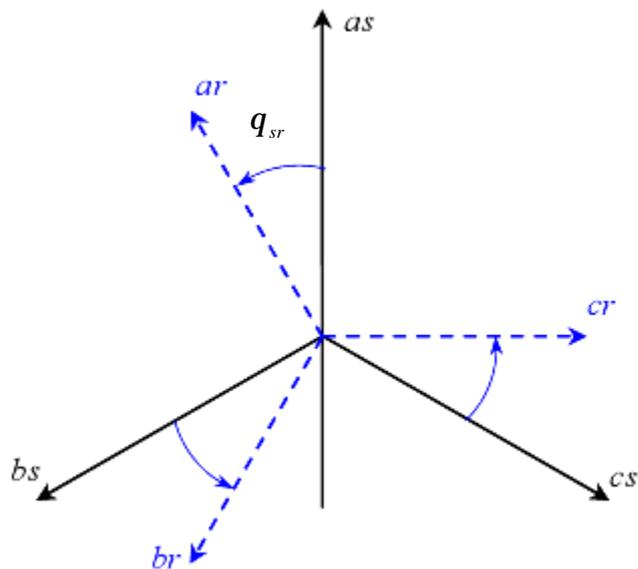


Figure 4-7 Axes de repères classiques

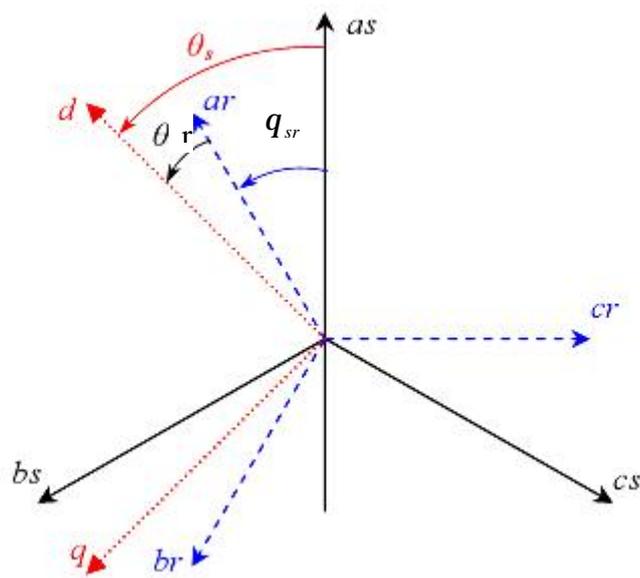


Figure 4-8 Axes de repères dq .

L'angle q_{sr} donne la position du rotor par rapport au stator.

Pour passer du système triphasé abc, au système biphasé dq, (et réciproquement) il faut utiliser la transformations de park.

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_h \end{bmatrix} = [P] \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (\text{IV.19})$$

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = [P]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_h \end{bmatrix} \quad (\text{IV.20})$$

Où

x_a, x_b, x_c : Sont les valeurs instantanées des grandeurs triphasées.

x_d, x_q : Sont les valeurs instantanées des grandeurs biphasées.

x_h : La composante homopolaire.

$[P]$: La matrice de park.

$[P]^{-1}$: La matrice inverse de park.

Les matrices de park sont données ensuite :

$$[P] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos q & \cos(q - \frac{2p}{3}) & \cos(q - \frac{4p}{3}) \\ -\sin q & -\sin(q - \frac{2p}{3}) & -\sin(q - \frac{4p}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.21})$$

$$[P]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos q & -\sin q & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(q - \frac{2p}{3}) & -\sin(q - \frac{2p}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(q - \frac{4p}{3}) & -\sin(q - \frac{4p}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.22})$$

Où

q est l'angle entre l'axe d et l'axe de référence dans le système triphasé (q_s pour les grandeurs statorique et q_r pour les grandeurs rotorique).

Les équations électriques de la MADA sont écrites dans le système dq orienté selon le rotor Figure (4-8).

IV.2.4.1.2 Tensions statoriques et rotoriques

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} y_{sd} - \frac{dq_s}{dt} y_{sq} \quad (\text{IV.23})$$

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} y_{sq} + \frac{dq_s}{dt} y_{sd} \quad (\text{IV.24})$$

$$v_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} y_{rd} - \frac{dq_r}{dt} y_{rq} \quad (\text{IV.25})$$

$$v_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d}{dt} y_{rq} + \frac{dq_r}{dt} y_{rd} \quad (\text{IV.26})$$

IV.2.4.1.3 Flux statoriques et rotoriques

$$y_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \quad (\text{IV.27})$$

$$y_{sq} = L_s i_{sq} + M i_{rq} \quad (\text{IV.28})$$

$$y_{rd} = L_r i_{rd} + M i_{sd} \quad (\text{IV.29})$$

$$y_{rq} = L_r i_{rq} + M i_{sq} \quad (\text{IV.30})$$

IV.2.4.1.4 Equation mécanique

$$C_{em} = C_r + J \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega \quad (\text{IV.31})$$

Où :

i_d, i_q : Les courants statoriques.

v_{d,v_q} : Les tensions statoriques.

$y_{s_{d,q}}, y_{r_{d,q}}$: Flux statoriques et rotoriques diphasés dans un repère tournant.

R_s, R_r : Résistance statorique, rotorique.

L_s, L_r : Inductances cyclique propre statorique, rotorique.

M : Inductances cyclique mutuelle stator-rotor.

p : Nombre de paires de pôles de la machine.

$$w_r = \frac{dq_r}{dt} \quad (\text{IV.32})$$

w_r : Vitesse angulaire (pulsation) électrique du rotor.

C_r : Couple résistant.

C_{em} : Couple électromagnétique.

Ω : Vitesse de rotation de la machine.

IV.3. Modélisation des panneaux photovoltaïques

Un panneau solaire est, comme nous venons de le signaler, une source de courant mise en parallèle avec des diodes. Nous allons donc expliquer la formule utilisée pour la simulation :

$$I_{SA}(V_{SA}, I_{SC}, T) = I_{SC} \left[1 - e^{-\frac{V_{SA} - V_{OC}(T)}{N \cdot V_T(T)}} \right] \quad (\text{IV.33})$$

I_{sc} : Le courant de court-circuit du panneau solaire, c'est lui qu'on trouve lorsque le panneau se comporte purement en source de courant.

V_{sa} : La tension du panneau solaire.

V_{oc} : La tension circuit ouvert.

V_T : La tension de seuil de la diode.

N : Le nombre de cellules.

Ce qui fait que $N \cdot V_T$ représente en quelque sorte la tension de seuil du panneau tout entier.

$V_T(T)$ Peut se trouver par la formule suivante :

$$V_T(T) = \frac{K.T}{q} \quad (\text{IV.34})$$

Avec :

K : La constante de Boltzmann et qui vaut $1.38 \cdot 10^{-23}$ Joule/K.

q : La charge d'un électron et vaut $1.6 \cdot 10^{-19}$ Coulombs.

IV.3.1. Panneau solaire réglable sur Matlab

Voici le schéma global qui réalise l'équation générale du panneau solaire :

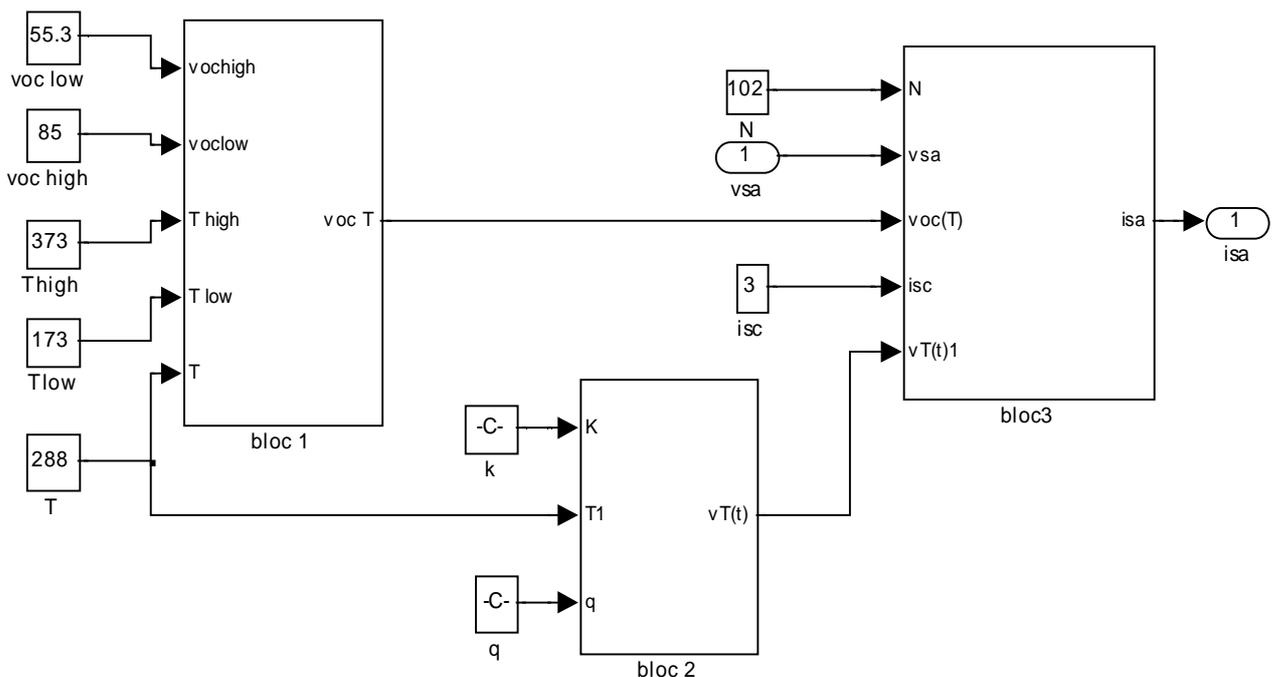


Figure 4-9 Schéma global du Panneau solaire réglable sur Matlab.

IV.3.2. La caractéristique I (V) d'une cellule photovoltaïque

Dans la littérature, il existe plusieurs modèles mathématiques qui décrivent le fonctionnement et le comportement du générateur photovoltaïque. Ces modèles se différencient par la procédure de calcul, la précision et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de la caractéristique courant-tension [Ham 2005].

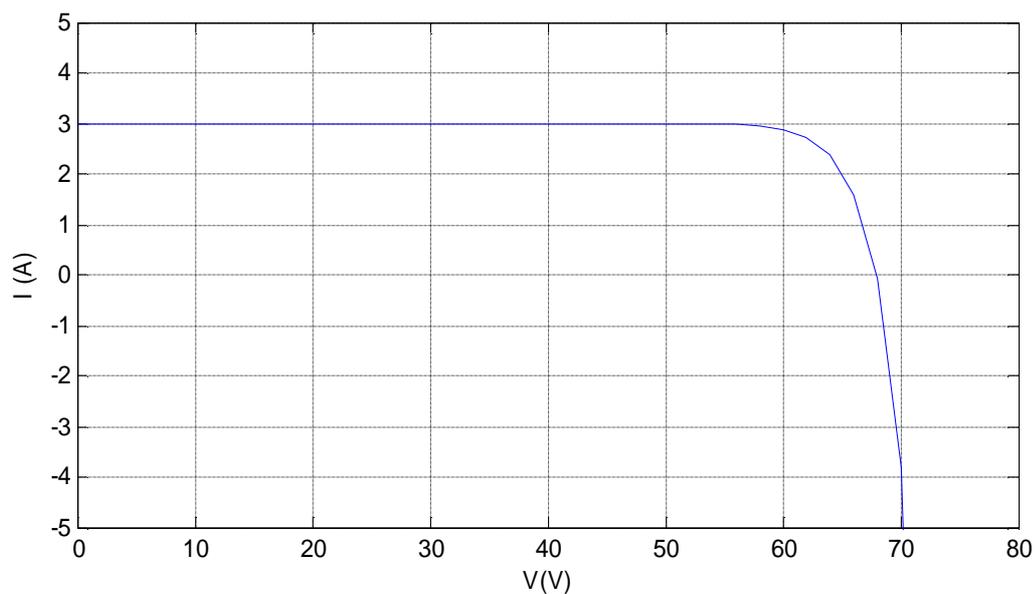


Figure 4-10 Caractéristique I (V).

IV.3.3. La puissance

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairage, température, vitesse de circulation de l'air ambiant...etc.), la puissance électrique P (W) disponible aux bornes d'une cellule PV est égale au produit du courant continu fourni (I) par une tension continue donnée (V).

$$P = V \cdot I \quad (\text{IV.35})$$

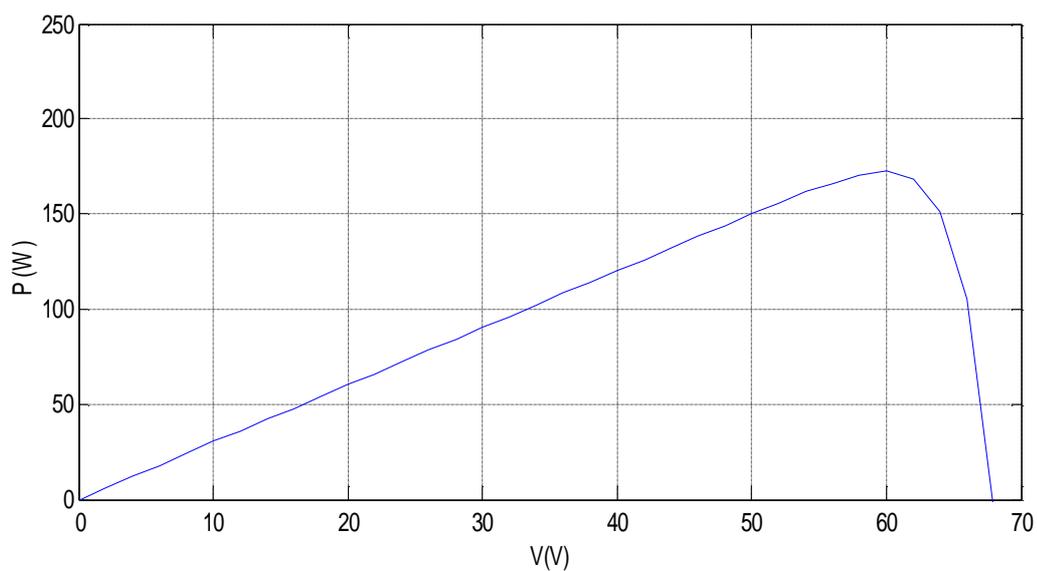


Figure 4-11 Caractéristique P (V).

IV.4. Couplage des deux chaînes

L'objet de l'étude comporte un système photovoltaïque associé à un générateur éolien. Le couplage des deux systèmes est fait par l'intermédiaire d'un bus continu. Il est donc nécessaire d'avoir le modèle mathématique de ce circuit. Dans la Figure 4-12 est présenté en détail le bus à courant continu et on peut voir qu'il est représenté par le condensateur C ou sont connectés tous le bus continu des convertisseurs électroniques de puissance.

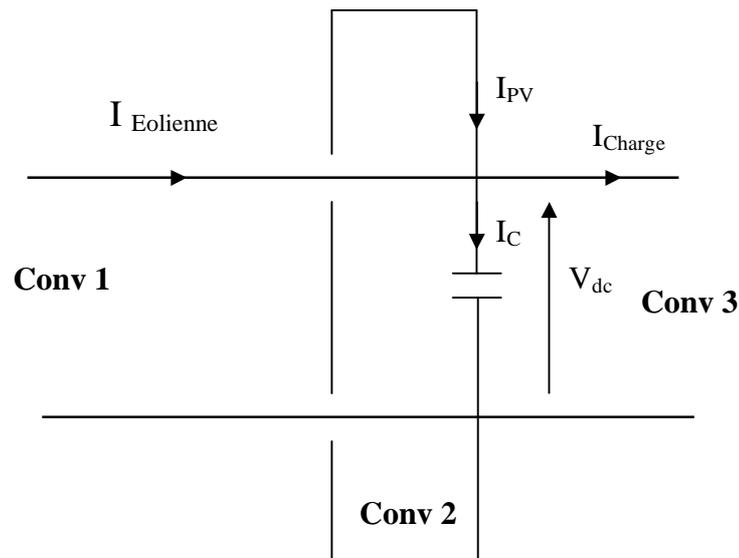


Figure 4-12 Modèle du bus à courant continu.

A partir de la Figure 4-12, on peut écrire l'équation suivante :

$$i_c = i_{PV} + i_{Eolienne} - i_{charge} \quad (\text{IV.36})$$

La tension V_{dc} est une fonction du courant i_c :

$$i_c = C \frac{dV_c}{dt} \quad (\text{IV.37})$$

Avec :

C : la capacité du condensateur.

A partir de ces équations, on a réalisé le schéma de la Figure 4-13, où est modélisé le bus continu.

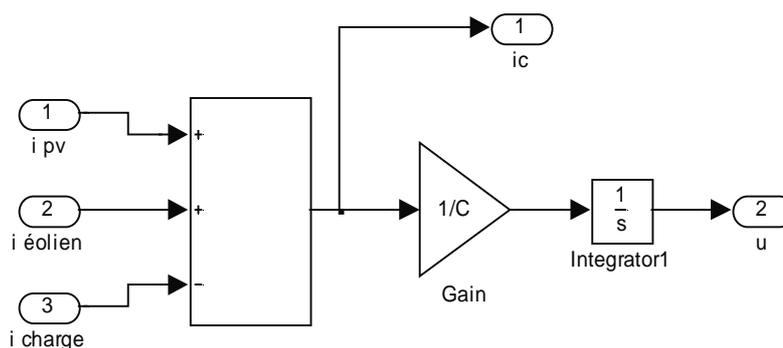


Figure 4-13 Modèle Simulink du bus continu.

IV.5. Résultats de simulation

Dans cette partie, quelques résultats de simulation d’une éolienne à vitesse variable reposant sur la machine asynchrone à double alimentation obtenue sous MATLAB-SIMULINK ont présenté, (dont les paramètres sont fournis en annexe).

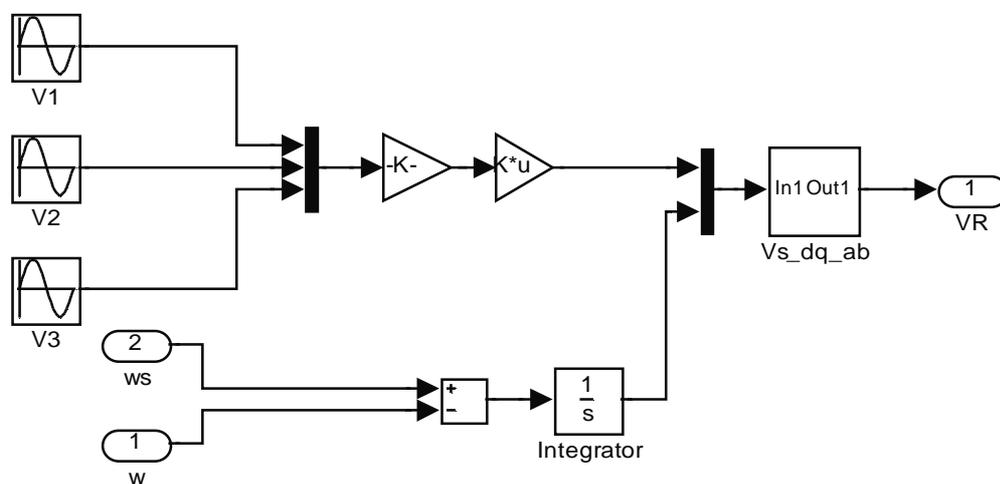


Figure 4-14 Schéma de l'alimentation rotorique.

Nous avons alimenté notre GADA par une machine asynchrone, qui donne la vitesse mécanique de la Figure 4-15, qui établi à 1500tr/min après un régime transitoire de 0.25s.

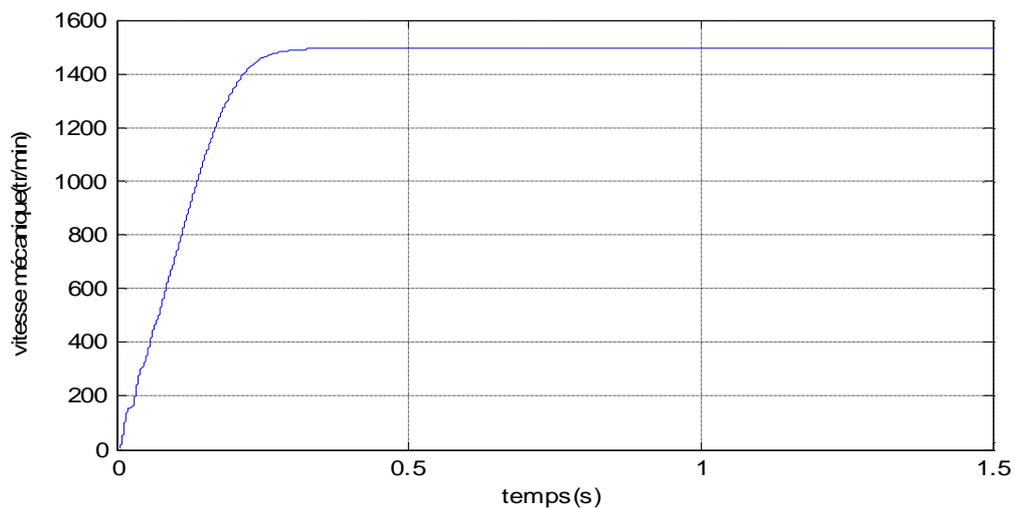


Figure 4-15 La vitesse mécanique

La Figure 4-16 présente le couple électromagnétique, on remarque des ondulations importantes pendant le régime transitoire, ainsi un régime établi de -20 N.m.

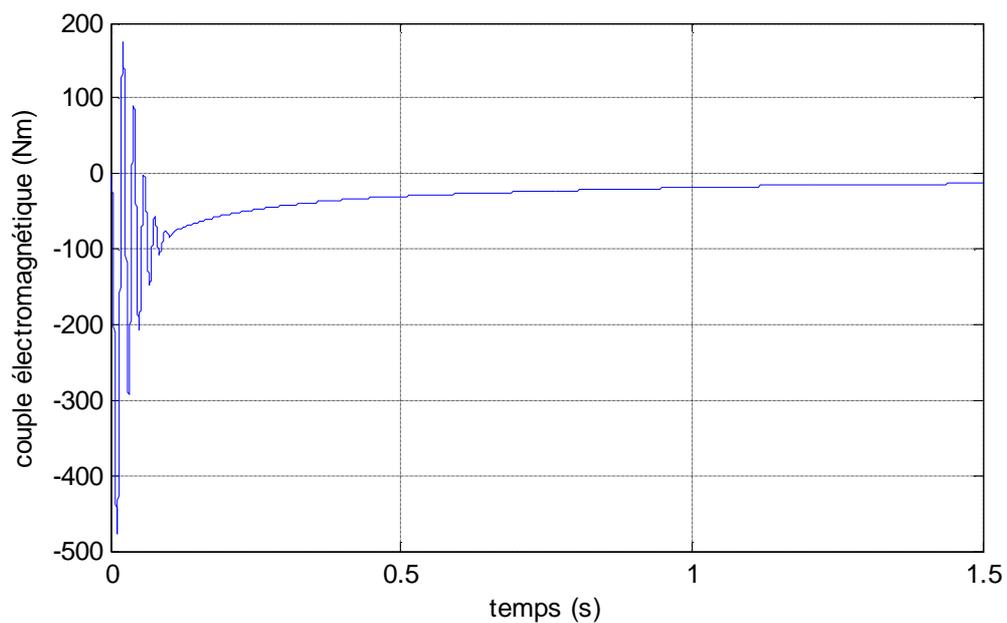


Figure 4-16 Le couple électromagnétique

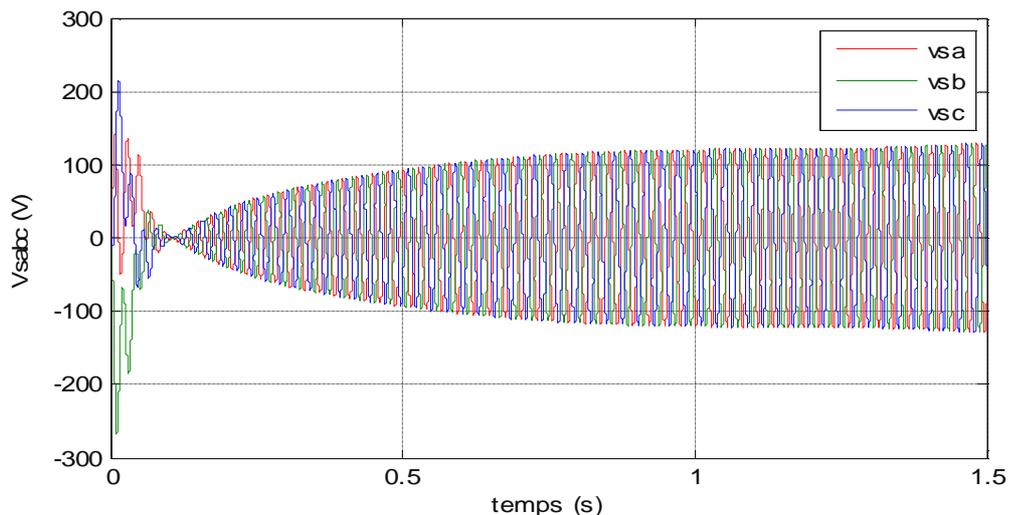


Figure 4-17 Tensions statoriques Vsabc (V) généré par la GADA

La Figure 4-17 montre les courbes des tensions statoriques générées par la génératrice. On remarque un régime établi dans la Figure 4-18.

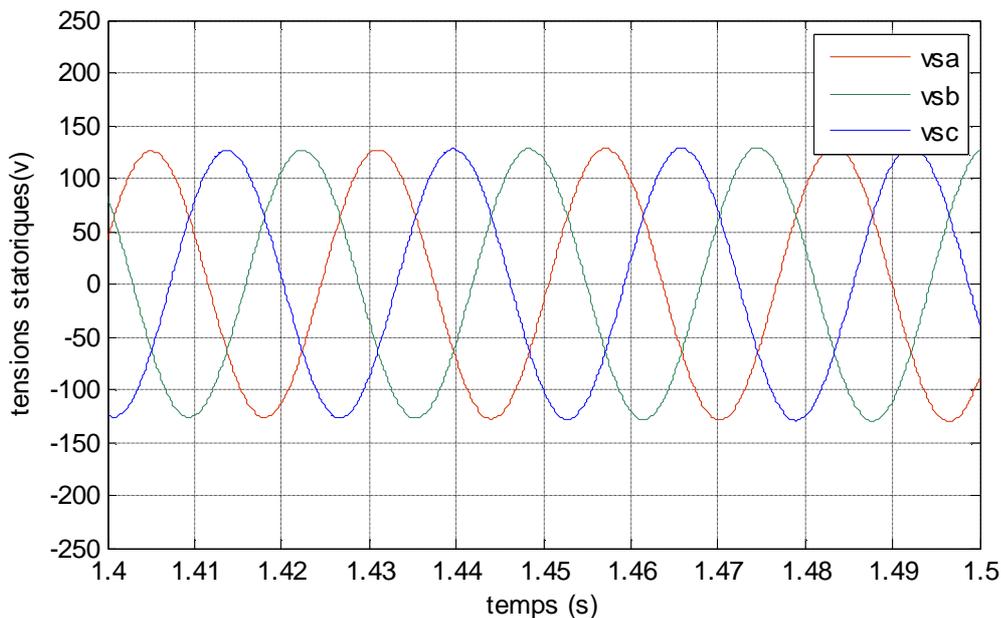


Figure 4-18 Tensions statoriques Vsabc (V) généré par la GADA (Zoom)

Dans la Figure 4-19, les courants statoriques au démarrage sont plus importants, puis établis après un régime transitoire.

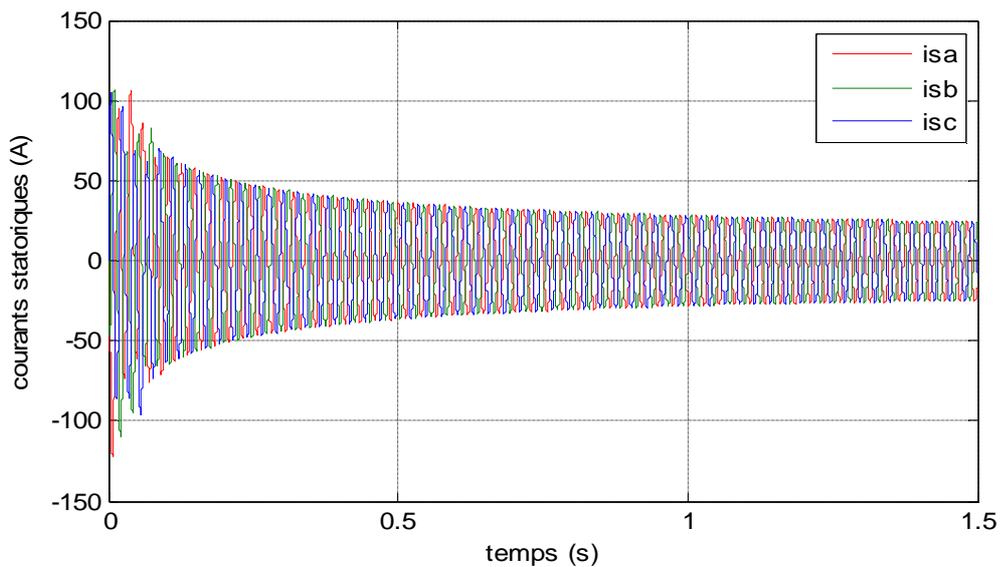


Figure 4-19 Courants statoriques isabc (A) généré par la GADA.

La Figure 4-20, présente plus claire le régime permanent des courants statoriques.

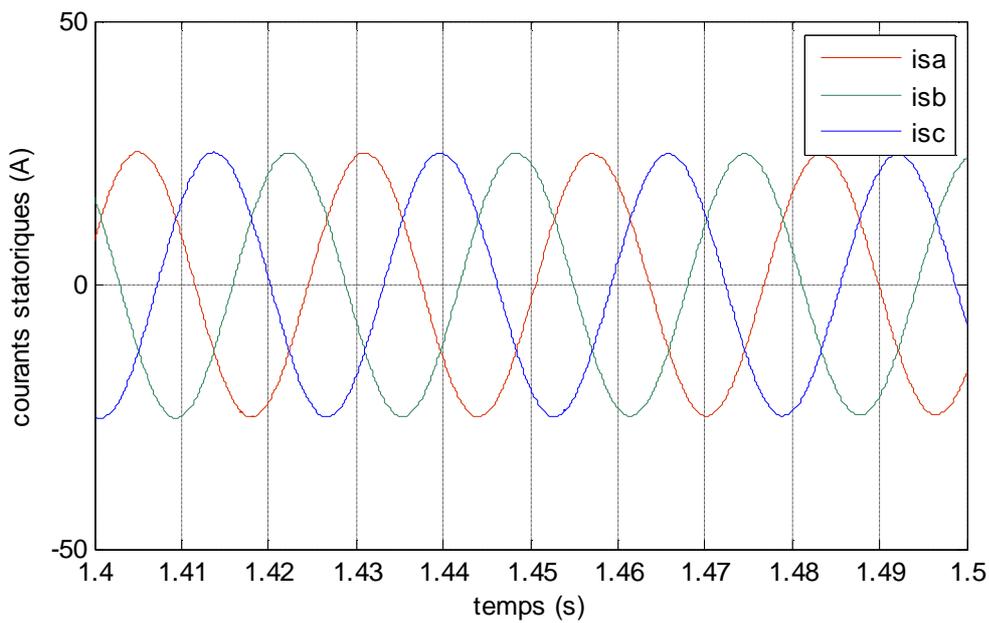
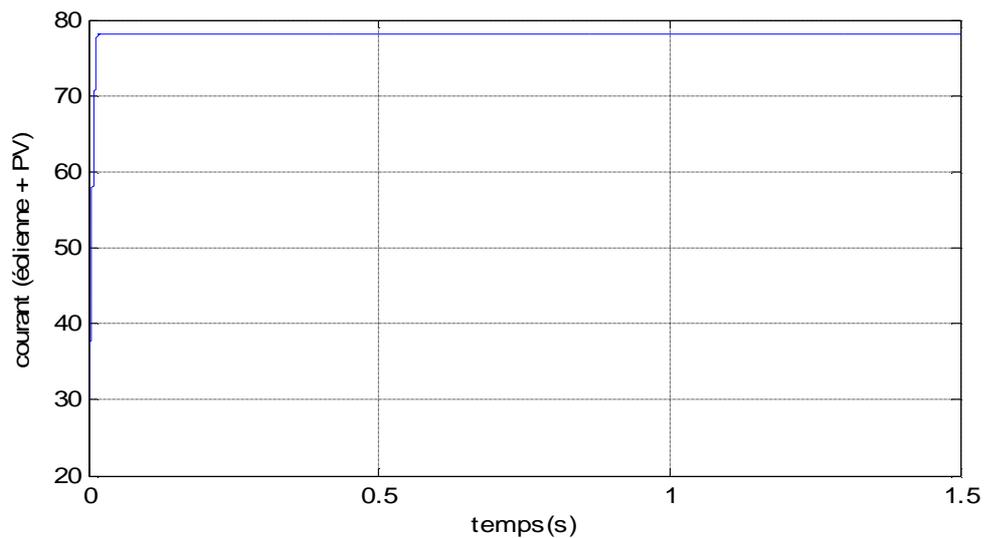


Figure 4-20 Courants statoriques isabc (A) généré par la GADA (Zoom)



4-23 Courant totale généré par le système hybride (photovoltaïque + éolienne)

Les tensions et les courants de la charge sont présentés dans les Figures suivants :

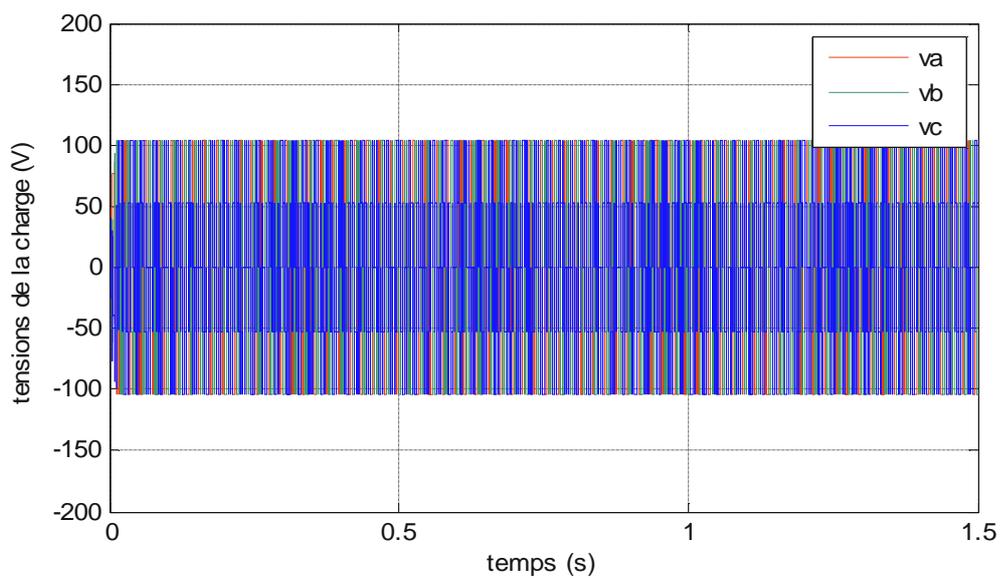


Figure 4-24 Tensions de la charge vabc (V)

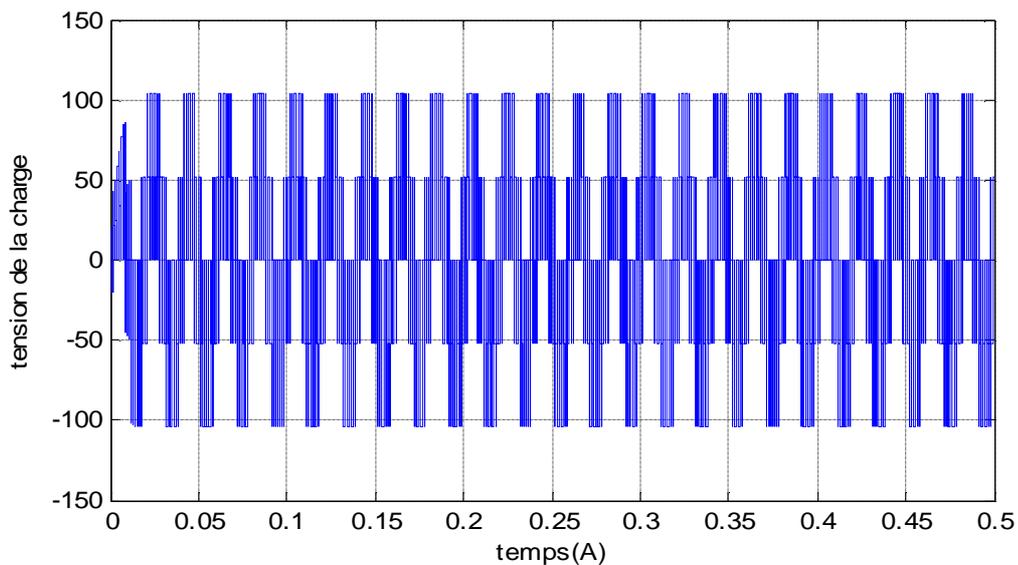


Figure 4-25 Tensions de la charge d'une phase va (Zoom)

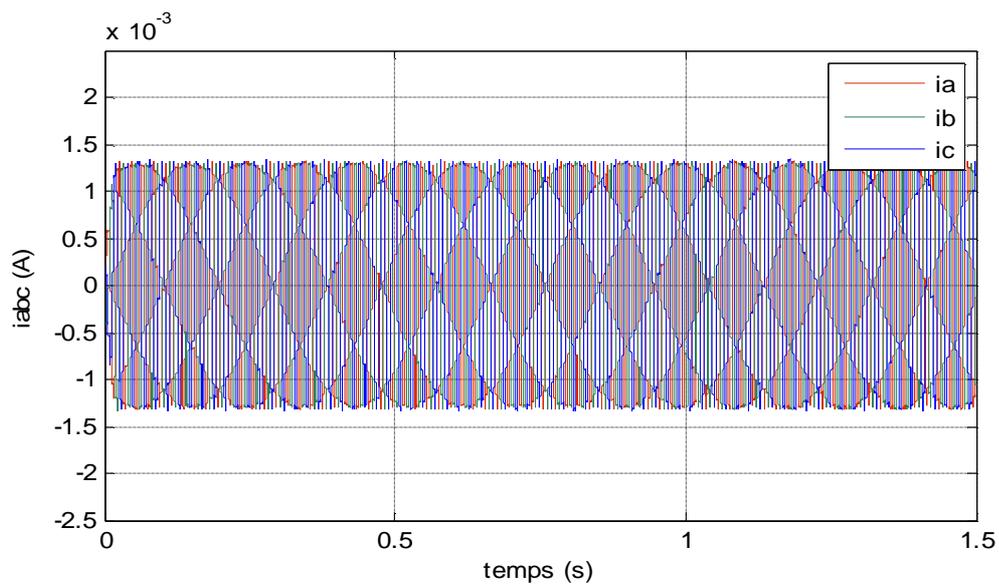


Figure 4-26 Courants de la charge iabc (A)

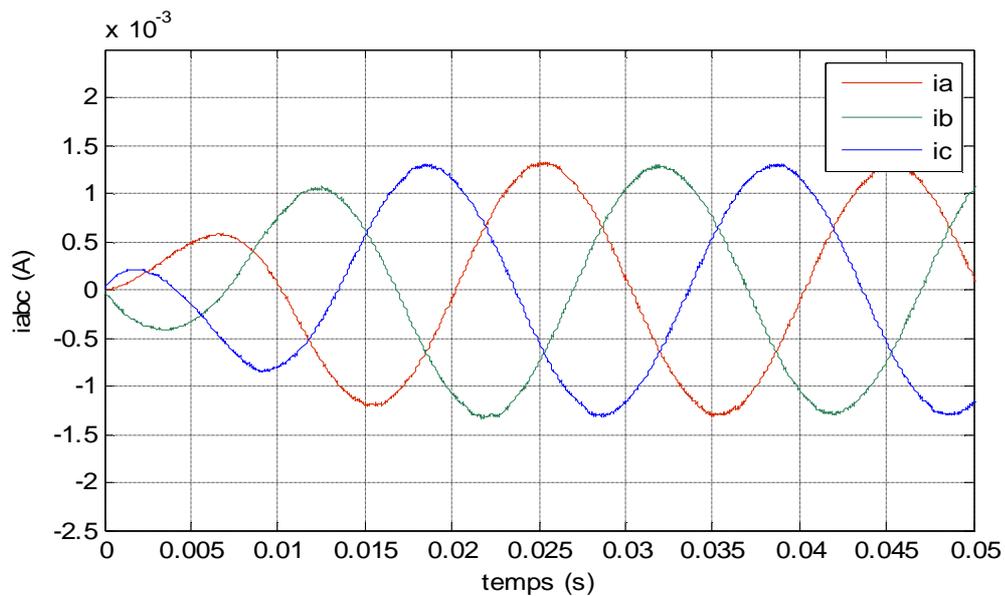


Figure 4-27 Courants de la charge iabc (A) (Zoom)

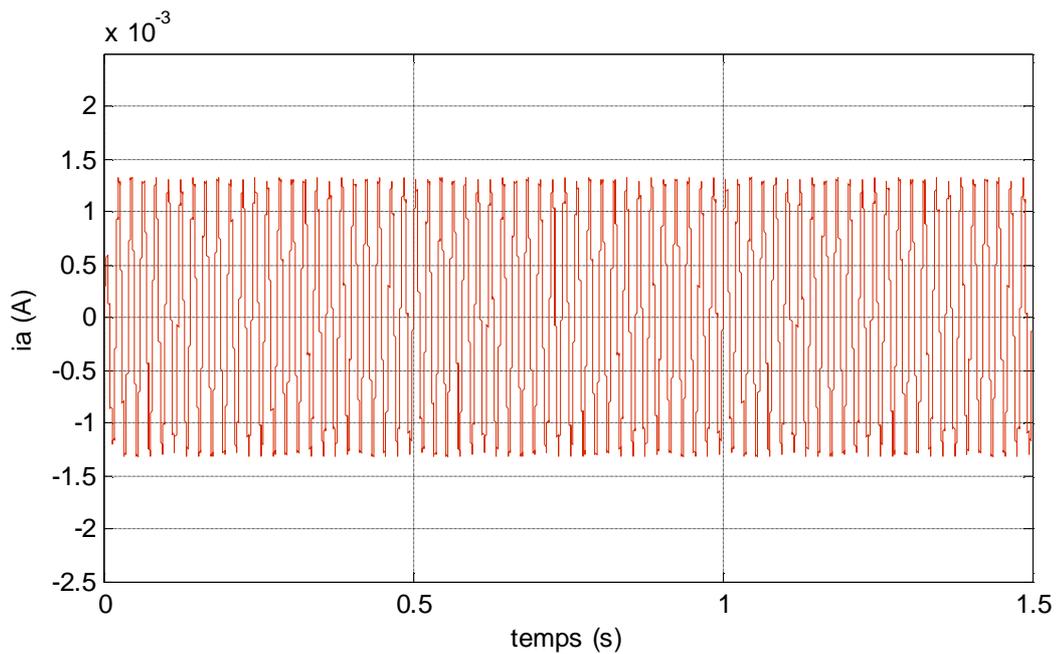


Figure 4-28 Courants de la charge d'une seule phase ia (A).

IV.6. Conclusion

Notre étude a porté sur la modélisation et la simulation d'un système hybride combinant deux sources d'énergies renouvelables qui sont l'éolien et le solaire. Un modèle de simulation a été mis au point pour prédire le comportement du système en entier. Nous avons étudié les deux chaînes de conversion éolienne et photovoltaïque. Nous avons décrit les différentes chaînes de conversion d'énergie éolienne, le couplage des deux sources avec la présentation des résultats de simulation.

Conclusion générale

Les travaux présentés dans cette thèse concernent les systèmes de production d'électricité décentralisés capables d'un fonctionnement autonome. Le premier chapitre de cette thèse permis de présentée une brève description du domaine des énergies renouvelables existantes. Nous tentons d'identifier les causes de la pollution atmosphérique et ses effets sur les écosystèmes vivants. La production d'énergie basée sur les énergies renouvelables constitue un excellent moyen de protéger l'environnement et d'acquérir une sécurité à long terme sur le plan énergétique

Dans le deuxième chapitre, nous nous sommes intéressés à la production d'électricité éolienne et photovoltaïque qui devient de plus en plus compétitives au point de vue économique. Ainsi les différentes solutions technologiques permettant d'exploiter les ressources solaire et éolienne.

Pour assurer une plus grande disponibilité en énergie, plusieurs ressources renouvelables peuvent être interconnectées ensemble (éolien – photovoltaïque – générateur diesel – piles à combustibles). Des études sont en cours sur ce sujet et concernent les modes d'interconnexion et de gestion de systèmes multi sources. Dans le troisième chapitre, nous avons décrit une synthèse des différentes structures existantes.

Le quatrième chapitre prévoit le couplage d'un simulateur de panneaux photovoltaïques avec un générateur éolien, ce chapitre présente la modélisation d'un système de génération d'énergie éolienne, basé sur une machine asynchrone à double alimentation, ensuite la modélisation d'un système de conversion photovoltaïque, le couplage des deux systèmes est fait par l'intermédiaire d'un bus continu. Dans le dernier partie de ce chapitre, quelques résultats de simulation d'une éolienne à vitesse variable reposant sur la machine asynchrone à double alimentation associé à un système photovoltaïque obtenue sous MATLAB-SIMULINK ont présenté.

L'ensemble de ces études peut être poursuivi et complété par des perspectives pouvant contribuer à l'amélioration des micros réseaux :

- Ø Associer des dispositifs de stockage et des générateurs diesel.
- Ø Application de plus de commandes pour l'énergie éolienne par exemple les modèles de simulation des aérogénérateurs à vitesse variable avec régulation pitch.

- Ø Étudié les techniques de recherche du point de puissance maximale (techniques dites MPPT) pour les deux chaînes de conversion éolienne et photovoltaïque.
- Ø Étudié la gestion des systèmes multi sources c à d réaliser des optimisations sur des critères de minimisation du coût.

Bibliographie

- [Ach] N. Achaïbou, “ Introduction à l’Etude du Système de Stockage dans un Système Photovoltaïque”, Rev. Energ. Ren. : Valorisation (1999), pp. 1-6.
- [Ada] Achilles Adamantiades, Ernesto Terrado, “The World Bank’s solar initiative objectives, accomplishments, and plans”, IEEE 1996, pp. 2256-2262.
- [Ahn] Jun Youn Ahn, Jong Hu Park, B. H. Cho , G. J. Yu, “Dual-Module Based Maximum Power Point Tracking Control of PV System ”, IEEE 2004, pp. 1509-1514.
- [Alo] Corinne Alonso, “ Contribution à l’optimisation, la gestion et le traitement de l’énergie” Thèse de doctorat, 12 Décembre 2003, Université Paul Sabatier – Toulouse III.
- [Alt] L.H. Atlas, A.M. Sharaf, “A Novel On-Line MPP Search Algorithm For PV Arrays”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 11, No. 4, December 1996, pp. 748-754.
- [Ama] Yacine AMARA, “Contribution à la conception et à la commande des machines synchrones à double excitation Application au véhicule hybride”, Thèse de doctorat, 21 décembre 2001, L’université Paris XI.
- [Ami] Jim Watson AMIEE, “Climate change technology and realpolitik”, IEE Review March 2001, pp. 25-30.
- [Bar] S. M. Barakati, M. Kazerani, Senior Member, IEEE, and X. Chen, “A New Wind Turbine Generation System Based on Matrix Converter”, Department of Electrical & Computer Engineering, University of Waterloo, Canada, 2005, pp. 1-7.
- [BEL] BELHADJ JAMEL. “ Commande Directe en Couple d’une Machine Asynchrone - Structures d’observation - Application aux systèmes multimachines-multiconvertisseurs ”, 07 juillet 2001. L’institut National Polytechnique de Toulouse.

[Ben] M.T. Benmessaoud, F.Z. Zerhouni, A. Boudghene Stambouli, M. Tioursi, “ Modélisation d’un Générateur Energétique Hybride PV-PAC ”, Second International Conference on Electrical Systems ICES’06, May 08-10 2006, Oum El Bouaghi Algeria, pp. 184-189.

[Bil] R. Billinton, R. Karki, “Maintaining supply reliability of small isolated power systems using renewable energy”, IEE Proceedings on line No 20010562, Vol. 148, No. 6, November 2001, pp. 530-534.

[Bor] Bogdan S. Borowy, Ziad M. Salameh, “Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and PV array in a wind/PV hybrid system”, IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 11, No. 2, June 1996, pp. 367.375.

[Bra] A. Iuliana BRATCU, I. MUNTEANU, D. Cristina CERNEGA, “ Modélisation À Événements Discrets D’un Système Éolien À Vitesse Variable En Vue De La Commande Supervisée”, 6^{ème} Conférence Francophone de Modélisation et Simulation - MOSIM’06 - du 3 au 5 avril 2006 – Rabat- Maroc.

[Bre] Paola Bresesti, Roberto Calisti, Dario Provenzano, Andrea Vaiani, Bruna Zecca, “Probabilistic Model for Adequacy Evaluation of Electric Networks with Sizeable Wind Power Generation”, IEEE 2004.

[Bro] A. Brown, I. Page, “Environmental Studies in the Department of Energy’s Renewable Energy Programmes”.

[Bul] Standley R. Bull “Renewable Energy Today and Tomorrow”, Proceedings of the IEEE, Vol. 89, No. 8, August 2001, pp.1216-1226.

[Bus] Séverine Busquet, “Etude d’un système autonome de production d’énergie couplant un champ photovoltaïque, un électrolyseur et un pile a combustible : réalisation d’un banc d’essai et modélisation ”, Thèse de doctorat, de l’Ecole des Mines de Paris, 15 décembre 2003.

[Cam] H.Camblong, “Minimisation de l’impact des perturbations d’origine éolienne dans la génération d’électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable”, Thèse de doctorat, 18

décembre 2003, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux, N° d'ordre : 2003-22.

[Cár] R. Cárdena, R. Pena, G. Asher, J. Clare, "Sensorless Control Strategy For Power Smoothing In Wind- Diesel Applications", *Electronic letters*, 24 October 2002, Vol. 38, No. 22, pp. 1402-1403.

[Cha] Liuchen Chang, "Systèmes de conversion de l'énergie éolienne", *IEEE Canadian Review - Summer / Été 2002*, pp. 1-5.

[Cha 2006] Benoudjit chalabia, Benoudjit Azzeddine, Fatiha Youcef Ettoumi, "Design of a Wind power System For the Site of Ain Amenas (Algeria) ", *Second International Conference on Electrical Systems ICES'06*, May 08-10 2006, Oum El Bouaghi Algeria, pp. 190-195.

[Dan 2004] S. Arul Daniel, N. AmmasaiGounden, "A Novel Hybrid Isolated Generating System Based on PV Fed Inverter-Assisted Wind-Driven Induction Generators", *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, VOL. 19, NO. 2, JUNE 2004, pp. 416-422.

[Dat] R.Datta, V. T. Ranganathan, "A Method of Tracking the Peak Power Points for a Variable Speed Wind Energy Conversion System", *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, Vol. 18, No. 1 MARCH 2003, pp.163-168.

[Dev] Satinderpaul Singh Devgan, "Impact of Environmental Factors on the Economic Evaluation of Renewable Energy Alternative", *IEEE 2001*, pp. 123-126.

[Dri] S. Drid Said, M. S. Nait-Said, A. Makouf, M. Tadjine, "Doubly Fed Induction Generator Modeling and Scalar Controlled for Supplying an Isolated Site", *Second International Conference on Electrical Systems ICES'06*, May 08-10 2006, Oum El Bouaghi Algeria, pp. 42-47.

[Ela] S. El Aimani, "Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension", *Thèse de doctorat, L'université des sciences et technologies de Lille (USTL)*.

[Ela 2002] S. El Aïmani, B. François, B. Robyns, “Modélisation de générateurs éoliens a vitesse variable connectés a un bus commun ”, FIER’ 2002, Tétouan - Maroc, pp. 356-362.

[Erg] Thomas Erge’, Lim Chin Had, “PV in buildings for Malisia: prototype solar house”, 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion May, 11-18. 2003 Osaka, Japan, pp. 2358-2361.

[Fic] Nicolas Fichaux, “ Evaluation Du Potentiel Eolien Offshore Et Imagerie Satellitale”, Thèse de doctorat, 2 Décembre 2003, L'école des Mines de Paris.

[Fre] L. L. Freris, “Harnessing the wind”, Power engineering journal, September 1992.

[Ger] Olivier Gergaud, “Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur”, Thèse de doctorat, 9 décembre 2002, Antenne de Bretagne de l'École Normale Supérieure de Cachan.

[Ger 2001] O. Gergaud, B. Multon, H. Ben Ahmed, “ Modélisation d'une chaîne de conversion éolienne de petite puissance”, Electrotechnique du Futur 2001 – Nancy 14-15 novembre 2001, pp. 17-22

[Gri] T. Grinoux, R. Gibert, P. Neau, C. Buthion, “Eoliennes en milieu urbain -État de l'art”, janvier 2006, pp. 1-129.

[Had] A. Hadj Arab, M. Benghanem, A. Gharbi, “Dimensionnement de Systèmes de Pompage Photovoltaïque”, Rev Energ Ren 2005, Vol. 8, pp. 19 – 26.

[Hal] Said Al-Hallaj, “renewable energy is also good for the bottom line”, IEEE power & energy magazine, may/june 2004, pp.16-22.

[Ham] T.J. Hammons, M. Willingham, K.N. Mak, M. Silva, M. Morozowski, B.K. Blyden, “Generation and Transmission Improvements in Developing Countries”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 3, September 1999, pp. 760-765.

[Ham 2005] A. Hamidat, A. Hadj Arab et M.T. Boukadoum, “ Performances et coûts des systèmes de pompage PV en Algérie”, Rev. Energ. Ren, Vol. 8, 2005, pp. 157 – 166.

[Her] Carlos A. Hernandez-Aramburo, *Member, IEEE*, and Tim C. Green, *Senior Member, IEEE*, “Fuel consumption minimisation of a micro-grid”, Volume 41, Issue 3, May-June 2005
Page(s):673 – 68.

[Iva] M. Ivan “Modélisation et réalisation d’une chaîne de conversion éolienne petite puissance”,
Laboratoire d’électrotechnique de Montpellier (LEM).

[Jai] Sachin Jain, Vivek Agarwal, “A New Algorithm for Rapid Tracking of Approximate Maximum Power Point in Photovoltaic Systems”, *IEEE Power Electronics Letters*, Vol. 2, No. 1, March 2004, pp.16-19.

[Jam] T. James Hammons, Jeannette C. Boyer, Stephen R. Conners, M. Davies, M. Ellis, M. Fraser, Edward A. Holt, J. Markard, “Renewable Energy Alternatives for Developed Countries”
IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 15, No. 4, Decembre 2000, pp.481-493.

[Kar] R. Karki, R. Billinton, “Cost-Effective Wind Energy Utilization for Reliable Power Supply”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 19, No.2. June 2004.

[Kat] Pradeep K Katti, Mohan K Khedkar, “Integrated Operation of Decentralised Resources for Rural Area Power Supply Applications”, *Transmission and distribution conference & Exhibition: Asia and Pacific Dalian, China, IEEE 2005*, pp. 1-6.

[Kel] W.D. Kellogg, M.H. Nehrir, G.Venkataramanan, V. Gerez, “Generation unit sizing and cost analysis for stand-alone wind, photovoltaic, and hybrid wind/ photovoltaic systems”, *IEEE Transaction on energy conversion*, Vol. 13, No. 1, March 1998, pp. 70.75.

[Ken] Ken Mok, “Identification of the Power Coefficient of Wind Turbines”, *IEEE 2005*.

[Kha] Ahmed G.Abo.khalil, Hyeong- Gyun Kim, Dong-Choon Lee, Jul-ki seok, “Maximum Output Power Control of Wind Generation System Considering Loss Minimisation of Machines”, *The 30th annual conference of the IEEE industrial Electronics Society*, November 2-6, 2004, School of Elec. Eng. And Comput. Science, Yeungnam Univ, 214-1, Korea.

[Kim] S. Kim, Eung-Sang Kim, Jae-Young Yoon and Ho-Yong Kim, “PSCAD/EMTDC Based Dynamic Modeling and Analysis of a Variable Speed Wind Turbine”, pp. 1-7.

[Kot] Prof. D.P. Kothari, “Renewable Energy Scenario in India”, IEEE 2000, pp. 634-636.

[Kou] D .Koussa, M. Belhamel, “Etude Technico- Economique D’un Système hybride (Eolien – Photovoltaïque- Diesel) De Production D’électricité Sans Interruption”

[Liu] Xuejun Liu, Luiz A. C. Lopes, “An Improved Perturbation and Observation Maximum Power Point Tracking Algorithm for PV Arrays”, the 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference Aachen, Germany, 2004, pp. 2005-2010.

[Lud] Ludovic Leclercq, “Apport du Stockage Inertiel Associé à des éolienne dans un réseau électrique en vue d’assurer des service systèmes”, Thèse de doctorat, 14 Décembre 2004, Laboratoire d’électrotechnique et d’électronique de puissance de Lille, n° d’ordre 35-63 UFR IEEA.

[Mac] M. Machmoum, F. Poitiers, L. Moreau, M.E. Zaïm, R. Le Doeuff, “Etude d’éoliennes à vitesse variable basées sur des machines asynchrones (MAS-MADA) ”, LARGE-GE44, Pole Atlantique De Génie Electrique, Ecole polytechnique de l’université de Nantes.

[Mar] M.K.C. Marwali, S.M. Shahidehpour, M. Daneshdoost, “Probabilistic Production Costing For Photovoltaics-Utility Systems With Battery Storage, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 12, No. 2, June 1997, pp.175-180.

[Mes] S. Mesli, B. Benyoucef, “Etude des Performances d’un Système de Pompage Hydraulique Alimenté par un Générateur Photovoltaïque pour le Site de Tlemcen”, Rev. Energ. Ren. : Valorisation (1999), pp. 231-236.

[Mil] A. Miller, E. Muljadi, Donald S. Zinger, “A Variable Speed Wind Turbine Power Control”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 12, No. 2, June 1997, pp. 181-186.

[Mi] A. MIRECKI, “Etude comparative de chaînes de conversion d’énergie dédiées à une éolienne de petite puissance”, Thèse de doctorat, de l’institut national polytechnique de Toulouse, 5 avril 2005, N° d’ordre : 2213.

[Miy] Masafumi Miyatake, Takeshi Inada, Isao Hiatus, “Control Characteristics of a Fibonacci-Search-based Maximum Power Point Tracker When a Photovoltaic Array Is Partially Shaded”, pp. 816-821.

[Moc] M. El Mokadem, “Structure d’un conditionneur de puissance pour un système éolien - diesel”, JCGE’03, Saint-Nazaire, 5 et 6 juin 2003.

[Moh] D.K. Mohamed, A. Midoun et F. Safia, “La Recherche du Point Optimum de Fonctionnement d’un Générateur Photovoltaïque en Utilisant les Réseaux NEURO-FLOUS”, Rev. Energ. Ren. : Chemss 2000, pp. 39-44.

[Mul 1999] Muljadi, Butterfield, “Pitch-controlled variable-speed wind turbine generation”, Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting Conference Record of the 1999 IEEE, Volume: 1, 3-7 Oct. 1999, pp. 323 – 330, vol.1.

[Mul 2003] B. Multon, “Production d’électricité par des sources renouvelables ”, Techniques de l’Ingénieur, Traités de Génie Electrique, D4005/6, mai 2003.

[Mul 2004] Bernard Multon, Gael robin, Marie Ruellan, Hamid Ben Ahmed, “3^{ème} Situation Énergétique Mondiale À L’aube Du Millénaire. PERSPECTIVES OFFERTES PAR LES RESSOURCES RENOUVELABLES, Revue 3EI n°36 Mars 2004, pp. 1-14.

[Mut] Nobuyoshi Mutoh, Masahiro Ohno, Takayoshi Inoue, “A Method for MPPT Control While Searching For Parameters Corresponding To Weather Conditions For PV Generation System”, the 30th annual conference of the IEEE industrial electronics society, November 2.6, 2004, Busan, Korea, pp. 2883-2887.

[Naq 1988] Naqra H.L, Dubé B, “Slip power recovery induction generators for large vertical axis wind turbine”, IEEE Transactions on energy conversion, Vol. 3, No. 4, December 1988, pp.733-737.

[Nay] Chemmangot V. Nayar, Mochamad Ashari, and W. W. L. Keerthipala, “A Grid-Interactive Photovoltaic Uninterruptible Power Supply System Using Battery Storage and a Back Up Diesel Generator”, IEEE Transactions On Energy Conversion, Vol. 15, No.3, September 2000, pp. 348-353.

[Neh] M. Hashem Nehrir, Brock J. LaMeres, Giri Venkataramanan, Victor Gerez, L. A. Alvarado, “An Approach to Evaluate the General Performance of Stand-Alone Wind/Photovoltaic Generating Systems”, IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 15, NO. 4, DECEMBER 2000.

[Nej] A. Nejmi, Y. Zidani, M. Naciri, “Faisabilité d’interconnexion de deux microcentrales hydrauliques. Influence des paramètres des régulateurs”, Ecole Mohammadia d’ingénieurs, Rébat, Maroc, 2002.

[Peñ] Ruben Peña, Roberto Cardenas, Jon Clare, Greg Asher, “Control strategy of doubly fed induction generators for a wind diesel energy system”, IEEE 2002, pp. 3297.3302.

[Pie] Par Pierre, René Bauquis, “ Un point de vue sur les besoins et les approvisionnements en énergie à l’horizon 2050”,

[Poi] F. Poitiers, “Etude et Commande de génératrices asynchrones pour l’utilisation de l’énergie éolienne :-Machine asynchrone à cage autonome- Machine asynchrone à double a double alimentation reliée au réseau ”, Thèse de doctorat, 19 Décembre 2003, Ecole Polytechnique de l’université de Nantes, No. ED 0366-125.

[Ra] Communication à l’académie des technologie pour un progrès résonné de Bernard Tardieu, “Rapport Energie Hydraulique Eolienne”, novembre 2005.

[Ram] R. Ramakumar, Albrecht Naeter, “Role of Renewable Energy in the Development and Electrification of Remote and Rural Areas”, IEEE – PES General Meeting Denver, Colorado, USA June 6 – 12, 2004.

[Rod] C. Rodriguez, G. A. J. Amaratunga, “Dynamic stability of grid-connected photovoltaic systems”, pp.1-7.

[Rod2002] J. L. Rodrigues.Amenado, “Automatic Generation Control of a Wind Farm With Variable Speed Wind Turbines”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 17, No. 2, June2002, pp. 279-284.

[Rog] Vincent Rogez, “ Modélisation simplifiée de sources de production décentralisée pour des études de dynamique des réseaux. Application à l’intégration d’une production éolienne dans un réseau de distribution insulaire”, thèse de doctorat, 17 Décembre 2004, Centre Nationale de Recherche Technologique de Lille.

[Rüt] Ricardo Rüter, Aloisio L. Schmid, Hans-Georg Beyer, A.A. Montenegro, Sergio H. F. Oliveira, “ Cutting on diesel, boosting PV: the potential of hybrid diesel/PV systems in existing mini-grids in the Brazilian Amazon”, 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, May 11-18,2003 Osaka, Japan, Vol. 3, pp. 2620 – 2623.

[Sho] Walter Short, “Potential of Renewables to Mitigate Global Climate Change”, Middle-East Power Systems Conference, April 2001, pp. 12-14.

[Sho 2005] A. A. Chowdhury,” Reliability Models for Large Wind Farms in Generation System Planning”, IEEE 2005, pp. 1-8.

[Slo] J.G. Sloopweg, S.W.H. de Haan, H. Polinder, W.L. Kling “Modelling New Generation and Storage Technologies in Power System Dynamics Simulations”, IEEE 2002, pp.868-873.

[Slo 2003] J.G. Sloopweg, W.L. Kling, “wing in the Wind?”, IEEE power & energy magazine, November/december2003, pp. 26-33.

[Smi] J.W. Smith, J.A. Taylor, D. L. Books, R.C. Dugan, “Interconnection studies for wind generation”, Conference papers IEEE2004, paper No. 04 C3, pp. C3-1.C3-8.

[Sny] Danie B. Snyman, Johan. H.R. Enslin, “Analysis and Experimental Evaluation of A New MPPT Converter Topology for PV Installations”, IEEE 1992, pp. 542-547.

[Sun] Xiaofeng Sun, Weiyang Wu, Xin Li, Qinglin Zhao, “ A Research on Photovoltaic Energy Controlling System with Maximum Power Point Tracking”, IEEE 2002, pp. 822-826.

[Swi] R. Swisher, C. Real De Azua, J. ClendeninL, “Strong Winds on the Horizon: Wind Power Comes of Age”, Proceedings of the IEEE, VOL. 89, NO. 12, December 2001, pp. 1757-1764.

[Site 1] Site Internet, <http://perso.wanadoo.fr/ajena/>

[Site 2] Site Internet, <http://www.Énergie renouvelable, Wikipédia.org>.

[Site 3] Site Internet, www.les énergies renouvelables.org/fr.

[Site 4] Site Internet, www.L'énergie éolienne.org/fr.

[Site 5] Site Internet, www.rncan.gc.ca/penser. Programme d'encouragement aux systèmes d'énergie renouvelables.

[Site 6] Site Internet ” L'éolien, un gisement d'énergie renouvelable exploitable Ile- de France ”, Agence régionale de l'environnement et de nouvelles énergies <http://www.arenidf.org>.

[Site 7] Site Internet, <http://www.windpower.org/fr>.

[Site 8] Site Internet [www. Eoliennes à axe horizontal ou à axe vertical. org](http://www.Eoliennes à axe horizontal ou à axe vertical. org).

[Site 9] Site Internet”Solaire Photovoltaïque”, [http://www. Hespul Solaire Photovoltaïque. org](http://www.Hespul Solaire Photovoltaïque. org).

[Site 10] Site Internet, www.L'énergie éolienne.org/fr.

[Site 11] « Conception de centrales mixtes photovoltaïques - éoliennes optimisées, intelligentes et modulaires », appel d'offre CNRS/ECODEV/ADEME, 2000.

[Tec] Technique de l'ingénieur BM 4 640.

[Ter] Vanessa Terrazoni-Daudrix, “Cellules solaires en couches minces de silicium amorphe : Effets du substrat réflecteur texturé et de la couche intrinsèque sur le courant photo-généré”, Thèse de doctorat, 19 mai 2004, Université de Neuchatel.

[Tse] Stathis Tselepis, “Electrification with solar powered Mini- MINI-GRIDS, a case study for the island of Kythnos” 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion May 11-18, 2003 Osaka, Japan, pp. 2314-2317.

[Val] Fernando Valenciaga, Pablo F. Puleston, Pedro E. Battaiotto, “Power Control of a Solar/Wind Generation System Without Wind Measurement: A Passivity/Sliding Mode Approach”, IEEE Transaction on Energy Conversion, VOL. 18, NO. 4, December 2003, pp. 501-507.

[Wan] Q.Wang, L.Chang, “An Intelligent Maximum Power Extraction Algorithm for Inverter-Based Variable Speed Wind Turbine Systems”, IEEE Transactions on power electronics, Vol. 19, No. 5, September 2004, pp.1242-1249, Department of Electrical and Computer Engineering, University of New Brunswick, Canada.

[Wang] Li Wang, Ying-Hao Lin,” “Dynamic Stability Analyses of a photovoltaic array connected to a large utility grid”, IEEE 2000, pp. 476-480.

[Wang 2004] Li Wang, Kuo-Hua Liu, “Transient performance and stability analyses of a hybrid Grid-connected Wind/PV”, IEEE2004, pp. 1.7.

[War] C. L. Warner, R.W. Taylor, C. M. Ribeiro, M. Moszkowicz, A. J. V. Borba, ” PV-Hybrid village power on”, 25th PVSC; May 13-17, 1996; Washington, D.C, pp. 1469-1472.

[Xia] Weidong Xiao, William G. Dunford, “Evaluating Maximum Power Point Tracking Performance by Using Artificial Lights” the 30th annual conference of the IEEE industrial electronics society, November 2.6, 2004, Busan, Korea, pp. 2883-2887.

ANNEXE

Les paramètres de la machine asynchrone à double alimentation[cam]

$$R_s=1.2\Omega$$

$$R_r= 1.8\Omega$$

$$L_s=0.1554 \text{ H}$$

$$L_r=0.1568 \text{ H}$$

$$M=0.15 \text{ H}$$

$$p=2$$

$$J=0.07 \text{ kg.m}^2$$

$$f=0.01 \text{ N.m/s}$$

Les paramètres de la turbine [Ela]

$$R=0.5 \Omega$$

$$S=2 \text{ m}^2$$

$$r=1.2 \text{ Kg / m}^2$$

Les paramètres du panneau photovoltaïque

$$k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Joule/K.}$$

$$q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Coulombs.}$$

$$T=298\text{K}$$

$$N=102$$

Les paramètres de la machine asynchrone [BEL]

$$R_{s1}=4.58 \Omega$$

$$R_{r1}=4.468 \Omega$$

$$L_{s1}=0.253 \text{ H}$$

$$L_{r1}=0.253 \text{ H}$$

$$L_{m1}=0.2423 \text{ H}$$

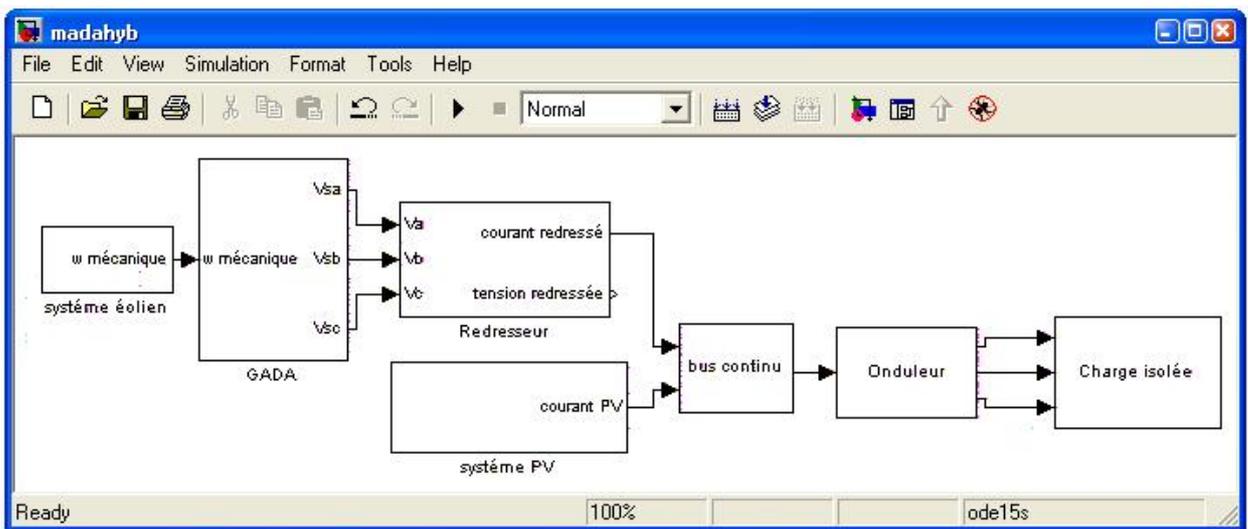
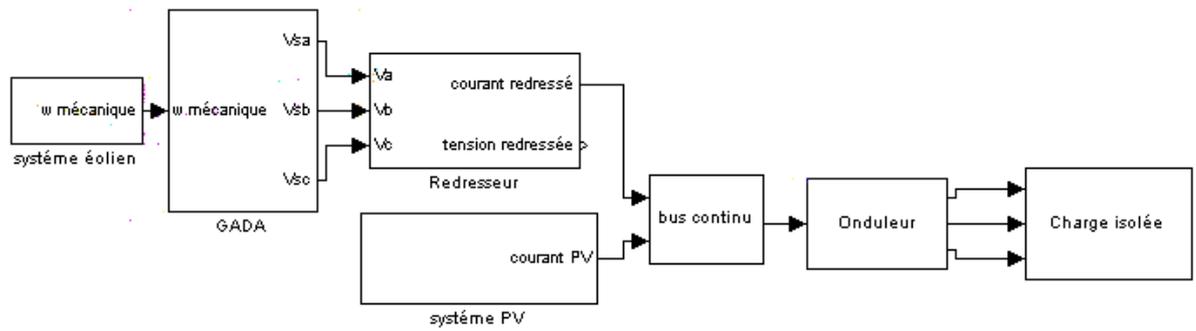
$$C=10\text{e-}12 \text{ F}$$

$$U_c=350 \text{ v}$$

$$p_1=2$$

$$J_f=0.023 \text{ kg.m}^2$$

$$f_v=0.0026 \text{ N.m/s}$$



ملخص

إن مصادر الطاقات المتجددة، التي تمكننا من إنتاج الطاقة الكهربائية، تؤدي إلى حل مشاكل توزيع الكهرباء في المناطق المعزولة والمحرومة من كل مصادر الطاقة، وتحسين مستواهم المعيشي.

من إيجابيات ربط أو تجميع عدة مصادر مختلفة في شكل شبكة صغيرة، الزيادة في إمكانية تشغيل النظام في ظروف موثوقة، لقد قمنا بتطوير برنامج طاقي هجين (طاقة الرياح – الطاقة الشمسية) وذلك مع التركيز على كل نظام بصفة خاصة.

Résumé

Les sources renouvelables d'énergie, permettant une production décentralisée de l'électricité, peuvent contribuer à résoudre le problème de l'électrification des sites isolés où un grand nombre d'individus est dépourvu de tout apport énergétique, ne pouvant ainsi satisfaire aucun besoin même minime et améliorer ses conditions de vie.

Le couplage de plusieurs sources sous forme d'une microcentrale a pour avantage d'accroître la fiabilité du système, d'augmenter les puissances à satisfaire et de réduire les coûts de production.

Nous avons développé une méthode de dimensionnement des systèmes énergétiques hybrides Eolien – Photovoltaïque. Une attention particulière a été apportée sur l'optimisation de chaque composante.

Abstract

Renewable energy, allows a decentralized electrical energy production, which contributes to the solution of supplying isolated area with the necessary energy.

Interconnecting much renewable energy increase the electrical output power and contribute to the reduction of the overall cost.

We have studied the methodology of designing hybrid systems particularly, photovoltaic and wind systems.