

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة -

Faculté des sciences de l'ingénieur

Département d'électrotechnique

THESE

Présentée en vue de l'obtention du
Diplôme de **DOCTORAT** en Sciences

Spécialité : **Electrotechnique**

Option: **Réseaux électriques**

Récupération des déperditions d'énergie dans les complexes industriels et leur conversion en énergie électrique exploitable

Présentée par

Melle MEKKI MOUNIRA

Directeur de Thèse : **Mr LABAR Hocine**

Prof Université Annaba

DEVANT LE JURY

Président : M.Houabes

Prof Université Annaba

Examineurs : A.Abderrezak

M.CA Université Annaba

D.Dib

M.CA Université Tébéssa

M.Mostefai

Prof Université Sétif

L.Rahmani

Prof Université Sétif

ANNEE 2014

RESUME

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de l'économie de l'énergie et la protection de l'environnement qui est un souci majeur, vu que les dernières statistiques ont prouvé le péril prématuré des ressources énergétiques mondiales d'une part et des bouleversements climatiques d'autres parts. Donc la première étape pour réduire l'utilisation des combustibles fossile est l'optimisation de la production. Dans cette optique nous avons utilisé une source d'énergie renouvelable et autre classique pour réduire l'effet des interactions harmoniques sur l'énergie produite.

Afin de justifier l'utilisation des éoliennes, nous avons étoffé par un état de l'art des ressources renouvelables de substitution respectueuses de l'environnement, et afin de justifier la nécessité de recherche d'autres sources d'énergie, un état de lieu a été fait afin d'interpeller toute la communauté scientifique du déclin des énergies primaires et on a mis l'accent sur le potentiel énergétique national.

L'intégration de ces énergies renouvelables dans les réseaux électriques suscite une grande attention, vu leurs dynamiques et leurs inertie, ainsi que leurs comportements face au régime de fonctionnement non linéaire, nous préconisons aussi une autre façon de réduction des émissions des gaz à effet de serre, constant à la cogénération que nous avons appliqué (par simulation) avec succès dans le milieu industriel.

Il a été prouvé dans cette thèse que les puissances harmoniques qui circulent dans le réseau peuvent être réutilisées sous forme de puissance ou énergie utile par le biais d'une électronique de puissance et un contrôle approprié.

Mots clés: Eolienne, générateur, qualité de l'énergie, impédance, erreurs.

ABSTRACT

This thesis is part of the energy economy and protecting the environment a major concern, a view that the latest statistics showed the premature perishing of global energy resources on the one hand and climatic changes other shares, to this end we start by a state of the art renewable resource alternative environmentally friendly, and to justify the necessity of seeking alternative sources of energy, instead of a state has been done in order to challenge the entire scientific community of the decline of primary energy and is focused on the potential national energy.

The integration of renewable energy in power systems arouses great attention, since their dynamics and inertia, and their behavior against the regime of non-linear operation, we recommend also another way to reduce emissions of greenhouse gases emissions, cogeneration that we applied successfully in industry.

Keys words: Wind, generator, power quality, Impedance, errors.

ملخص

هذه الرسالة هي جزء من اقتصاد الطاقة وحماية البيئة مصدر قلق كبير، وهو يرى أن آخر الإحصاءات أظهرت هلاك سابق لأوانه من موارد الطاقة العالمية من جهة، والتغيرات المناخية الأسهم الأخرى، لتحقيق هذه الغاية نحن من قبل الدولة من الموارد المتجددة البديلة فن صديقة للبيئة، وتبرير ضرورة البحث عن مصادر بديلة للطاقة، بدلا من دولة لديها تم القيام به من أجل تحدي المجتمع بأكمله العلمية للهبوط من الطاقة الأولية وتركز على الطاقة وطنية محتملة. دمج الطاقة المتجددة في أنظمة الطاقة يثير اهتماما كبيرا، منذ دينامييتها والجمود، وسلوكهم ضد نظام غير الخطية والعملية، ونحن نوصي أيضا وسيلة أخرى للحد من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري الانبعاثات، والتوليد المشترك للطاقة أننا طبقت بنجاح في مجال الصناعة.

الكلمات المفتاحية

طاقة الرياح، مولد كهربائي، نوعية الطاقة، المقاومة، الاخطاء.

DEDICACES

+ À mes chers parents défunts, qui ont peiné pour mon éducation, mes études et à mon bien être.

+ À toute la famille.

+ À tous mes amis(es) qui m'ont soutenu au cours de la rédaction de cette thèse.

+ À tous ceux qui me sont chers(es), je leur dédie cette thèse.

Mounira MEKKI

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je tiens tous ceux qui y ont collaboré directement ou indirectement, lors des années de réalisation de cette thèse.

A l'issu de ce travail ;

- ✚ Je tiens à remercier plus particulièrement le professeur H.Labar rapporteur de cette thèse de doctorat et dont les idées, les conseils, les critiques mais aussi les encouragements, m'ont été d'une aide précieuse.
- ✚ Je remercie le professeur M.Kouabes, professeur et chef de département d'électrotechnique à l'université Badji Mokhtar. Annaba, qui m'a fait l'honneur de présider mon jury de thèse.

Pour la participation à l'évaluation scientifique de ce travail, je tiens également à remercier messieurs :

- ✚ Les professeurs Rahmani Lazhar et Mostefai Mohammed de l'université de Sétif.
- ✚ Les docteurs Abdelrezak.A de l'université de Annaba et Dib.D de l'université de Tébessa.

En tant qu'examineurs dans cette thèse.

Enfin, je remercie tous les membres de ma Famille , ainsi que toute personne ayant, de près ou de loin, aidé à l'aboutissement de ce travail.

Mounira MEKKI

TABLE DES MATIERES

Résumé

Dédicaces

Remerciements

Table des matières

Liste des symboles

Liste des figures

Liste des tableaux

INTRODUCTION.....1

Chapitre I : INTRODUCTION SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES

I-1 LE SOLEIL.....5

I-2 IRRADIANCE ET IRRADIATION7

I-3 INTRODUCTION SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES.....8

I-3-1 LA BIOMASSE.....9

I-3-1-1 Introduction9

I-3-1-2 Comment obtient-on la biomasse ?..... 10

I-3-1-3 A quoi sert la biomasse ?.....11

I-3-1-4 En quoi la biomasse est-elle avantageuse ?.....12

I-3-1-5 L'impact de la biomasse et son développement?.....13

I-3-2 ENERGIE HYDRAULIQUE.....13

I-3-2-1 Introduction13

I-3-2-2 Types des centrales.....14

I-3-3 ENERGIE SOLAIRE.....15

I-3-3-1 Le gisement solaire.....15

I-3-3-2 Le solaire thermique.....17

I-3-3-3 Le solaire photovoltaïque.....18

I-3-4 LA GEOTHERMIE.....19

I-3-4-1 Introduction19

I-3-4-2 La géothermie dans le monde20

I-3-4-3 Les ressources géothermiques du nord de l'Algérie.....	20
I-3-5 L'ENERGIE EOLIENNE.....	21
I-3-5-1 Introduction.....	21
I-3-5-2 Potentiel éolien en Algérie.....	22
I-3-5-3 Notions théoriques sur l'éolien.....	23
I-3-5-2-1 Loi de Betz.....	23
I-3-5-4 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	24
I-4 CONCLUSION.....	25

Chapitre II : RESSOURCES ENERGETIQUES ALGERIENNES ET MONDIALES

II-1 RESSOURCES ENERGETIQUES MONDIALES.....	28
II-1-1 LE PETROLE.....	28
a - Production et commerce international.....	28
b -Ressources et réserves.....	29
II-1-2 LE GAZ NATUREL.....	30
II-1-2.1 Production et commerce international.....	30
II-1-2.2 Ressources et réserves.....	31
II-1-3 L'uranium.....	31
II-1-4 Les énergies renouvelables.....	31
II-1-5 La production d'électricité.....	32
II-2 RESSOURCES ENERGETIQUES ALGERIENNES.....	33
II-3 BESOINS ENERGETIQUES.....	34
II-3-1 Besoins en énergie primaire.....	34
II-3-2 Besoins en électricité.....	36
I-3-3 La consommation énergétique des différents secteurs en Algérie.....	37
II-4 CONCLUSION.....	37

Chapitre III : INTEGRATION DES EOLIENNES DANS LE MILIEU INDUSTRIEL

COMME MOYEN DE SOUTIEN ENERGETIQUE

III-1 INTRODUCTION.....	40
-------------------------	----

III-2 Indices de la qualité de l'énergie sous une distorsion harmonique.....	40
III-2-1 Indices de la qualité de l'énergie.....	41
III-2-2 La distorsion harmonique.....	41
III-3 Modèle expérimental.....	42
III-4 Formulation de la puissance dans des conditions non linéaires.....	43
III-5 Analyse des résultats expérimentaux et discussions.....	50
III-6 Les erreurs dans les mesures.....	55
III-7 Conclusion.....	58

Chapitre IV: COMPORTEMENT ELECTROENERGETIQUE NON LINEAIRE

D'UNE CENTRALE THERMIQUE D'UN COMPLEXE SIDERURGIQUE

IV-1 Introduction.....	61
IV-1-1 Principe de fonctionnement.....	61
IV-1-2 Centrale thermique.....	62
IV-2 Description du lieu d'application (centrale thermique d'Arcelor Mittal).....	63
IV-2-1 Principe de fonctionnement du groupe N°3.....	63
IV-3 Principaux éléments de la centrale thermique d'Arcelor Mittal.....	64
IV-4 Turbines à soutirage de vapeur.....	67
V-5 Cycle à soutirage.....	68
IV-6 Structure d'un cycle à vapeur de la centrale thermique d'Arcelor Mittal	69
IV-7 Définitions fondamentales de quelques paramètres.....	71
VI-7-1 Energie interne.....	71
VI-7-2 Enthalpie	71
VI-7-3 L'entropie	78
V-8 Application d'une excitation non linéaire.....	72
VI-8-1 Modèle du redresseur MLI.....	72
VI-8-2 Principe de fonctionnement	73
VI-8-3 MLI à porteuse triangulaire.....	73

VI-9 Conclusion.....	78
V- CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	80

LISTE DES SYMBOLES , NOTATIONS & ABREVIATIONS

SYMBOLE	DESIGNATION
U_h & I_h	Tensions et courant harmoniques, respectivement
THD	Total harmonic distorsion
pf_{me}	Vrai facteur de puissance
P_{avg}	Puissance moyenne active
$s_1(t)$ & $s_h(t)$	Puissance instantanée, respectivement de la fondamentale et de l'harmonique h
P & Q	Puissance active et réactive, respectivement
$\overline{i(t)}$	Courant quadratique
S	La puissance apparente
s	La puissance de transformation
D	La puissance déformante
Z	Impédance donnée par la relation de la tension et du courant
\mathbf{Z}	Impédance donnée par la relation de la puissance et du courant
$\mathcal{E}_{U,I,P,Q}$	Erreurs de mesure
$\mathcal{E}_{S,s,Z,Z}$	Erreurs de calcul
Er_Z	Déviations de l'erreur
V_A	Tension de sortie de l'onduleur (phase A)
V_B	Tension de sortie de l'onduleur (phase B)
V_C	Tension de sortie de l'onduleur (phase C)
V_{refK}	Tension de référence pour le bras cas
U_p	Tension pour la porteuse p
P	Pression
T	Température
V	Volume
U	Energie interne
h	Enthalpie
S	Entropie
NPC	Neutral Point Clamped
MLI	Modulation de largeur d'impulsion

IGBT	Insolated gate transistor bipolar
------	-----------------------------------

LISTE DES FIGURES

N° FIG	TITRE	PAGE
Figure1.1	a- Le soleil b- L'atmosphère solaire	4
Figure1.2	a- Radiation solaire b- Radiation ultra violet	6
Figure1.3	Spectre de la radiation solaire	6
Figure1.4	Différents énergies renouvelables	7
Figure1.5	Répartition des ressources sur la production mondiale d'électricité en 2004	8
Figure1.6	Granulés de sciures et d'ordures ménagères	9
Figure1.7	Immense champ agricole de biomasse	11
Figure1.8	Principe de préparation en vue d'une exploitation énergétique	12
Figure1.9	Energie hydraulique : Exemple de barrage	14
Figure1.10	Rayonnement solaire global quotidien moyen en KWh/m ²	15
Figure1.11	Carte de l'irradiation en Algérie	16
Figure1.12	Vue générale de la plate forme d'expérimentation des capteurs solaires thermiques et du chauffe eau solaires au CDER, Bouzaréah-Alger	16
Figure1.13	Production électrique à base de modules photo voltaïques	17
Figure1.14	Le gradient géothermique	18
Figure1.15	Répartition des ressources géothermiques mondiales	19
Figure1.16	Puissance éolienne cumulée dans le monde en MW	22
Figure1.17	a- Eolienne. b- Ferme éolienne	22
Figure1.18	Carte de la vitesse moyenne du vent à 10 m du sol (m/s) en Algérie	23
Figure2.1	Réserves énergétiques mondiales estimées en 2008	28
Figure2.2	Le pétrole	32
Figure2.3	Consommation mondiale d'énergie primaire. a- Evolution de la consommation mondiale d'énergie primaire b- L'énergie primaire	34

	c- Projection de la répartition par secteur de la demande énergétique primaire mondiale en 2010.	
Figure2.4	Evolution de la production et types de production mondiale a- Evolution de la production mondiale d'électricité 2007 b- Types de production mondiale.	35
Figure2.5	Consommation d'énergie par secteur (période 1980-2000)	36
Figure3.1	Représentation du modèle expérimental	42
Figure3.2	Incompatibilité des appareils de mesure	43
Figure3.3	Représentation vectorielle dans l'espace	45
Figure3.4	Schéma unifilaire de l'éolienne étudiée	46
Figure3.5	Structure de l'onduleur à cinq niveaux	47
Figure3.6	Structure d'un bras de l'onduleur à cinq niveaux à structure NPC	47
Figure3.7	a -Relevé des tensions V_a, V_b, V_c b -Spectre d'harmoniques	49
Figure3.8	Tension du jeu de barre mesurée pour un générateur de parc éolien connecté	50
Figure3.9	Tension du jeu de barre mesurée pour un générateur de parc éolien isolé	51
Figure3.10	Courants de ligne mesurés pour un générateur de parc éolien connecté	51
Figure3.11	Courants de ligne mesurés pour un générateur de parc éolien isolé	52
Figure3.12	Puissance apparente mesurée pour un mode connecté et isolé	52
Figure3.13	Puissance active mesurée pour un mode connecté et isolé	53
Figure3.14	Puissance réactive mesurée pour un mode connecté et isolé	53
Figure3.15	Erreur de l'impédance dans le cas connecté	55
Figure3.12	Erreur de l'impédance dans le cas isolé	56
Figure4.1	Modèle d'une centrale thermique (turbine à vapeur)	62
Figure4.2	Éléments principaux de la centrale d'Arcelor Mittal	64
Figure4.3	Schéma d'une installation à un soutirage	67
Figure4.4	Evolution du rendement thermique en fonction du nombre de soutirages	69
Figure4.5	Bilan énergétique global d'une installation simple à vapeur	69
Figure4.6	Structure du cycle à vapeur réel de la centrale thermique d'Arcelor Mittal	70
Figure4.7	Courbe de la consommation de vapeur	70
Figure4.8	Diagramme de démarrage de la turbine AEQ	71
Figure4.9	Topologies de base d'un redresseur de tension	72
Figure4.10	Modulateur MLI à porteuse triangulaire	73

Figure4.11	Pont redresseur	73
Figure4.12	Différents états de commutation des interrupteurs du redresseur MLI	74
Figure4.13	Schéma unifilaire de la machine synchrone et son excitation	74
Figure4.14	$V=f(t)$	74
Figure4.15	$I=f(t)$	74
Figure4.16	$V_d=f(t)$	75
Figure4.17	$P=f(h)$	76
Figure4.18	$Q=f(h)$	76

LISTE DES TABLEAUX

N° TAB	TITRE	PAGE
Tableau2.1	Consommation d'énergie en million de tonnes équivalentes pétrole (tep) par secteur .	34
Tableau3.1	Séquences de commande d'un onduleur	48
Tableau3.2	Erreurs de mesure et de calcul	56
Tableau4.1	Résultats de calcul après simulation	71
Tableau4.2	Les huit états possibles des interrupteurs d'un redresseur MLI	73

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La consommation d'énergie, durant le siècle dernier, a considérablement augmenté à cause de l'industrialisation massive. Les prévisions des besoins en énergie pour les années à venir ne font que confirmer, voire amplifier, cette tendance, notamment compte tenu de l'évolution démographique et du développement de certaines zones géographiques.

Une très grande partie de ces ressources sont aujourd'hui fossiles: pétrole, charbon, gaz naturel. Bien que diversifiées et très abondantes, ces ressources ne sont pas inépuisables et leurs exploitation ne pourra durer plus d'un siècle. Mais la sûreté énergétique à long terme des pays du monde n'est pas le seul péril que fait encourir le recours aux énergies fossiles. Leur utilisation génère considérablement de dioxyde de carbone, gaz en parti responsable de l'effet de serre. Cet effet de serre met en danger de nombreuses populations de part le monde et la stabilité géopolitique même de certaines régions du globe pourrait être mise à mal par des phénomènes climatiques majeurs.

Et dans le but de répondre à la consommation d'électricité continuellement croissante, et pour fournir une énergie propre, sûre et compétitive, la tendance va vers l'utilisation des sources d'énergies de différentes natures en termes de concept et source d'énergie notamment énergies renouvelables.

Il a été constaté qu'en présence d'harmoniques, la distribution des puissances devient défavorable, car pour assurer un équilibre énergétique naturel une grande part sera transformée en énergie véhiculée sous forme de puissances harmoniques inutilisables voire destructrices.

Donc dans cette thèse il est question de revaloriser ces énergies en agissant sur les éléments de contrôles et de puissances que chaque type de source utilise (fossile ou renouvelables)

Les sources d'énergies renouvelables (soleil, vent, courant d'eau, biomasse ou chaleur naturelle) permettent d'obtenir, après transformation, de l'énergie mécanique, de l'électricité, de la chaleur ou un combustible, couplées à une utilisation rationnelle de l'énergie (URE), elles permettent de réduire la consommation de combustibles d'origine fossile ou fissile, et par conséquent de réduire les impacts environnementaux et socio-économique de nos besoins en énergie.

Les énergies renouvelables regroupent un grand nombre de systèmes différents selon la ressource valorisée et la forme d'énergie obtenue. Ces dernières années, les évolutions

observées concernent aussi bien l'amélioration des rendements de transformation et la diminution du prix de revient de l'énergie utile produite que la qualité du service énergétique et un confort accru à l'exploitation.

Du côté de la ressource, le potentiel des énergies renouvelables pourrait dépasser largement nos besoins, mais leur contribution dans le bilan énergétique dépend des surfaces mises à disposition, des investissements pour leurs équipements et de la réduction de nos consommations. L'aménagement du territoire est un paramètre clé car il définit les limites de la ressource exploitable localement.

Le phénomène du réchauffement climatique pousse les pays à réduire les gaz à effet de serre qu'ils génèrent à travers les usines, par conséquent ils cherchent à faire une substitution énergétique à travers les énergies renouvelables.

Dans notre travail, cette question a été développée expérimentalement dans le chapitre III dans lequel les recommandations ont été proposées, mais ce que nous remarquons est la nécessité d'optimiser notre consommation énergétique afin de réduire les émissions des gaz nocifs, à cet effet, un chapitre (IV) a été dédié à une production classique (thermique) afin d'atteindre le même objectif de linéarisation basé sur la technique de commande et le convertisseur qui lui est associé, mais en utilisant la cogénération comme combustible de base, cette idée a été développée en prenant comme exemple la même usine, et nous pouvons dire que la cogénération permet un effet positif direct sur l'environnement sans compter l'incidence économique.

La description de ces travaux et des principaux résultats obtenus est consignée dans ce manuscrit divisé en quatre grandes parties :

Au Chapitre I, On a donné un bref aperçu sur les différentes énergies renouvelables.

Les sources d'énergies renouvelables sont fréquentes et variées. Parmi les plus connues, se trouvent :

- L'hydraulique, qui est d'ailleurs la première source d'énergie renouvelable dans la production d'électricité, après le nucléaire. Elle utilise la force de l'eau.
- Le solaire, qui est très apprécié dans les zones rurales et isolées. La quantité d'énergie absorbée par l'air et transformée en chaleur représente plus de 6000 fois la consommation d'énergie mondiale.
- L'éolien est de nos jours en développement rapide. Il offre de nombreux avantages,

comme un faible impact environnemental et surtout local. Dans les pires conditions, une éolienne a une durée de vie d'au moins 20 ans.

- La géothermie a pour origine l'évacuation de la chaleur de l'intérieur du globe. Selon la température, il existe plusieurs types d'applications : la géothermie à haute température qui produit de l'électricité ; et la géothermie à basse température qui est surtout employée pour le chauffage des locaux.
- La biomasse... Lors de la croissance des plantes et des arbres, celles-ci fixent le CO₂ de l'atmosphère. Lorsque nous utilisons la biomasse, le CO₂ émis par la combustion sera refixé par les plantes.

Au Chapitre II, On a traité les différentes ressources énergétiques que ce soit à l'échelle mondiale ou algérienne.

Il est à remarquer qu'aussi bien le monde où l'Algérie dispose d'une diversité d'énergies renouvelables et propres mais non exploitées et serait alors d'une importance stratégique de les développer vue que les chiffres le confirment.

Au Chapitre III, Ce chapitre traite le concept de la qualité de l'énergie qui a été induit par l'évolution de la nature des charges. Aujourd'hui, ils sont pour la plupart des dispositifs non linéaires et sensibles. La qualité de l'énergie traitée par des mesures, l'analyse et l'amélioration des caractéristiques de la tension (jeu de barre de la tension), pour préserver la forme d'onde sinusoïdale avec RMS (valeur efficace) de la tension et de la fréquence constante. Le sujet traite l'évaluation et la classification des interactions harmoniques. Le concept d'harmoniques se réfère à la distorsion des formes d'ondes sinusoïdales. Ces ondes déformées sont généralement périodiques.

Aujourd'hui, la pollution harmonique dans les systèmes de distribution de l'énergie est si grave que la qualité de l'énergie devient à peine acceptable. En dépit de la mauvaise qualité de l'énergie, la connexion des charges non linéaires dans le système est en constante augmentation. Dans certaines zones du réseau faible, les distorsions de tension et courant sont si grandes qu'il est essentiel d'utiliser des filtres pour éviter un endommagement ou un dysfonctionnement dans les équipements électriques sensibles. Ainsi, afin de faire une étude sur l'effet de ces tensions harmoniques, une étude expérimentale est menée pour montrer le comportement d'un parc éolien à l'égard de ce type de perturbation dans le cas d'un fonctionnement isolé ou connecté au réseau.

A cet effet, une expérience sur un réseau alimentant une unité de laminage située au Nord Est d'Algérie a été testée.

Au Chapitre IV, Dans ce chapitre, on a étudié la centrale thermique, et plus précisément on a pris le cas de la centrale thermique d'Arcelor Mittal, donc on a étudié son principe de fonctionnement, les différents cycles thermodynamique de la turbine à vapeur et on a pu tracé les différents diagrammes à laide du logiciel Thermoptim, ce dernier nous a permis de simuler une cogénération qui dépend du processus des différentes unités de production. Cette étude préliminaire nous a permis de valider la cohérence des résultats. OÙ par la suite nous avons proposé une excitation non linéaire afin qu'elle puisse suivre l'évolution harmoniques, dans le but d'une linéarisation du point de connexion.

CHAPITRE I

INTRODUCTION SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES

I-1 LE SOLEIL

Le soleil de la puissance rayonnée provient de processus de fusion nucléaire, au cours de laquelle le soleil perd 4,3 millions de tonnes de masse à chaque seconde. Cette masse est convertie en énergie rayonnante.

Chaque mètre carré de surface du soleil émet une puissance rayonnée de 63,1 MW, ce qui signifie que seulement un cinquième d'un kilomètre carré de surface du soleil émet une quantité d'énergie égale à la demande d'énergie primaire mondiale sur la terre.

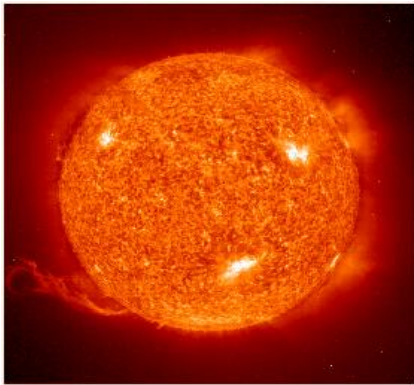


Fig. 1.1-a Le soleil



Fig. 1.1-b L'atmosphère solaire

Les Grecs appelaient les Helios Sun, elle, les Romains l'appelaient sol. Le soleil est, à l'heure actuelle, environ 70% d'hydrogène, d'hélium et 28% en masse, tout le reste (métaux) est inférieur à 2%. Cela change lentement au fil du temps que le soleil convertit l'hydrogène en hélium dans son noyau.

La production d'énergie du soleil à chaque seconde est le résultat de la conversion d'environ 700.000.000 tonnes d'hydrogène en 695.000.000 de tonnes d'hélium et 5.000.000 de tonnes d'énergie (386 milliards de milliards de mégawatts) est produite par des réactions de fusion nucléaire. Comme il voyage vers la surface, l'énergie est continuellement absorbée et réémise à plus bas et des températures plus basses de sorte que par le moment où il atteint la surface du soleil, il est principalement la lumière visible. Pour le dernier 20% du chemin vers la surface, l'énergie est réalisée plus par convection que par rayonnement. La surface du soleil, la photosphère, est à une température d'environ 5800 K. Une petite région connue sous le nom chromosphère est au dessus de la photosphère, la région raréfié-dessus de la chromosphère, appelée la couronne, s'étend des millions de kilomètres dans l'espace, mais n'est visible que pendant une éclipse totale de soleil (à gauche). Températures la couronne sont plus de 1.000.000 K.

Le processus de fusion du soleil produit de l'énergie intense qui se déplace vers

l'extérieur comme rayonnement électromagnétique. Le rayonnement électromagnétique du soleil prend la forme de lumière visible (41%), ultra-violet, rayons X et rayons gamma (9%), et l'énergie infra rouge à ondes courtes (50%) [1].

L'énergie thermique reçue par une surface perpendiculaire aux rayons du soleil, à l'extérieur l'atmosphère serait relativement constante 1365 watts par mètre carré. Elle est appelée la constante solaire.

Insolation se réfère à un rayonnement solaire incident. L'insolation quotidienne totale à un endroit sur la surface de la terre est déterminée par:

- L'angle des rayons du soleil.
- Le montant de temps un endroit exposé aux rayons du soleil.
- La quantité de nuages, la poussière et la vapeur d'eau dans l'atmosphère.

Insolation qui varie aussi avec latitude et les changements saisonniers produite par l'inclinaison de l'axe de la terre dans son orbite autour du soleil, car la terre dans son ensemble, l'ensoleillement doit être égal à ondes longues à l'espace.

Toutefois, les basses latitudes (de 0 à 40 ° Nord et Sud) de recevoir plus d'insolation ils émettent de l'espace (surplus d'énergie). Des latitudes plus élevées (40 à 90 ° Nord et Sud) émettent plus de rayonnement à l'espace qu'ils n'en reçoivent (déficit énergétique). Le rayonnement électromagnétique émis par le soleil montre un large éventail de longueurs d'onde. Il peut être divisé en deux grandes régions à l'égard de la capacité des atomes ionisants rayonnement-matière absorbante:

*Les radiations ionisantes (rayons X et rayons gamma) et

*Rayonnement non ionisants (rayons UV, lumière visible, et le rayonnement infrarouge).

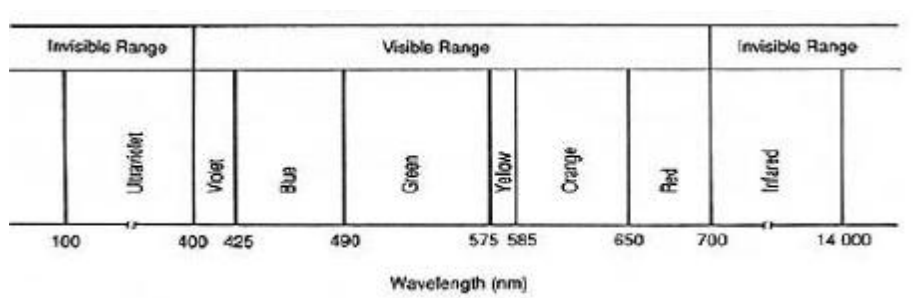


Fig. 1.2-a Radiation solaire

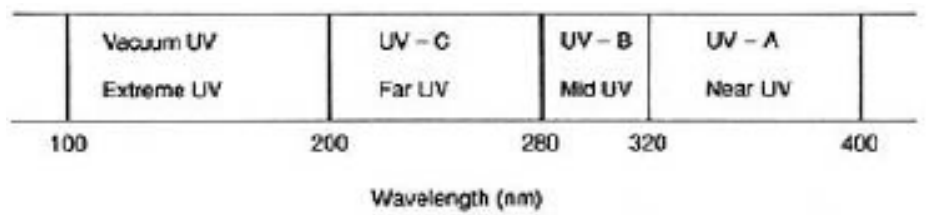


Fig. 1.2-b Radiation ultraviolet

Heureusement, seule une petite partie de cette énergie atteint la surface de la terre, l'irradiance solaire décroît avec le carré de la distance au soleil. Comme la distance de la terre au soleil change pendant l'année, l'irradiance solaire hors atmosphère terrestre a également varié entre 1325 W/m^2 et 1420 W/m^2 . L'irradiance solaire moyenne annuelle est connue comme la constante solaire et est de $1367 \pm 2 \text{ W/m}^2$.

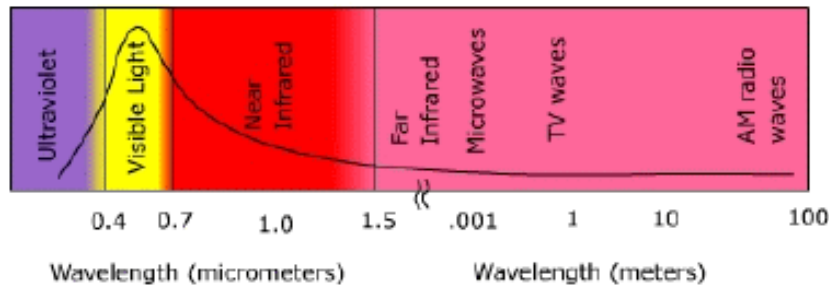


Fig. 1.3 Spectre de la radiation solaire

Le soleil change durant l'année sur Mars, qui est plus loin du soleil que la terre, le rayonnement solaire est inférieure à 600 W/m^2 , un facteur à prendre en considération lors de la conception des satellites PV-alimenté. Seule une surface qui est perpendiculaire aux rayons du soleil entrant reçoit ce niveau d'éclairement. En dehors de l'atmosphère, et donc pas soumis à son influence, l'irradiance solaire n'a qu'une composante directe. Tout le rayonnement solaire est pratiquement parallèle. Ce rayonnement est aussi appelé éclairement normal direct ou du faisceau E_{beam} . Dans ces conditions, une surface qui est orientée parallèle aux rayons du soleil ne reçoit pas de rayonnement. Le spécifique E_{dir} irradiance directe solaire qui atteint une surface inclinée est inférieure selon le cosinus de l'angle d'incidence θ : $E_{\text{dir}} = E_{\text{beam}} \cdot \cos \theta$.

I-2 IRRADIANCE ET IRRADIATION

L'éclairement ou **irradiance** est défini comme une puissance reçue par une surface. Il s'exprime en W/m^2 .

Le S.I.(système international d'unités) recommande d'utiliser le symbole E.

L'irradiation ou **rayonnement** est l'énergie reçue par une surface. Elle s'exprime en J/m^2 . L'ISES (International Solar Energy Society) recommande le symbole H. D'autres unités plus courantes sont le Wh/m^2 bien que ce dernier ne doit pas être utilisé puisque n'appartenant pas au système international d'unités (SI). L'éclairement ou irradiance, G exprimé en W/m^2 .

Rayonnement, irradiation ou énergie incidente H exprimé en Wh/m^2 ou J/m^2 [2].

I-3 INTRODUCTION SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES



Fig. 1.4 Différentes énergies renouvelables

La plupart de l'électricité produite dans le monde (82 %, [3], [4]) provient de la décomposition de combustibles fossiles (pétrole, charbon ou gaz naturel) ou de combustibles nucléaires. Bien que le gisement planétaire des combustibles fossiles soit très large, il est néanmoins limité. De plus, leur renouvellement n'est pas observable à l'échelle temporelle de l'homme. Enfin, l'impact environnemental de ces modes de production d'électricité est notable, comme la production de gaz à effet de serre tel que le gaz carbonique (CO_2) ou de déchets radioactifs.

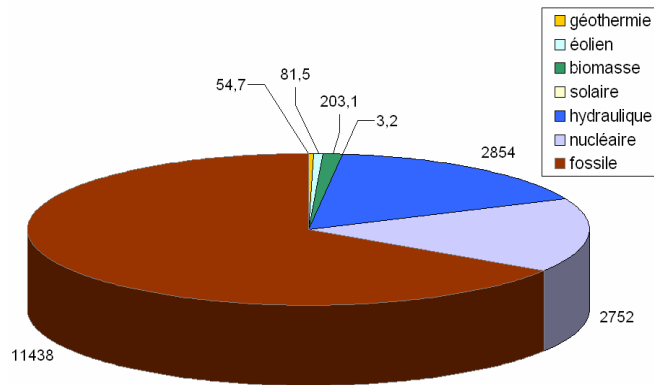


Fig. 1.5 Répartition des ressources sur la production mondiale d'électricité en 2004
(17390 TWh au total)

L'utilisation de sources propres et renouvelables semble apporter une réponse convaincante mais partielle au problème énergétique actuel. L'hydroélectricité existe depuis près d'un siècle et constitue environ 16 % de la production mondiale d'électricité. Néanmoins, ce mode de production reste centralisé et localisé aux endroits où le potentiel présente un intérêt économique. Dans les pays développés, tous les sites répondant à ces critères sont déjà exploités. Ses perspectives de développement sont donc limitées.

Le concept d'« électricité décentralisée » (production de l'électricité sur le lieu même de son utilisation), a encouragé le développement des moyens de production d'origine renouvelable.

La tendance actuelle montre que l'intégration de ce type de ressources dans les systèmes électriques isolés (systèmes insulaires, réseaux villageois) se fait en association avec l'utilisation des ressources conventionnelles, tels les générateurs diesel. Enfin, l'ajout d'un dispositif de stockage d'énergie est parfois nécessaire pour assurer la continuité de la fourniture électrique à l'utilisateur, quand la ressource renouvelable ne peut le faire.

I-3-1 LA BIOMASSE

I-3-1-1 Introduction : La biomasse est la source d'énergie la plus ancienne utilisée par l'humanité. Il s'agit de toute matière organique végétale ou issue des êtres vivants. Elle comprend donc aussi tous les déchets organiques.

Elle est très utilisée, notamment pour produire de la chaleur. Elle représente environ 10% de l'énergie primaire mondiale et se trouve souvent dans les circuits non commerciaux. Pour environ 2,6 milliards d'habitants, elle représente quasiment la seule source d'énergie [5].

I-3-1-2 Comment obtient-on la biomasse ?

La biomasse est une masse de matière organique renouvelable et alternative. Elle comprend les arbres, les plantes, la fibre végétale, les déchets d'origines animale et industrielle et les déchets urbains solides.

Les bois, les cultures agricoles représentent une biomasse disponible comme source d'énergie pour l'homme. La biomasse forestière se compose de déchets d'origine forestière comme les branches d'arbres, les arbres non commercialisables et invendables, les résidus provenant des opérations d'éclaircissage, les produits des scieries tels que l'écorce, les éboutures provenant de l'industrie de transformation du bois, etc. Dans les régions où les conditions climatiques sont favorables, de véritables cultures d'arbres, de plantes aquatiques ou de graminées sont entièrement destinées à la production d'énergie. Par exemple, on plante des arbres feuillus ou résineux à croissance rapide (peuplier, pin, eucalyptus, etc.) sur des surfaces agricoles inoccupées : ce sont des cultures en taillis.



Fig. 1.6 Granulés de sciures et d'ordures ménagères

La biomasse agricole comprend les résidus des récoltes, les cultures "énergétiques" telles que le "panic raide", ainsi que d'autres débris organiques comme les déchets d'origine animale.

Les déchets urbains solides sont considérés comme des sources de biomasse. En éliminant les déchets solides, on obtient de l'électricité. Le gaz d'enfouissement est émis à la suite de la décomposition des matières organiques se trouvant dans un lieu d'enfouissement. Capté, il produit de l'énergie.

La biomasse des végétaux chlorophylliens occupe une place importante sur terre car elle transforme l'énergie solaire en énergie chimique. Ce gisement d'énergie (appelée énergie "verte") se renouvelle constamment (s'il n'est pas surexploité) et constitue la base alimentaire de tous les autres êtres vivants [6].

I-3-1-3 A quoi sert la biomasse ?

En général, la biomasse est utilisée de trois façons principales. Ce sont les suivantes :

- La bioénergie, qui transforme les hydrates de carbone en sources de biomasse afin de créer de la chaleur, de fabriquer des carburants et de produire de l'électricité.
- Les biocarburants, qui utilisent des sources de biomasse pour produire des carburants liquides tels que l'éthanol, le méthane, le biodiésel et la bio-huile.
- Les bioproduits, qui utilisent les sources de biomasse afin de créer des produits commerciaux et industriels (lubrifiants, solvants, adhésifs, émulsifiants). Pour qu'elle produise de la bioénergie, la biomasse peut être transformée en carburant solide, liquide ou gazeux. Il est alors possible de créer de la chaleur et/ou de l'électricité, par différents procédés (combustion, gazéification, pyrolyse, processus biochimiques). La combustion est la méthode traditionnellement utilisée pour produire de l'énergie à partir de la biomasse. Il s'agit de brûler la biomasse afin de créer des gaz de combustion chauds qui peuvent ensuite être utilisés dans des chaudières afin de produire de la vapeur pour alimenter des engins (turbogénérateurs) électriques. La gazéification utilise des températures élevées en présence d'oxygène afin de transformer la biomasse solide en gaz qui alimentera une turbine produisant de l'électricité. La pyrolyse est la décomposition de la biomasse sans présence d'air à des températures supérieures à 250°. Des produits liquides et solides en résultent, faciles à entreposer et à transporter, notamment de la bio-huile, qu'il est ensuite possible d'utiliser comme matière de base pour la production d'électricité. La digestion anaérobie utilise des microorganismes pour décomposer des matières biologiques afin de produire du méthane, le composé principal du gaz naturel. La biomasse, telle que les eaux usées, le fumier ou les déchets provenant de la transformation des aliments, peut être mélangée à de l'eau et mise dans une cuve de fermentation sans air.

Comme dans le cas du gaz naturel, le méthane tiré de la biomasse peut être utilisé dans une turbine afin de produire de l'électricité [7].

I-3-1-4 En quoi la biomasse est-elle avantageuse ?

Les avantages de l'énergie de la biomasse comme source d'énergie sont de plus en plus populaires. En voici les différentes raisons :

- Les ressources de la biomasse sont disponibles à grande échelle.



Fig. 1.7 Un immense champ agricole de biomasse

La biomasse est une ressource renouvelable lorsqu'elle est utilisée et gérée de façon durable.

- Elle permet de réduire la quantité de déchets envoyés aux sites d'enfouissement. Grâce à la combustion de matières inutilisables comme l'écorce, les déchets de construction, on peut produire de l'énergie utile et il est moins nécessaire d'élargir les sites d'enfouissement.
- Elle peut apporter des solutions à l'enjeu du changement climatique. L'utilisation de l'énergie de la biomasse n'augmente pas les émissions de dioxyde de carbone, un des principaux facteurs de l'effet de serre, grâce aux cycles de repousse des plantes et des arbres. L'utilisation de la biomasse peut également réduire les émissions de méthane, un autre gaz à effet de serre.
- La biomasse peut être convertie en différentes formes d'énergie. Par exemple, le bois peut être traité et converti en gaz. Les sites d'enfouissement peuvent produire du méthane, de même que du maïs, du blé et d'autres matières qui peuvent être utilisées pour la

fabrication d'éthanol-carburant liquide. Les cendres issues de la combustion de la biomasse peuvent être valorisées comme engrais [8].

I-3-1-5 L'impact de la biomasse et son développement

La valorisation énergétique du bois est très intéressante :

- C'est une source d'énergie renouvelable à condition de bien gérer les forêts.
- C'est une énergie dont le coût est compétitif et dont le prix varie peu.
- C'est une énergie moins polluante que les énergies fossiles. Il n'y a pas de rejets de soufre dans les fumées. Il n'y a pas d'impact sur l'effet de serre : le CO₂ rejeté dans l'atmosphère correspond à la quantité de CO₂ absorbée par les arbres pendant leur croissance.
- C'est une énergie dont la valorisation est créatrice d'emplois locaux [9].



Fig. 1.8 Principe de préparation en vue d'une exploitation énergétique

I-3-2 ENERGIE HYDRAULIQUE

I-3-2-1 Introduction :

L'énergie hydraulique [10-11], qui provient de la captation de la variation d'énergie potentielle de l'eau entre deux niveaux est une énergie renouvelable.

C'est une source d'énergie propre et non polluante de l'environnement, économique et fiable. La mise en service est simple et très rapide, en effet lorsque l'eau est stockée, il suffit d'ouvrir des vannes pour commencer le cycle de production d'électricité. Ces caractéristiques lui permettent d'être très flexible pour la régulation de la charge électrique, elle est avantageusement utilisée lors des pics de consommation. Ce qui permet d'éviter la prise en route coûteuse des autres types de centrales électriques reliés au même système. L'hydroélectricité met en valeur une richesse naturelle importante et produit une énergie propre et entièrement renouvelable, sans aucune émission à effet de serre[12] . Leur principal désavantage est qu'elles ne sont pas des énergies qui peuvent répondre à des besoins certains, à des moments sûrs, c'est-à-dire que la production d'énergie électrique est dépendante des conditions météorologiques.

Une centrale hydroélectrique se compose principalement d'un réservoir, d'une conduite à la turbine, d'une turbine couplée avec génératrice électrique [13].

L'énergie hydroélectrique utilise la force de l'eau, c.à.d. la combinaison d'un débit et d'une chute afin de produire de l'énergie électrique.

Autrement dit, l'énergie potentielle de l'eau retenue dans le réservoir se transforme en énergie cinétique, ce qui entraîne la rotation de la turbine hydraulique. La turbine est couplée à un alternateur qui va produire à son tour de l'électricité.

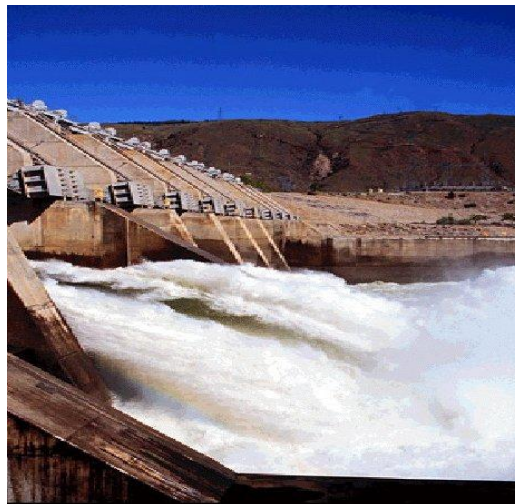


Fig. 1.9 Exemple de barrage

Les centrales hydroélectriques sont classées en trois grandes catégories selon la hauteur de la chute d'eau et par voie de conséquence, selon le débit, on trouve[10];

- **a- Les centrales électriques de haute chute ($h > 300\text{m}$).**

Les centrales de haute chute ont des hauteurs de chute supérieures à 300 m; elles utilisent des turbines Pelton .Ces centrales se trouvent dans les Alpes et dans d'autres régions très montagneuses. La capacité du réservoir est relativement faible

- **b- Les centrales électriques de moyenne chute ($30 < h < 300\text{m}$).**

Les centrales de moyenne chute ont des hauteurs comprises entre 30 m et 300 m ; elles utilisent des turbines Francis). Ces centrales sont alimentées par l'eau retenue derrière un barrage construit dans le lit d'une rivière de région montagneuse. Elles comportent un réservoir de grande capacité (centrale Manic 5, hauteur de chute 155 m, puissance de 1528 MW.

- **c- Les centrales électriques de basse chute ($h < 30\text{m}$).**

Les centrales de basse chute, ou centrales au fil de l'eau, ont des hauteurs de chute inférieures à 30 m ; elles utilisent des turbines Kaplan ou Francis . Ces centrales sont établies sur les fleuves ou les rivières à fort débit (centrale Beauharnois, sur le Saint-Laurent, hauteur de chute 25 m, puissance de 1575 MW .

I-3-3 ENERGIE SOLAIRE

I-3-3-1 Le gisement solaire

Le soleil constitue une source d'énergie gratuite et non polluante, le rayonnement solaire est un rayonnement thermique qui se propage sous la forme d'ondes électromagnétiques. Il produit à la lisière, mais en dehors de l'atmosphère terrestre, un éclairement énergétique à peu près constant et égal à 1370 W/m^2 , appelé de ce fait : constante solaire I_{cs} [14].

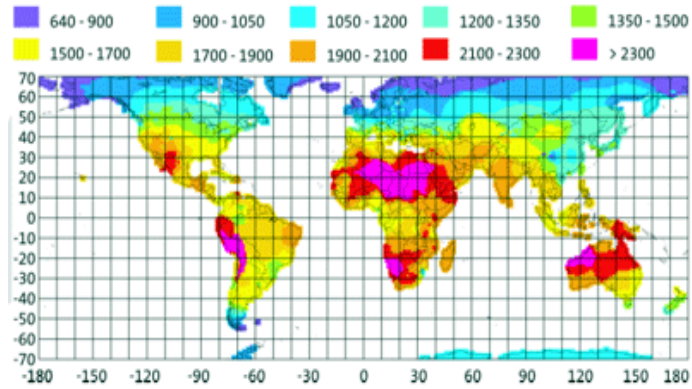


Fig. 1.10 Le gisement solaire mondial

Le rayonnement mini-maxi est exprimé ici en kWh/m²/an.

Par sa situation privilégiée, l’Algérie dispose du plus grand gisement solaire du bassin méditerranéen. La durée moyenne d’ensoleillement du territoire algérien dépasse les 2000 heures annuelles, pour atteindre près de 3500 heures d’ensoleillement dans le désert du Sahara. Le total d’énergie reçue est estimé à 169 400 TWh/an, soit 5000 fois la consommation d’électricité annuelle du pays [15].

Régions Sahara	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Durée moyenne d’ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

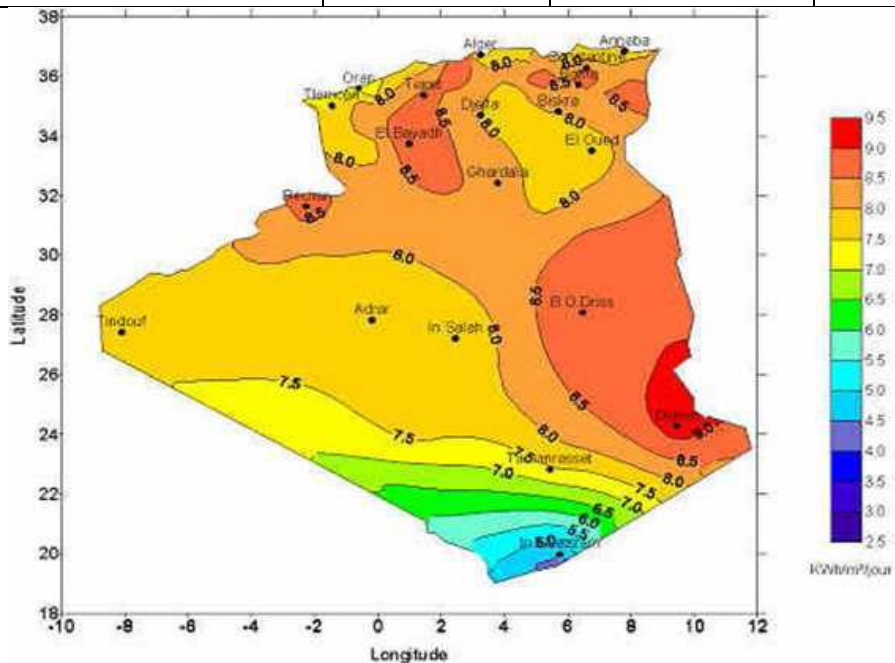


Fig. 1.11 Carte de l'irradiation en Algérie (mois de juillet)

I-3-3-2 LE SOLAIRE THERMIQUE



Fig. 1.12 Vue générale de la plate forme d'expérimentation des capteurs solaires thermiques et du chauffe eau solaires au CDER, Bouzaréah-Alger.

L'énergie solaire thermique connaît une expansion rapide pour des utilisations à petite échelle et individuelles. Elle est récupérée dans des installations prévues pour concentrer l'effet thermique des radiations solaires (panneaux collecteurs thermiques). Cette chaleur issue des panneaux solaires peut être utilisée notamment pour l'eau chaude sanitaire individuelle et collective.

- Dans l'agriculture (serres, séchoirs, fourrage, etc.)
- Le chauffage des bâtiments et de l'habitat.

Cette forme d'énergie gagne du terrain en raison de sa rentabilité et de sa facilité d'installation et d'entretien[16].

I-3-3-3 LE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE



Fig. 1.13 Production électrique à base modules photovoltaïques

L'une des sources d'énergie les plus prometteuses en terme de débouchés pour l'emploi, vient de la conversion des radiations solaires en énergie électrique à l'aide des systèmes photovoltaïques.

L'utilisation de la technologie photovoltaïque apporte de multiples avantages pour l'environnement dans le sens où elle utilise une énergie inépuisable (le soleil), n'émet aucun bruit, possède une durée de vie supérieure à 25ans et affiche des coûts de transfert d'énergie, de maintenance et d'exploitation relativement faibles.

Cependant, la production et la gestion en fin de vie des panneaux solaires, au même titre que toute énergie, engendre des déchets qu'il faut traiter.

Cette énergie se développe comme une solution durable créant un marché à croissance rapide et offrant d'importants avantages sociaux en termes de création d'emplois, d'indépendance énergétique et de développement rural.

La forte croissance du marché photovoltaïque européen laisse présager la création d'environ 3000 à 4000 nouveaux postes chaque année en Europe dont un grand nombre est considéré comme étant de haute technologie.(EarthCare – Employment in the Renewable Energy Sector – october 2006). Cette énergie est en général produite près du point d'utilisation, ce qui permet de réduire les pertes de transmission et d'améliorer la fiabilité du service pour les consommateurs. Les modules photovoltaïques s'adaptent en taille et en puissance aux besoins de l'utilisateur final, cependant bon nombre d'installations sont actuellement raccordées sur le réseau permettant de revendre l'électricité produite. Le solaire propose des perspectives d'emploi, davantage dans l'installation et l'entretien des systèmes photovoltaïques.

La croissance rapide de ce marché engendrera la création de nombreux postes dans ce domaine [17].

I-3-4 LA GEOTHERMIE

I-3-4-1 Introduction

La géothermie (du grec “Gê”, la terre, et “Thermie”, la chaleur) consiste à capter la chaleur de la croûte terrestre pour produire du chauffage (température inférieure à 90°) ou de l’électricité (température entre 90 et 150°) [18].

La géothermie a pour origine l’évacuation de la chaleur de l’intérieur du globe, chaleur qui a pour origine la désintégration de certains corps radioactifs. Cela provoque un flux moyen de 60 W/m² à la surface. Ce flux est inférieur à celui du soleil (340 W/m² en moyenne), mais à certains endroits il peut s’élever jusqu’à 200 W/m². Selon la température, il existe plusieurs types d’applications : la géothermie à haute température (de 120 à 200 °C) qui produit de l’électricité ; et la géothermie à basse température (de 50 à 100 °C) qui est surtout employée pour le chauffage des locaux. Malheureusement, les coûts de forage s’accroissent très rapidement avec la profondeur, et la température augmente également [19].



Fig. 1.14 Le gradient géothermique

La géothermie se place au premier rang parmi les énergies renouvelables avec une production électrique représentant plus de 79 % de la production globale. Les travaux sur l’évaluation du potentiel géothermique à travers l’élaboration de l’atlas géothermique du Nord algérien nous permettent de dresser des cartes préliminaires de l’inventaire des

sources thermales et une esquisse du gradient géothermique. Les sources thermales représentent à elles seules plus de 14 MWth du potentiel existant [19].

I-3-4-2 La géothermie dans le monde

La géothermie, comparée aux autres sources d'énergies renouvelables, se place au premier rang avec 79,6 % de la production électrique mondiale évaluée en 1996, à 42 053 GWh/an pour une capacité installée de 7 049 MWe [20].

Pour ce qui est de l'utilisation directe, mode d'exploitation le plus répandu dans le monde, la puissance totale est évaluée à près de 37.000 GWh/an pour une capacité installée de près de 10.000 GWh/an [21]. Selon les références citées plus haut, l'utilisation directe de cette énergie, se répartit comme suit : Chauffage des locaux:33%, Balnéothérapie:19%, Chauffage des serres: 14 %, Pompe à chaleur: 12 %, Pisciculture: 11 %, Industrie:10 %.

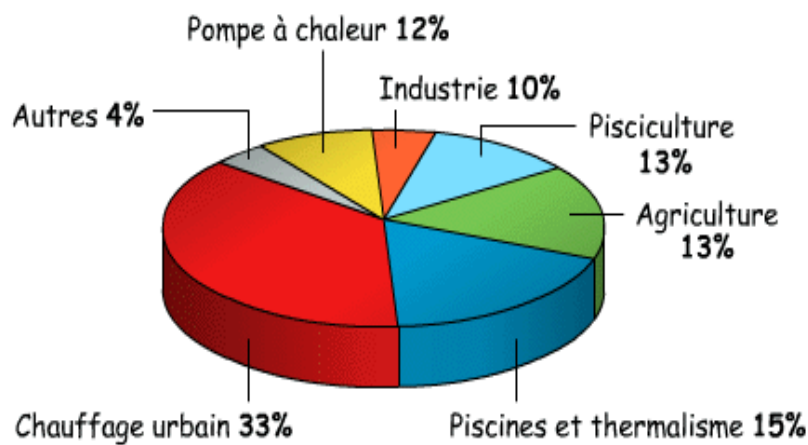


Fig. 1.15 Répartition des ressources géothermiques mondiales

I-3-4-3 Les ressources géothermiques du nord de l'Algérie

A travers l'existence de nombreuses sources thermales réparties sur la presque totalité du nord algérien, nous pouvons déjà affirmer que le potentiel géothermique de cette région est non négligeable. Une évaluation rapide de la puissance représentée par les principales sources thermales situe cette dernière à plus de 140 MWth [22].

Plus de 200 sources d'eau chaude ont été répertoriées dans le nord et le nord ouest de l'Algérie. Environ 33% d'entre elles ont des températures supérieures à 45°, la plus chaude étant située à Biskra(118°). Plus au sud, délimitée par Biskra au nord, In Salah au sud et Adrar à l'ouest, la nappe albiene constitue une zone de plusieurs km, caractérisée

par une eau à température moyenne de 57°. L'ensemble du débit d'exploitation des sources et cette nappe représente une puissance estimée à 700MW/an[23].

I-3-5 ENERGIE EOLIENNE

I-3-5-1 Introduction

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. Pour l'année 2010, une puissance éolienne installée en Europe de l'ordre 70000 MW [24].

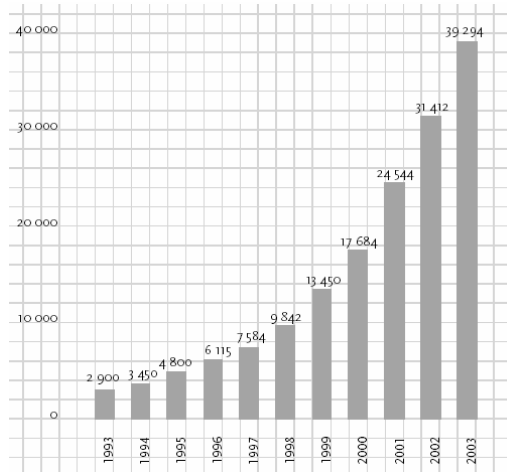


Fig. 1-16 Puissance éolienne cumulée dans le monde en MW [25]



Fig. 1.17-a Eolienne



Fig. 1.17-b Ferme éolienne

I-3-5-2 Potentiel éolien en Algérie

Les ressources énergétiques de l'Algérie ont déjà été estimées par le CDER depuis les années 90 à travers la production des atlas de la vitesse du vent et du potentiel énergétique éolien disponible en Algérie.

Ceci a permis l'identification de huit zones ventées susceptibles de recevoir des installations éoliennes :

- Deux zones sur le littoral
- Trois zones sur les hauts plateaux
- Et quatre zones en sites sahariens.

Le potentiel éolien technique de ces régions a été estimé à 172 TWh/an dont 37 TWh/an économiquement exploitable soit l'équivalent de 75% des besoins nationaux en 2007.

Les trois régions situées au sud ouest du Sahara (Tindouf, In Salah et Adrar) semblent être les plus favorables à l'installation de fermes éoliennes car elles cumulent à elles seules un potentiel économique approchant les 24 TWh/an [26].

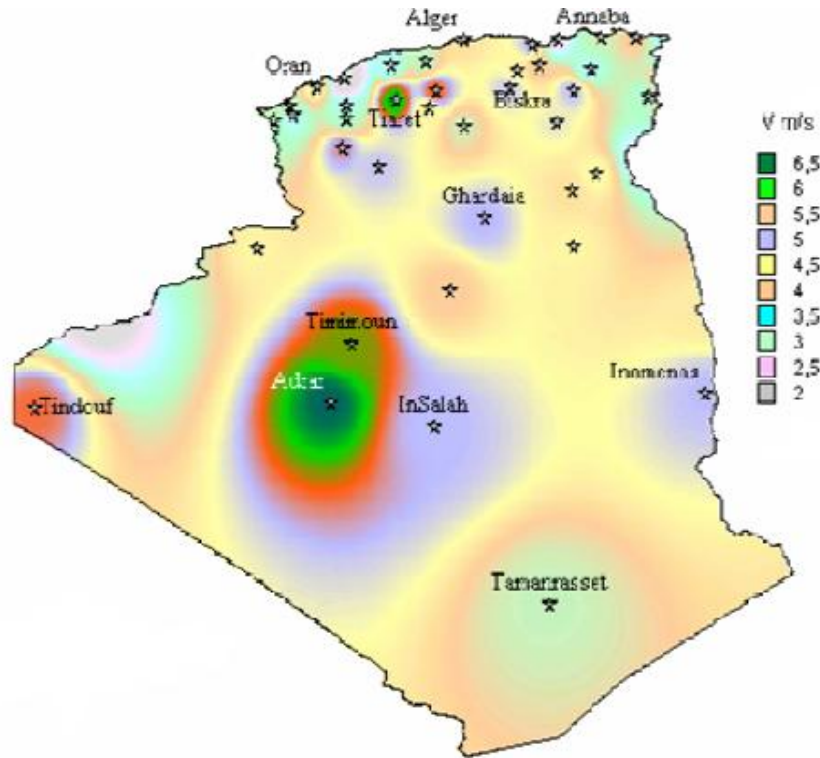


Fig. 1-18 Carte de la vitesse moyenne du vent à 10 m du sol(m/s) en Algérie[26].

I-3-5-3 Notions théoriques sur l'éolien

I-3-5-3-1 Loi de Betz :

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passant par la section de la surface active S de la voilure, la puissance de la masse d'air qui traverse la surface équivalente à la surface active S de l'éolienne est donnée par :

$$P_V = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_V^3 \quad (1.1)$$

Selon la loi de Betz, cette puissance ne pourra jamais être extraite dans sa totalité [27].

La puissance maximale pouvant être recueillie par une éolienne est égale à la limite de Betz :

$$P_{max} = \frac{16}{27} \cdot P_V = 0,59 \cdot P_V \quad (1.2)$$

Sous cette forme, la formule de Betz montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 59% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde. De cette façon le coefficient de puissance maximal théorique est défini :

$$C_p^{\text{opt}} = \frac{P_{\text{max}}}{P_V} = \frac{2 \cdot P_{\text{max}}}{\rho \cdot S \cdot V_V^3} = 0,59 \quad (1.3)$$

En réalité, jusqu'à présent, seulement 60 à 70% de cette puissance maximale théorique peut être exploitée par les engins les plus perfectionnés. Ce rendement, appelé coefficient de puissance C_p de l'éolienne, est propre à chaque voilure. Ce coefficient lie la puissance éolienne à la vitesse du vent :

$$C_p = \frac{2 \cdot P_{\text{eol}}}{\rho \cdot S \cdot V_V^3} \quad (1.4)$$

Pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne, une grandeur spécifique est utilisée : la vitesse réduite λ , qui est un rapport entre la vitesse linéaire en bout de pâles de la turbine et de la vitesse du vent.

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{V_V} \quad (1.5)$$

I-3-5-4 Avantages et inconvénients 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.

I-3-5-4.1 Avantages :

- ✚ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, écologique, fiable, économique, et inépuisable, c'est une énergie qui respecte l'environnement [28].
- ✚ 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.
- ✚ L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas des déchets toxiques ou radioactifs [29].
- ✚ 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 [29].
- ✚ La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à des nombreuses autres technologies de production d'énergie

conventionnelles [29].

I-3-5-4.2 Inconvénients :

- ✚ C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables [29].
- ✚ L'impact visuel.
- ✚ Les bruits mécaniques ou aérodynamiques [30].
- ✚ Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux.
- ✚ La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne [29].
- ✚ 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 [29].

I-4 CONCLUSION

Une brève description du domaine des énergies renouvelables a été présentée dans ce chapitre.

On a cité les différentes sources d'énergie renouvelables à savoir : l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, biomasse et géothermique, leurs avantages et inconvénients, les puissances cumulées à l'échelle mondiale et Algérienne.

Les énergies renouvelables semblent être une réponse pertinente au défi énergétique actuel. Ressources par essence inépuisables à l'échelle des temps humains, leur récupération et leur conversion en énergie électrique représente un impact sur l'environnement plus faible que les sources fossiles et fissiles. De plus, la multiplicité des moyens de récupération couplée à l'excellente répartition géographique de la ressource permet d'envisager ces modes de production sur l'ensemble du globe terrestre.

Ainsi, les systèmes de production d'énergie électrique à partir d'énergie renouvelable connaissent des taux de croissance extrêmement élevés ces dernières années.

BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE I

- [1] The Sun as an Energy Resource Technology Fundamentals. Shoubra faculty of engineering, p:2-4.
- [2] B. Flèche - D. Delagnes.Energie solaire photovoltaïque.doc.. juin 2007
- [3] EurObserv'ER. Seventh inventory of worldwide electricity production from Renewable energy sources, 2005.
- [4] Multon B. Ressources énergétiques et consommation humaine d'énergie. Techniques de l'Ingénieur, traité D3900, à paraître.
- [5] Christian Ngô & Jean Bonal. Energies alternatives, *Omiscience* .La biomasse .
- [6] <http://crdp.ac-caen.fr/energies/Biomasse-Imp.htm>
- [7] <https://scribe.libergier.fr/campus/claroline/course/index.php?cid=EDD>
- [8] http://developpement_durable.sosblog.fr/Premier-blog-b1/56.La-biomasse-b1-P-41htm.
- [9] <http://amira99.skyrock.com/93.html>.
- [10] Quillet .Encyclopédie des sciences industrielles : Application électricité électronique.Tome 1 .Paris 1973.
- [11] Encyclopédie canadienne :''Electricité,production''.canadianencyclopedia.com/
- [12] IC.Mendieta . *L'économie des ressources en eau : de l'internalisation des extrémités la gestion intégrée*. Doctorat en sciences économiques ,Université des sciences et technologie de Lille.2005.
- [13] A.J.Wood,B.F.Wallenberg .Power generation,operation and control.. John Wiley & Sons,Inc.1984.
- [14] Agence de l'environnement et de la maitrise d'énergie. 2002.
- [15] www.neal-dz.net.
- [16] Tests des capteurs solaires à circulation liquide et des chauffe-eau solaires, Bulletin des Énergies Renouvelables - N° 24 2012, Centre de Développement des Énergies Renouvelables.
- [17] Article publié dans Énergie et développement durable. Données PVGIS <http://re.jrc.cec.eu.int/pvgis/pv/index.htm>.

- [18] fr.wikipedia.org/wiki/Géothermie.
- [19] Fekraoui .A et. Abouriche.A .Ressources Géothermiques du Nord de l'Algérie.
Eléments de l'Atlas Géothermique. *Energ. Ren.* 1999, P:159-162.
- [20] Fridleifsson I.B. Geothermal in Comparison with other Energy Resources. IGA NEWS, Newsletter of the International Geothermal.Association., 1999, 35.
- [21] Fridleifsson I.B. Direct Use of Geothermal Energy Around the World. *GEO-HEAT, Center Bulletin*, 1998,. 19, 4.
- [22] Fekraoui.A et Abouriche. M, ‚Algeria Update Country Report’, Proceedings of the World Geothermal Congress.,1995,1, 31-34.
- [23] Belakehal.S. *Conception et commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables*,Doctoraten Electrotechnique,Constantine,2010.
- [24] Energies renouvelables. <http://www.energies-renouvelables.org>.
- [25] Le baromètre de l'éolien. Systèmes solaires n°159. Février 2004. EurObserv'ER.
- [26] Kasbadji Merzouk,N. Quel avenir pour l'Énergie Éolienne en Algérie ?.*Bulletin des énergies renouvelables*,14, Décembre 2008, 6-7.
- [27] Danish Wind Industry Association.<http://www.Wind power.org>.
- [28] Ramakumor,R., Naeter,A. Role of renewable energy in the development and electrification of remote and rural areas, *Power engineering society general meeting IEEE*, June 2004, 2, 2103-2105.
- [29] Camblong,H. *Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable*. Doctorat, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers centre de Bordeaux. 18 Décembre 2003.
- [30] Chang,L. Systèmes de conversion de l'énergie éolienne, *IEEE Canadian Review*, Été 2002, 1-5.

CHAPITRE II

RESSOURCES

ENERGETIQUES MONDIALES

ET ALGERIENNES

II-1 INTRODUCTION

Les ressources ou réserves énergétiques mondiales (conventionnelles et prouvées) d'énergies non renouvelables (fossiles et uranium) ont été estimées en 2008 à 965 milliards de tonne d'équivalent pétrole (tep), soit 85 ans de production actuelle. Cette durée est très variable selon le type d'énergie : 44 ans pour le pétrole conventionnel, 183 ans pour le charbon. La consommation énergétique mondiale (énergie finale) était, selon Agence internationale de l'énergie de 8,2 milliards de tep en 2007 , pour une production énergétique mondiale (énergie primaire) de 12 milliards de tep , 80,4 % de cette production provenait de la combustion d'énergies fossiles. Le reste de la production d'énergie provient du nucléaire et des énergies renouvelables (bois de chauffage, hydro-électricité, éolien, ..) [1].

II-1-1 LE PETROLE

a- Production et commerce international

En 1998, la production mondiale de pétrole brut a été de 3,7 milliards de tonnes (ou de tep). Cette production se répartit suivant les grandes régions du monde en : 30% pour le Moyen-Orient, 30% pour l'OCDE (Amérique du Nord et Europe occidentale), 10% pour l'ex-URSS, l'Amérique Latine, l'Afrique et l'Asie hors Moyen-Orient.

► Les principaux pays producteurs sont : l'Arabie Saoudite (13% du total mondial), les Etats-Unis (11%), la Russie (9%), les autres étant au niveau de 5% (Iran, Venezuela, Mexique, Chine, Norvège) ou au-dessous (Royaume-Uni, Emirats Arabes Unis). Les exportations de pétrole sont de l'ordre de 1,7 milliards de tonnes. Le pétrole est facile à transporter, soit par oléoducs (tuyaux sur terre), soit par bateaux (les " pétroliers) ; son commerce est de ce fait véritablement mondial.

► Les grands exportateurs sont l'Arabie Saoudite (19%), la Norvège (8%) et, entre : 7% et 3% : la Russie, l'Iran, les Emirats Arabes Unis, le Venezuela, le Nigeria, le Royaume-Uni, le Mexique, le Koweït.

► Les grands importateurs sont les Etats-Unis (24%), le Japon (13%), et autour de 6% à 5% : l'Allemagne, la Corée, la France, l'Italie.

On juge ainsi de l'importance du Moyen-Orient comme zone de production et surtout d'exportation : du fait de l'importance du pétrole dans l'économie des pays les plus

puissants de la planète, . La convoitise vis-à-vis des richesses pétrolières de cette zone est encore accentuée par le fait qu'elle est également la première au monde pour les réserves de pétrole.

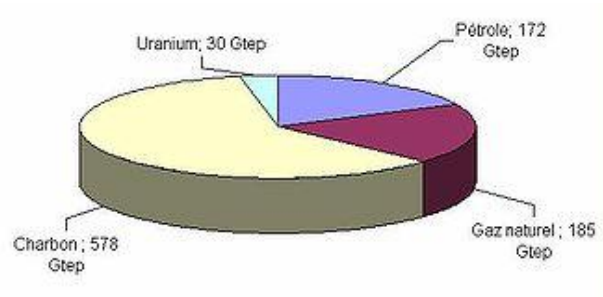


Fig. 2.1 Réserves énergétiques mondiales estimées en 2008

a- Ressources et réserves

Pour estimer les quantités de matières premières énergétiques disponibles sur la planète, on distingue les réserves qui sont des quantités assurées, suivant les techniques d'exploitation du moment et les ressources qui sont des quantités jugées accessibles du fait de leur présence physique quasi-assurée. Les ressources incluent les réserves et sont évidemment plus élevées que celles-ci.

Selon l'étude globale la plus récente du WEA (" World Energy Assessment "), l'estimation actuelle des réserves de pétrole (gisements identifiés ou prouvés de pétrole dit " conventionnel " : sous la forme de gisements tels que ceux exploités aujourd'hui et à des coûts de production du même ordre) se situe à 150 milliards de tonnes. Les deux tiers de ces réserves sont situées au Moyen-Orient et en Afrique du Nord.

Si l'on se base sur le premier chiffre des réserves, on voit qu'il correspond à environ quarante années de consommation mondiale au niveau annuel actuel. Certains annoncent, sinon une pénurie de pétrole à cet horizon, du moins une forte augmentation de son coût. Les pétroliers répondent à cela avec quelque raison que, depuis la seconde guerre mondiale, les réserves ont toujours représenté environ 40 années de la consommation annuelle du moment. Sans en faire une règle, on peut effectivement penser que les ressources sont suffisantes et qu'il y aura un passage lent de l'exploitation des pétroles actuels aux pétroles non-conventionnels, avec une augmentation de coût progressive.

Cela à condition que l'augmentation de la demande n'explose pas, c'est à dire que la consommation des transports soit maîtrisée (pour des raisons de ressources mais aussi de protection de l'environnement).

Le pétrole est précieux ,et l'utiliser de façon rationnelle et économe, surtout dans les pays riches qui le gaspillent, va certainement dans le sens du développement durable et permet aux pays et aux populations les plus pauvres d'avoir progressivement accès à cette matière qui constitue l'une des plus grandes richesses de la planète.

II-1-2 LE GAZ NATUREL

II-1-2.1 Production et commerce international

En 1998, la production mondiale de gaz naturel a été de 1935 Mtep (soit 2365 milliards de m³, unité couramment utilisé pour cette source d'énergie). Cette production se répartit suivant les grandes régions du monde en : 47% pour l'OCDE, 29% pour l'ex-URSS, 9% pour l'Asie (hors Moyen-Orient), 7% pour le Moyen-Orient, 4% pour l'Afrique, l'Amérique Latine.

Les principaux pays producteurs sont : la Russie (24%), les Etats-Unis (24%), le Canada (7%) puis entre 4 et 2% : le Royaume-Uni, les Pays-Bas, l'Indonésie, l'Algérie, l'Ouzbékistan, la Norvège, l'Arabie Saoudite.

Les exportations de gaz naturel ne représentent que 23% de la production totale. Du fait de son état gazeux, le transport du gaz naturel est plus coûteux que celui du pétrole. Pour les transports terrestres, sur des distances de plusieurs milliers de km, on utilise le gazoduc à haute pression. Pour les transports maritimes, la technique utilisée est la liquéfaction du gaz (GNL gaz naturel liquéfié).

Les principaux pays exportateurs sont la Russie (37%), le Canada (15%), puis, autour de 7%, les Pays-Bas, l'Algérie, la Norvège, l'Indonésie.

II-1-2.2 Ressources et réserves

Les estimations les plus récentes des réserves de gaz naturel " conventionnel " (Conseil mondial de l'énergie, 1998) se situent entre 150 000 et 180 000 milliards de m³.

Ces réserves sont réparties entre de nombreuses régions du monde, mais les deux plus riches sont l'ex-URSS (40%) et l'ensemble Moyen-Orient et Afrique du Nord (34%). Cette valeur pourrait être presque doublée par l'utilisation de techniques nouvelles permettant d'améliorer le taux de récupération du gaz dans les réservoirs.

Les ressources en gaz naturel non conventionnel, à des coûts croissant avec la difficulté d'accès, atteignent des niveaux considérables : de l'ordre de 25 millions de milliards de m³.

II-1.3 L'uranium

L'uranium naturel est la matière première de base des combustibles utilisés dans les réacteurs nucléaires producteurs de chaleur des centrales électriques dites "centrales nucléaires". Les ressources d'uranium sont très abondantes et les réserves se définissent par le coût de production.

II-1.4 Les énergies renouvelables

En dehors de la grande hydraulique (les grands barrages) pour la production d'électricité et la biomasse dans ses usages traditionnels, le potentiel des énergies renouvelables est encore peu utilisé car ces énergies sont en général diffuses, peu stockables et peu transportables. Le solaire photovoltaïque (production directe d'électricité par action de la lumière sur des couches de silicium), l'éolien, la petite hydraulique, la géothermie à haute température, se développent d'abord sur des sites où la ressource existe et où l'accès aux sources classiques (combustibles fossiles, électricité de réseau) est très onéreux, dans les îles par exemple. Cependant, la petite hydraulique et l'éolien, du fait de leur développement en pleine croissance, se rapprochent de la zone de compétitivité avec la production d'électricité d'origine thermique fossile. L'évaluation du potentiel, pour avoir un sens à un moment donné de l'évolution technologique, doit donc se faire sur la base des ressources effectivement utilisables..

La ressource mondiale la plus importante est la biomasse (bois et matières végétales, déchets végétaux et animaux). L'étude WEA (" World energy assessment ") évalue à environ 8 milliards de tep le potentiel maximum de biomasse exploitable pour des besoins énergétiques à l'horizon 2050. Les ressources hydrauliques s'élèvent, d'après J-M. Martin (" L'économie mondiale de l'énergie "), à 30 000 milliards de kWh par an, dont environ 10 000 exploitables avec les techniques actuelles et 2500 effectivement exploitées. Les

capacités de financement, les impacts environnementaux et la localisation de certains sites, très éloignés des lieux de consommation, limitent le taux d'exploitation de ce potentiel.

La quantité d'énergie solaire que la terre reçoit en une année est considérable. Benjamin Dessus a fait des estimations dans les conditions actuelles de production et de consommation dans les différentes régions du monde. Il estime la réserve aujourd'hui utilisable de solaire thermique (eau chaude solaire) à 170 Mtep par an et le solaire photovoltaïque à 700 milliards de kWh par an. L'énergie éolienne, actuellement en plein développement, a un potentiel estimé par le Conseil Mondial de l'Energie (1994) d'une production de 19 000 milliards de kWh par an par des installations à terre (et en supposant que 4% maximum de la surface est occupée par des éoliennes).

II-1-5 La production d'électricité

En 1998, la production d'électricité dans le monde a été de 14350 milliards de kWh. Cette électricité est produite soit sous forme dite " primaire " à partir de l'hydraulique, de l'éolien, de la géothermie, du solaire ou de l'énergie nucléaire, soit sous forme dite " secondaire " à partir des combustibles fossiles, charbons, gaz ou produits pétroliers (fuel lourd ou gazole).

Les contributions à la production totale sont : 18,5% pour l'hydraulique ; 1,5% pour les autres sources renouvelables ; 17,5% pour le nucléaire ; 9,5% pour les produits pétroliers ; 15% pour le gaz naturel ; 38% pour le charbon. 64% de cette production a lieu dans les pays de l'OCDE. Les pays les plus grands producteurs d'électricité sont les Etats-Unis (27%), la Chine (8%), le Japon (7%), la Russie (6%) [2].

II-2 RESSOURCES ENERGETIQUES ALGERIENNES

L'Algérie dispose de richesses naturelles considérables et diversifiées, notamment en hydrocarbures, où elle occupe la 15^{ème} place en matière de réserves pétrolières (45 milliards de tonnes en équivalent pétrole pour les réserves prouvées en pétrole), la 18^{ème} en matière de production et la 12^{ème} en exportation. Ses capacités de raffinage peuvent atteindre 22 millions de tonnes/an. Concernant le gaz, l'Algérie occupe la 7^{ème} place dans le monde en matière de ressources prouvées, la 5^{ème} en production et la 3^{ème} en exportation. Véritable géant énergétique, l'Algérie, forte de 50 % des réserves, de 48 % de

la production totale et de l'impressionnant taux de 94 % des exportations de gaz naturel, n'a pas de rivale dans la Méditerranée, où elle est classée premier producteur et exportateur de pétrole et de gaz naturel.

L'Algérie est le troisième fournisseur de l'Union Européenne en gaz naturel et son quatrième fournisseur énergétique total [3].

Outre ces deux richesses, l'Algérie recèle dans son sous-sol d'immenses gisements de phosphate, de zinc, de fer, d'or, d'uranium, de tungstène, de kaolin, etc.



Fig. 2.2 Un gisement de pétrole

II-3 BESOINS ENERGETIQUES

II-3-1 Besoins en énergie primaire

Une énergie est dite primaire si elle est disponible dans la nature sans aucune transformation.

Par opposition, une énergie est dite finale lorsque c'est sous cette forme qu'elle est commercialisée (l'électricité, le gaz naturel ou l'essence distribuée à la pompe sont des formes d'énergie finale).

D'après l'Agence Internationale de l'Énergie [4] la production mondiale d'énergie primaire a environ doublé en l'espace d'une trentaine d'années, passant de 5700 Mtep en 1971 à 12000 Mtep fin 2007, ce qui correspond à une progression moyenne annuelle de 2;3%. La figure 2.3(a) représente l'évolution de la production mondiale d'énergie primaire par source entre 1971 et 2007. Il est possible de remarquer la part largement majoritaire des sources fossiles dans la production mondiale d'énergie primaire. La figure 2.3(b)

représente l'énergie primaire en 2007. Les énergies fossiles répondaient encore en 2007 à environ 80% de la production d'énergie primaire au niveau mondial.

L'énergie nucléaire représentait quant à elle 5% de ce mix. La production d'énergie d'origine renouvelable représentait en 2007 environ 16% de l'énergie primaire totale produite dans le monde et provenait quasiment exclusivement de la biomasse et de l'énergie hydraulique. La part provenant des "nouvelles" sources renouvelables comme l'énergie photovoltaïque ou l'éolien représente encore une part relativement faible du paysage énergétique mondial bien qu'elles connaissent actuellement une croissance rapide (plus de 30% par an) qui devrait leur permettre d'atteindre d'ici peu une proportion respectable.

La figure 2.3(c) rappelle la répartition de la demande énergétique primaire mondiale par secteur d'activité, il s'agit d'une projection pour 2010 réalisée en 2004 par l'Agence Internationale de l'Énergie [5]. Une proportion importante (31%) de la demande énergétique primaire mondiale est destinée à la production électrique, celle-ci connaît une croissance continue et représente donc une caractéristique importante dans l'optique de la maîtrise de nos consommations énergétiques.

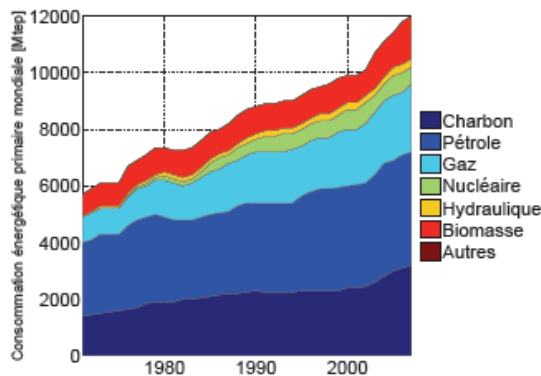


Fig. a : Évolution de la consommation mondiale d'énergie primaire

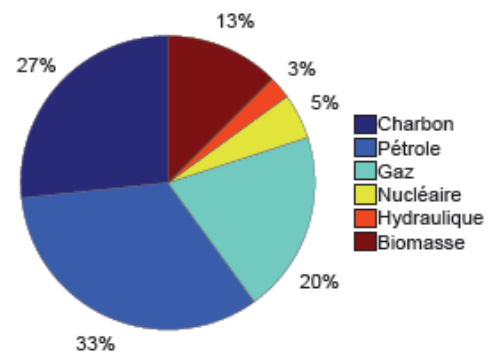


Fig. b : L'énergie primaire

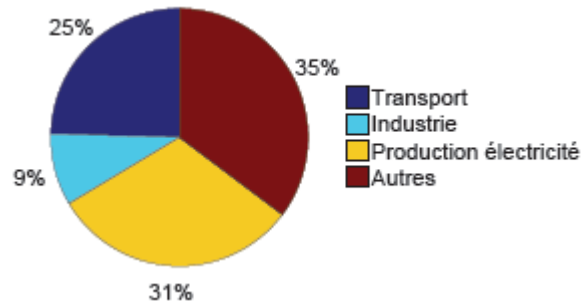


Fig. c Répartition par secteur de la demande énergétique primaire mondiale en 2010

Fig. 2.3 Consommation mondiale d'énergie primaire [4, 5]

	1980	1983	1985	1990	1993	1995	1997	1999
Secteur « industrie et BTP »	2609	3577	4270	3874	4077	4167	3802	4218
Secteur « transports »	2598	3373	3688	4384	4583	4262	4148	4324
Secteur « ménages et autres »	3286	4148	5285	5942	6990	7317	7276	8658
Consommation finale	8493	11098	13243	14200	15650	15746	15226	17200

Tableau. 2.1 Consommation d'énergie en million de tonnes équivalentes pétrole (tep) par secteur [7]

II-3-2 Besoins en électricité

La figure 2.4(a) représente l'évolution de la production mondiale d'électricité entre 1971 et 2007. Elle montre une augmentation continue et rapide. En effet, la production a plus que triplé, passant d'environ 5600 TWh à 20000 TWh (soit une croissance moyenne annuelle de 3,6%). Comme le rappelle la figure 2.3(b), l'électricité est de nos jours encore majoritairement produite à base de ressources non renouvelables (fossiles : 69% et fissiles : 14%).

La production d'électricité à partir de systèmes photovoltaïques et éoliens est encore anecdotique.

En 2007, elle ne représentait que 3,2% de la production électrique européenne et 0,9% au niveau mondial [6]. Cependant, son taux de croissance est très élevé.

Il est intéressant ici également d'analyser la répartition par secteur d'activité de la consommation d'électricité. Malheureusement, cette répartition au niveau mondial ou européen résultant de l'agrégation des données d'un ensemble de pays est extrêmement fastidieuse à déterminer. C'est la raison pour laquelle nous nous concentrerons sur les données françaises. Les figures 2.4(a) et 2.4(b), montrent l'évolution entre 1973 et 2008 de la répartition par secteurs de la consommation mondiale d'électricité .

Il est possible de remarquer que la consommation électrique européenne a suivi la tendance mondiale en triplant en l'espace de 35 ans. De plus, la part de la consommation électrique relative à l'ensemble des secteurs résidentiel et tertiaire est passée de 37% à 67%, devenant le secteur le plus énergivore.

A l'inverse, le secteur industriel semble avoir relativement bien maîtrisé sa consommation électrique (passant de 72 TWh à 121 TWh dans le même laps de temps) [4].

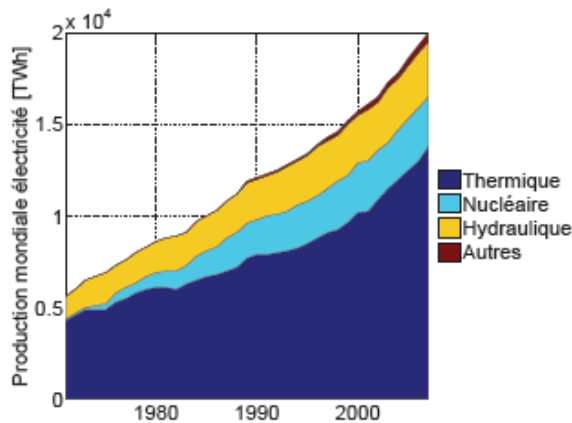


Fig. 2.4-a Évolution de la production mondiale d'électricité

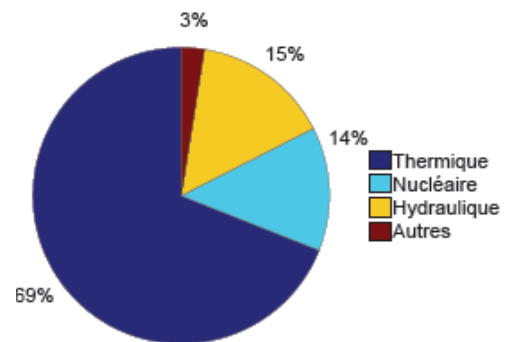


Fig. 2.4-b Types de production mondiale

II-3-3 La consommation énergétique des différents secteurs en Algérie

L'importance de l'énergie dans la vie socio-économique a multiplié les travaux sur les questions énergétiques, il est connu que pour notre pays, les produits pétroliers et surtout le gaz ont déjà affiné leur primauté comme matière première pour la pétrochimie et la thermoélectricité, et comme source d'énergie essentielle pour le transport, l'industrie et les besoins ménager.

Cela est justifié par la décision du 24 février 1971, l'Algérie prend la décision de nationaliser le secteur pétrolier et recouvre ainsi la maîtrise et le contrôle de ses ressources pétrolières et gazières [8].

La consommation globale d'énergie en Algérie, est multipliée par quatre entre les années 1980 et 2000 [9], cette évolution est indiquée sur le (Tableau 2-1) et cela pour les différents types d'énergie utiliser par différents secteurs.

Concernant la consommation de l'énergie en Algérie (figure 2-5), c'est le secteur résidentiel et tertiaire qui domine de l'ordre de 45.7%, suivi du secteur des transports de 27.8% et ensuite industriel BTP de 26,8%.

La consommation d'énergie finale par habitant est de 0,48 TEP en 1990 son évolution passera de 0,71 TEP en 2000 à 1.35 TEP en 2010 et 1,88 TEP en 2020 [10].

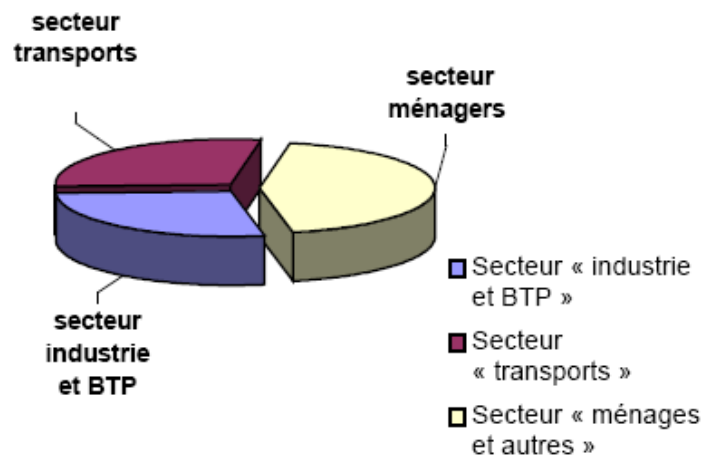


Fig. 2.5 Consommation d'énergie par secteur (période 1980-2000)

II-4 CONCLUSION

Suite à cette étude statistique et états des lieux des ressources énergétiques aussi bien mondiales que nationales, on ressent que les chercheurs sont interpellés par cette question. Les réserves de ces ressources s'épuisent plus vite que prévus donc afin de mieux gérer nos ressources par la recherche de nouvelles énergies de substitutions respectueuses de l'environnement, parmi ces moyens nous recommandons de changer nos addictions, le développement des énergies renouvelables, l'économie des énergies ainsi que la cogénération.

Le milieu industriel est le secteur le plus énergivore c'est pour cette raison que nous allons dans la suite de cette thèse nous focaliser à l'usine Arcelor Mittal la plus importante dans l'Est Algérien. Vu l'espace qu'elle occupe, située sur une plaine nous avons testé comme

premier moyen de réduction d'énergie produite par le gaz naturel l'implantation d'une ferme éolienne.

BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE II

- [1] Encyclopédie libre.
- [2] Bernard laponche La production d'énergie et les ressources énergétiques (3)
'Energie et développement durable : l'avenir est ouvert 2003.
- [3] www.andi.gov.dz.htm .
- [4] Key Worl Energy Statistics. International Energy Agency, 2009.
- [5] World Energy Outlook 2004. International Energy Agency, 2004.
- [6] La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde-Dixième inventaire.Observ'er,2008.
- [7] Ministère de l'Ecologie,de l'Energie, du Développement Durable et de la mer.
Site Web : [htt//www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr](http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr),visité le 28/12/2009
- [8] Chitour.Ch.E, L'énergie - les enjeux de l'an 2000 – vol/2 offices des publications universitaires, 1994.
- [9] Ministère De L'énergie - Bilan énergétique national de L'année 1999 / DGE,2000.EPE, novembre,2000.
- [10] Chitour.Ch.E, L'énergie – Les enjeux de l'an 2000 - Vol/1 Office des Publications Universitaires. ALGER 1994 p.91

CHAPITRE III

INTEGRATION DES EOLIENNES

DANS LE MILIEU INDUSTRIEL

COMME MOYEN DE SOUTIEN

ÉNERGÉTIQUE

III-1 INTRODUCTION

Comme il a été avancé dans l'introduction un des moyen que nous allons utiliser pour réutiliser les puissances indésirables et dangereuses que véhiculent les harmoniques sont les aérogénérateurs où certains chercheurs anglais lui affecte le terme *Load linearization* (Linéarisation de la charge), pour décrire la technique d'amélioration de la qualité de l'énergie électrique. Plus particulièrement dans le milieu fortement industrialisé.

Le concept de la qualité de l'énergie a été induit par l'évolution de la nature des charges [1]. Aujourd'hui, ils sont pour la plupart des dispositifs non linéaires et sensibles. La qualité de l'énergie traitée par des mesures, l'analyse et l'amélioration des caractéristiques de la tension (jeu de barre de la tension), pour préserver la forme d'onde sinusoïdale avec RMS (valeur efficace) de la tension et de la fréquence constante [2]. Le sujet traite l'étude, l'évaluation et la classification des interactions harmoniques [3]. Le concept d'harmoniques se réfère à la distorsion des formes d'ondes sinusoïdales. Ces ondes déformées sont généralement périodiques. Par l'analyse de Fourier, elles peuvent être exprimées comme l'addition de la composante de la fréquence fondamentale sinusoïdale à d'autres composantes sinusoïdales de fréquence d'ordre supérieur (c,à,d les harmoniques) [4].

Les harmoniques des tensions peuvent être partiellement produites par le générateur de puissance lui même (parc éolien par exemple) et aussi, par des courants de charge non sinusoïdaux qui circulent à travers l'impédance interne du générateur (harmoniques de charge) [5]. Les filtres sont souvent nécessaires aux bornes des systèmes de production du courant alternatif pour éliminer ces problèmes. Aujourd'hui, la pollution harmonique dans les systèmes de distribution de l'énergie est si grave que la qualité de l'énergie devient à peine acceptable. En dépit de la mauvaise qualité de l'énergie, la connexion des charges non linéaires dans le système est en constante augmentation. Dans certaines zones du réseau faible, les distorsions de tension et courant sont si grandes qu'il est essentiel d'utiliser des filtres pour éviter un endommagement ou un dysfonctionnement dans les équipements électriques sensibles [6].

III-2 Indices de la qualité de l'énergie sous une distorsion harmonique

Les charges linéaires sont celles dans lesquelles les signaux de tension et de courant se succèdent de très près, comme la chute de tension qui se développe à travers une résistance constante, qui varie en fonction directe du courant qui la traverse, les charges

non linéaires sont celles dans lesquelles la forme du courant ne ressemble pas à l'onde de la tension appliquée due à un certain nombre de raisons [3], c'est à dire l'utilisation d'interrupteurs électroniques, le passage du courant de charge pendant une fraction de la période de fréquence. Par conséquent, nous pouvons considérer les charges non linéaires que celles dans lesquelles la loi d'Ohm ne peut pas décrire la relation entre V et I. Parmi les charges non linéaires les plus courantes dans les systèmes d'alimentation sont les types de dispositifs redresseurs comme ceux trouvés dans des convertisseurs de puissance, les fours électriques et les lampes fluorescentes. Les charges non linéaires provoquent un certain nombre de perturbations, telles que la distorsion de forme d'onde de tension, de surchauffe dans les transformateurs et les problèmes de contrôle à microprocesseur, entre autres [3].

III-2.1 Indices de la qualité de l'énergie

Il n'est pas facile d'aller vers l'étape de mesure de la qualité de l'énergie sans la définition des indices de la qualité de l'énergie, en mesure de quantifier l'écart par rapport à une situation de référence idéale [7, 8], de quantifier les effets néfastes de cette déviation et identifier la source de production de ces effets néfastes. Une façon tout à fait naturelle semble être l'extension à des conditions non sinusoïdales des indices employés dans des conditions sinusoïdales, comme le facteur de puissance et le facteur de distorsion total (THD), avec une discussion de leurs limites admissibles [9,10].

III-2.2 La distorsion harmonique

La distorsion harmonique est la distorsion où le signal est non sinusoïdal mais périodique avec une période égale à la période de la fréquence du réseau (50 ou 60Hz). La plupart de la littérature sur la distorsion de forme d'onde ne considère que cette distorsion harmonique, ce qui est une approximation acceptable dans de nombreux cas.

$$\text{THD}_V = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} V_k^2}}{V_1} \quad (3.1)$$

$$\text{THD}_I = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{I_1} \quad (3.2)$$

Cependant, la plupart des études de la qualité d'énergie considèrent plus ou moins des situations exceptionnelles, de sorte que nous ne pouvons pas nous limiter à une distorsion harmonique seulement. La présence d'une composante continue peut être considérée comme un cas particulier de la distorsion harmonique, mais il est souvent traité séparément

à cause de la différence dans les techniques de mesure et les conséquences.

Donc, pour prendre en compte toutes les composantes d'un courant (ou tension périodique) de forme d'onde du signal, une racine carrée dite RMS est définie éq (3).

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} i(t)^2 dt} \quad (3.3)$$

Si le courant est sinusoïdal, la valeur RMS est simplement la valeur crête divisée par $\sqrt{2}$.

Cependant, si le signal a des séries de Fourier éq.(4)

$$i(t) = I_{dc} + \sum_{k=1}^{\infty} I_k \sin(k\omega_0 t + \vartheta_k) \quad (3.4)$$

Pour étudier l'impact des harmoniques sur le facteur de puissance, il est important de considérer le vrai facteur de puissance, qui est défini comme suit:

$$pf_{true} = \frac{P_{avg}}{V_{rms} I_{rms}} = \frac{\cos(\varphi_1)}{\sqrt{1+THD_k^2}} \quad (3.5)$$

Les relations décrivant le vrai facteur de puissance éq (5) sont donnés sans la prise en compte des distorsions qui peuvent affecter le signal de la tension.

Alors, pf_{true} est inférieure à $\cos(\varphi_1)$ [12]. Par conséquent, le contrôleur de puissance réactive de compensation se réfère à une valeur de consigne et la compare à $\cos(\varphi)$, va commander une quantité de puissance réactive de compensation inférieure à la vrai valeur désirée. Comme on le sait, la puissance réactive du générateur éolien échangée par le biais du circuit du rotor est l'une des clés qui permet une gestion optimale.

III-3 Modèle expérimental

Dans de nombreuses études de la relation entre les caractéristiques du vent mesuré dans les anémomètres et la vitesse du vent et de la puissance de sortie du générateur éolien a été clairement défini [13, 14]. Mais dans un environnement fortement non linéaire les générateurs sont soumis à des dysfonctionnements des dispositifs de contrôle et certaines oscillations de l'aiguille des appareils de mesure sont observées [15 -17]. Ainsi, afin de faire une étude sur l'effet de ces tensions harmoniques, une étude expérimentale est menée pour montrer le comportement d'un parc éolien à l'égard de ce type de perturbation dans le cas d'un fonctionnement isolé ou connecté au réseau [18,19]. Le choix d'une éolienne dans ce cas est justifié vu que nous envisageons de l'utiliser afin de réutiliser le contenu harmonique en le réinjectant dans le réseau sous une forme de puissance exploitable par le biais du générateur éolien.

A cet effet, une expérience sur un réseau alimentant une unité de laminage située à l'Est du Nord de l'Algérie [11] Fig. 3.1 a été testée.

- Nœud n° 1 – Jeu de la barre de la source.
- Nœud n° 2 – Jeu de la barre de la sortie du transformateur.
- Nœud n° 3 – Jeu de barre de la charge non linéaire
- Nœud n° 4 – Jeu de barre de la charge linéaire

Pendant l'expérience, et grâce à un ajustement combiné, on peut maintenir constante la vitesse du vent et de la tension de sortie du générateur, cela pour différentes consommations de puissances de la charge non linéaire.

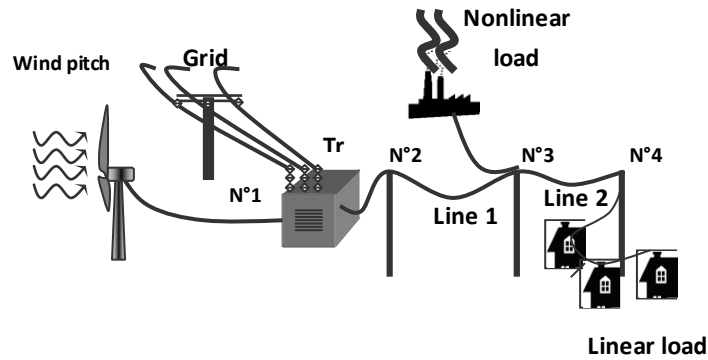


Fig. 3.1 Représentation du modèle expérimental

III-4 Formulation de la puissance dans des conditions non linéaires

La puissance électrique est l'interaction entre la tension et le courant dans un point éq. (3.6, 3.7). Les tensions sont prises entre phases (composées) et les courants simples, alors la puissance instantanée de la fondamentale (50 ou 60 Hz) prend la forme :

$$\begin{aligned} s_1(t) &= \sqrt{3} u_1(t) \cdot i_1(t) \\ &= \sqrt{3} \sqrt{2} U_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos(\omega t + \alpha_1) \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$s_1(t) = P_1 + P_1 \cdot \cos(2\omega t) - Q_1 \sin(2\omega t)$$

$$s_1(t) = P_1 + S_1 \cdot \cos(2\omega t + \alpha_1) \quad (3.7)$$

De la même façon pour les gammes harmoniques supérieures à 1

$$s_h(t) = P_h + S_h \cdot \cos(2\omega h t + \alpha_h) \quad (3.8)$$

Avec

Ainsi, en présence d'harmoniques la puissance instantanée devient:

$$s_h(t) = P_h + S_h \cdot \cos(2\omega h t + \alpha_h) \quad (3.9)$$

Cette puissance est temporelle, mais le wattmètre doit mesurer normalement la valeur moyenne du signal donnée par l'éq (3.9).

$$P = \text{average}(s(t)) = \sum_{h=1}^k P_h$$

Ainsi

$$= \sum_{h=1}^k [U_h I_h \cos(\alpha_h)] \quad (3.10)$$

Mais à l'égard de la puissance réactive

$$Q = \text{average}(u(t)\overline{i(t)}) = \sum_{h=1}^k Q_h$$

$$= \sum_{h=1}^k [U_h I_h \sin(\alpha_h)] \quad (3.11)$$

Où $\overline{i(t)}$ est le courant quadratique de $i(t)$.

Dans la relation éq.(3.10) et l'éq.(3.11) il est démontré que la puissance active et la puissance réactive sont produites par l'interaction entre les mêmes tensions et courants des mêmes rangs, étant donné les valeurs RMS de chaque composante harmonique. Les dispositifs de mesure utilisés, mesurent une partie seulement des valeurs réelles extraites par un filtre [8]. Ainsi, la puissance mesurée active et réactive de la puissance mesurée, à la fois sont moins que les vraies valeurs, respectivement donnés par éq.(3.10) et l'éq.(3.11). L'erreur de mesure pour la puissance active et pour la puissance réactive; chacune d'elles peut être négligée dans le cas d'une onde parfaitement sinusoïdale.

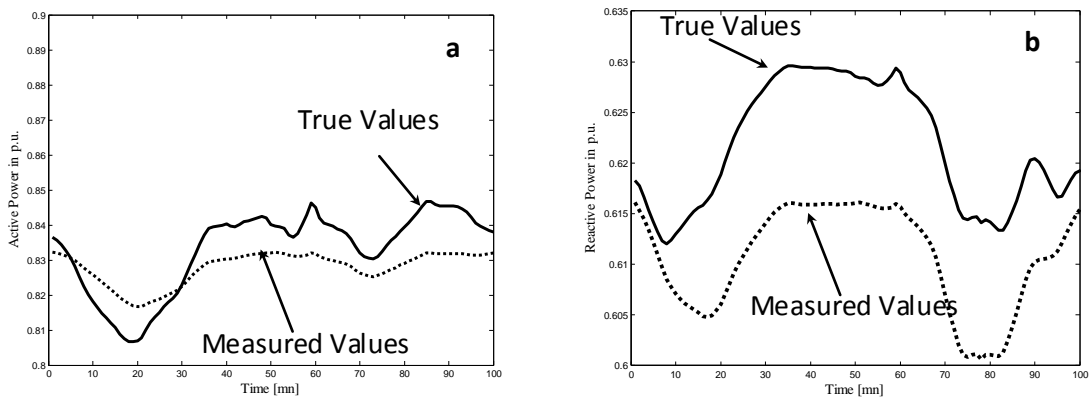


Fig. 3.2 Incompatibilité des appareils de mesure

La figure 3-2 montre clairement la différence entre la valeur mesurée comme il est défini dans [3] et les vraies puissances proposées dans les éq. (3.10, 3.11). Dans le cas d'une éolienne raccordée à un réseau électrique faible [6], ces erreurs augmentent, la réalisation d'un point de puissance maximale (MPPT) devient imparfait.

Calculons la puissance apparente à partir des courants mesurés et les tensions, l'une d'elle doit être aussi les valeurs (efficaces) RMS du signal global.

$$S = \sqrt{3}UI = \sqrt{3} \sqrt{\left[\sum_{j=1}^k U_j^2 \right] \left[\sum_{k=1}^k I_k^2 \right]}$$

$$S = \sqrt{3} \sqrt{\left[\sum_{h=1}^k U_h^2 I_h^2 \right] + \left[\sum_{M=1}^k \sum_{N=1}^k (U_M^2 I_N^2) \right]}; M \neq N \quad (3.12)$$

La puissance apparente S telle qu'elle est définie dans l'équation (3.12). Prend en compte toutes les interactions possibles entre les courants et les tensions des mêmes rangs et les différentes harmoniques. Suite à ce développement, la nouvelle relation et exacte du vrai facteur de puissance peut être définie comme :

$$pf_{true} = \frac{\sum_{h=1}^k [U_h I_h \cos(\alpha_h)]}{\sqrt{\left[\sum_{h=1}^k U_h^2 I_h^2 \right] + \left[\sum_{M=1}^k \sum_{N=1}^k (U_M^2 I_N^2) \right]}}; \quad M \neq N \quad (3.13)$$

Ainsi, les harmoniques de tension augmentent les erreurs dans l'estimation de la puissance réactive à compenser.

Le vecteur formé par la puissance active et la puissance réactive $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ la puissance de transformation ce qu'on appelle puissance de transformation

$$S = \sqrt{3} \sqrt{\left(\sum_{h=1}^k P_h \right)^2 + \left(\sum_{h=1}^k Q_h \right)^2}$$

$$= \sqrt{3} \sqrt{\left(\sum_{h=1}^k [U_h I_h \cos(\alpha_h)] \right)^2 + \left(\sum_{h=1}^k [U_h I_h \sin(\alpha_h)] \right)^2}$$

$$S^2 = 3 \left\{ \sum_{h=1}^k [U_h I_h]^2 + \sum_{M=1}^k \sum_{N=1}^k [U_M I_N U_N I_M \cos(\alpha_N - \alpha_M)] \right\}; M \neq N \quad (3.14)$$

Le premier terme de cette équation représente la puissance véhiculée par les tensions et courants harmoniques de même rang. Cette quantité est normalement mesurable, par contre le deuxième terme de l'équation représente les déperditions énergétiques produites par les tensions et courants de différents rangs. Cette quantité n'est pas mesurable et transparente aux appareils de mesures.

Le vecteur S éq(3.14). Fig3.3 montre les échanges de puissance entre les puissances de mêmes et différents indices.

L'un des indices qui peut aussi nous donner de plus amples renseignements sur la qualité de l'énergie est la puissance déformante qui correspond aux résidus de S et S défini comme $D = \sqrt{S^2 - S^2}$

$$D^2 = 3 \left\{ \left[\sum_{M=1}^k \sum_{N=1}^k (U_M^2 I_N^2) \right] - \sum_{M=1}^k \sum_{N=1}^k [U_M I_N U_N I_M \cos(\alpha_N - \alpha_M)] \right\} \quad (3.15)$$

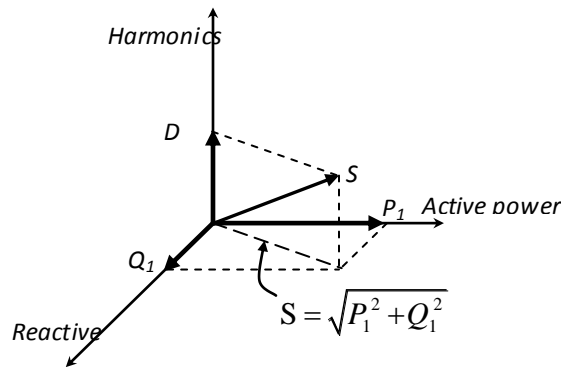


Fig. 3.3 Représentation vectorielle dans l'espace

La puissance déformante (éq.3.15) peut être définie comme les interactions entre les courants et les tensions des différents rangs seulement ($M \neq N$), ajouté à des interactions entre les puissances des différents rangs seulement aussi. Si l'on veut déterminer la puissance déformante au niveau du jeu de barre d'alimentation, pris dans la tension purement sinusoïdale (qui n'est pas le cas pour un parc éolien connecté au réseau faible), et pour une source de courant parfaitement sinusoïdale. Dans ces cas, la représentation vectorielle dans l'espace des puissances peut être montrée dans la figure 3.3. Cette représentation de la puissance vectorielle spatiale Fig 3.3 est fréquemment trouvée dans la littérature et la plupart des publications [1, 3, 5] s'intéressant à l'aspect harmonique, est valable dans le cas où l'hypothèse du courant ou de la tension est parfaitement sinusoïdale.

Pendant l'expérience nous avons remarqué que les appareils de mesures n'arrivent pas à mesurer une forme d'énergie véhiculée par les harmoniques. Vu que l'éolienne a besoin de convertisseur qui alimente son rotor lui-même consommateur d'énergie non linéaire. Nous proposons alors de lui donner cette énergie que la charge non linéaire produit (Usine

Arcelor Mittal). Dans ce qui suit nous donnons le principe et l'architecture de ce type d'alimentation.

L'onduleur servira à alimenter le rotor de l'éolienne par une tension contenant des harmoniques qui génèrent un champ électromagnétique permettant la production en plus d'une puissance fondamentale des puissances harmoniques antagonistes présentes dans le réseau électrique (Fig. 3.4).

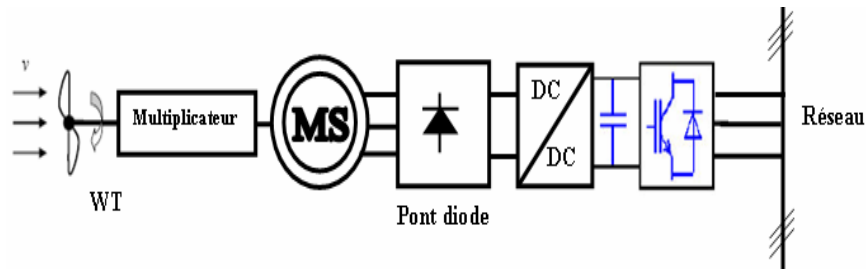


Fig. 3.4 Schéma unifilaire de l'éolienne étudiée

L'onduleur que nous avons utilisé est un convertisseur statique assurant la conversion continu-alternatif. Alimenté en courant continu, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir de l'alternatif à la sortie

Si l'établissement, le maintien et l'ouverture des connexions entre l'entrée et la sortie ne dépend que de la commande des semi-conducteurs, l'onduleur est dit autonome. Contrairement à l'onduleur non autonome qui est relié au réseau alternatif, c'est lui qui impose la fréquence et la forme de l'onde de la tension de sortie

L'onduleur autonome impose la fréquence et la forme de l'onde de la tension alternative fournie au récepteur.

En général, les onduleurs de tension multinationaux peuvent être vu comme des synthétiseurs de tension dans lesquels la tension de sortie est synthétisée de plusieurs niveaux de tension discrets. Les avantages qui nous intéressent de cette nouvelle génération d'onduleurs sont [20], [21], [22] :

- Il peut générer des tensions très proches de la sinusoïde avec une fréquence de commutation égale à celle de la fondamentale ;
- Il réduit les tensions du mode homopolaire ;
- Il est bien adapté aux machines de moyennes et de grandes puissances comme dans le cas des éoliennes.

- La technique de commande peut influencer sur le courant ainsi que la tension de sortie que l'onduleur fourni au rotor de l'éolienne.

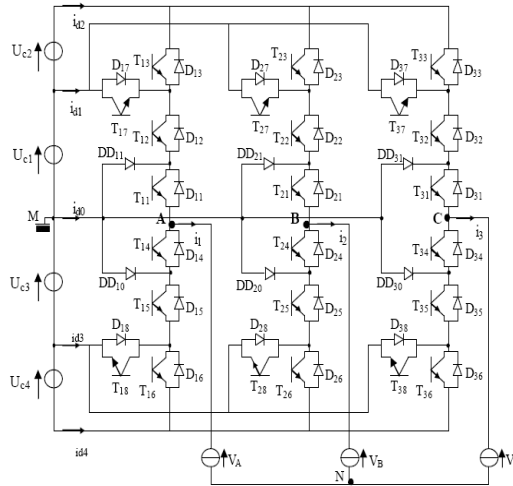


Fig. 3.5 Structure de l'onduleur à cinq niveaux

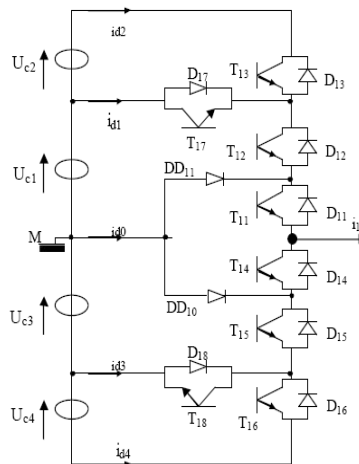


Fig. 3.6 Structure d'un bras de l'onduleur à cinq niveaux à structure NPC

$$V_A = V_{AM} - V_{NM} = \frac{1}{3} (+2V_{AM} - V_{BM} - V_{CM})$$

$$V_B = V_{BM} - V_{NM} = \frac{1}{3} (-V_{AM} + 2V_{BM} - V_{CM})$$

$$V_C = V_{CM} - V_{NM} = \frac{1}{3} (-V_{AM} - V_{BM} + 2V_{CM})$$

L'algorithme de commande est défini comme suit :

$$V_{refK} \geq U_{p4} \Rightarrow VK1 = 2U_c$$

$$V_{refK} < U_{p4} \Rightarrow VK1 = U_c$$

$$V_{refK} \geq U_{p3} \Rightarrow VK2 = U_c$$

$$V_{refK} < U_{p3} \Rightarrow VK2 = 0$$

$$V_{refK} \geq U_{p2} \Rightarrow VK3 = 0$$

$$V_{refK} < U_{p2} \Rightarrow VK3 = -U_c$$

$$V_{refK} \geq U_{p1} \Rightarrow VK4 = -U_c$$

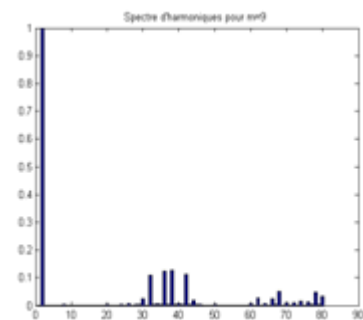
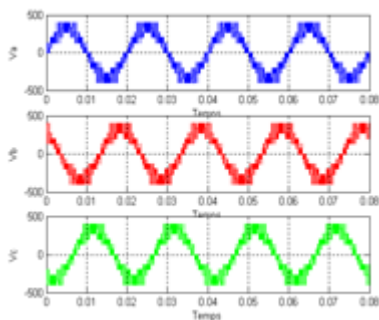
$$V_{refK} < U_{p1} \Rightarrow VK4 = -2U_c$$

L'algorithme de commande est défini comme suit :

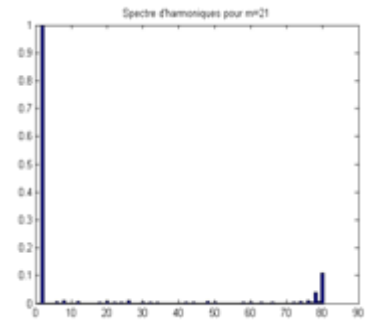
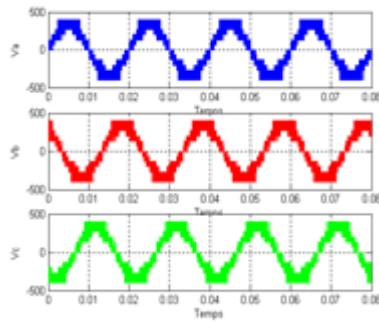
Tableau 3.1 Séquences de commande

BK1	BK2	BK3	BK4	BK5	BK6	VKM
1	1	1	0	0	0	2Uc
1	1	0	0	0	0	Uc
1	0	0	1	0	0	0
0	0	0	1	1	0	-Uc
0	0	0	1	1	1	-2Uc

m= 9 r= 0.8



m= 21 r= 0.8



m= 40 r= 0.8

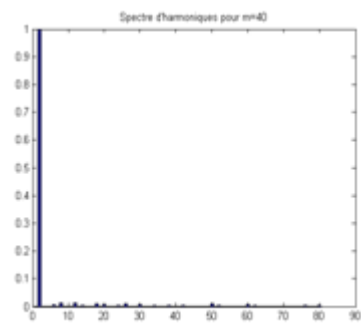
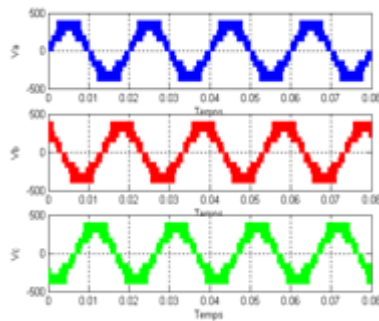


Fig. 3.7-a Relevé des tensions V_a, V_b, V_c

Fig. 3.7-b Spectre d'harmoniques

L'onduleur multi niveaux que nous avons détaillé a été introduit dans la structure de puissance de l'éolienne (Fig 3.4).

Bien que les harmoniques générées par notre onduleur multi niveaux soient très réduites à cause de la structure et de la commande mise en œuvre, ces derniers peuvent s'avérer dangereux au risque des résonances totales ou partielles affectant les branches que forme le modèle de la ligne avec celles de la génératrice éolienne.

La commande de cet onduleur permet de gérer les déperditions énergétiques due aux harmoniques émanant de l'usine (Arcelor Mittal) et leurs effets sur l'éolienne vue que nous proposons de réutiliser le maximum d'énergie véhiculée par ces harmoniques en les réinjectant dans le réseau par le biais du générateur éolien, et cela grâce à l'onduleur que nous avons préalablement développé. La commande qui a été appliqué repose sur le même principe de commande des filtres actifs.

III-5 Analyse des résultats expérimentaux et discussion

On a traité le problème des harmoniques en raison des effets destructeurs qu'ils ont

sur les appareils du réseau électrique et les appareils de mesure trouvés dans chaque usine, comme ampèremètre, voltmètre, watt & var mètre. Qui rend si insidieuse les harmoniques, Comprendre comment les harmoniques peuvent interagir au sein d'un système d'alimentation spécial quand il est équipé par des transformateurs et d'un parc éolien, et comment ils peuvent affecter les composants du système d'alimentation afin de prévenir d'éventuelles défaillances.

Les harmoniques peuvent affecter principalement les transformateurs de deux façons. Les harmoniques de tension produisent des pertes supplémentaires dans le noyau du transformateur, et les tensions harmoniques de fréquence élevée induisent des boucles d'hystérésis, qui se superposent sur la fondamentale. Chaque boucle représente des exigences plus élevées de puissance de magnétisation et des pertes dans le noyau supérieur. Un deuxième et un effet plus grave dû à des courants de fréquences harmoniques dans les enroulements du transformateur. Les courants harmoniques augmentent le RMS du courant circulant dans les enroulements des transformateurs qui se traduit par des pertes supplémentaires. Les pertes par courant de Foucault sont également augmentées. Les courants de Foucault qui circulent dans les enroulements induits des courants dans les conducteurs par le flux de fuite magnétique.

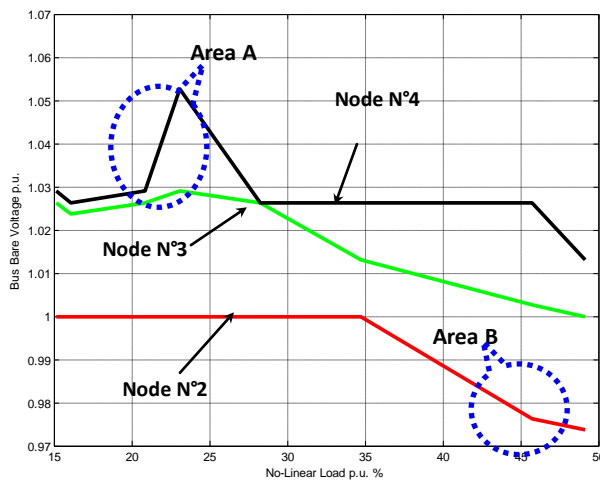


Fig. 3.8 Tension du jeu de barre mesurée pour un générateur de parc éolien connecté

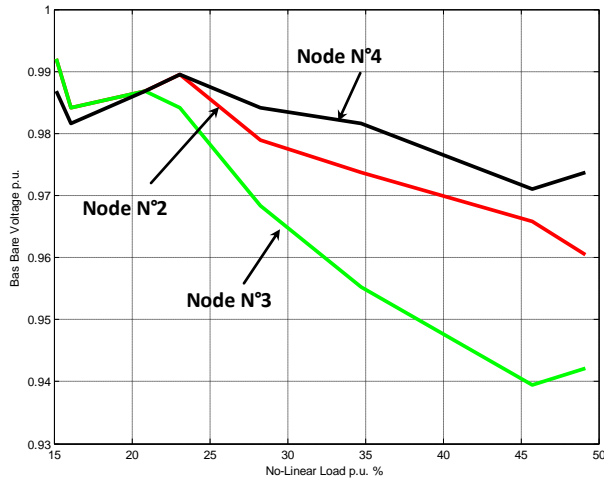


Fig. 3.9 Tension du jeu de barre mesurée pour un générateur de parc éolien isolé

La représentation de tension au niveau des différents nœuds du jeu de barre, permet de montrer l'effet du réseau électrique sur la stabilité du plan de tension global, avec quelques zones spécifiques de la surtension "zone A" (résonance parallèle de la boucle, formée entre les charges non linéaires et la charge linéaire) et les tensions d'effondrement "zone B" (résonance série entre le réseau d'alimentation et le circuit de fuite du transformateur) (Fig 3.8). Ce qui n'est pas le cas pour le parc éolien isolé (Fig 3.9), où sous l'effet des harmoniques et en dépit de la vitesse maintenue constante, le générateur de vent délivre une fréquence qui varie, d'où l'effondrement des tensions (tensions du jeu de barre dans le $S.I < 1$) sur tous les jeux de barres (Fig 3.9).

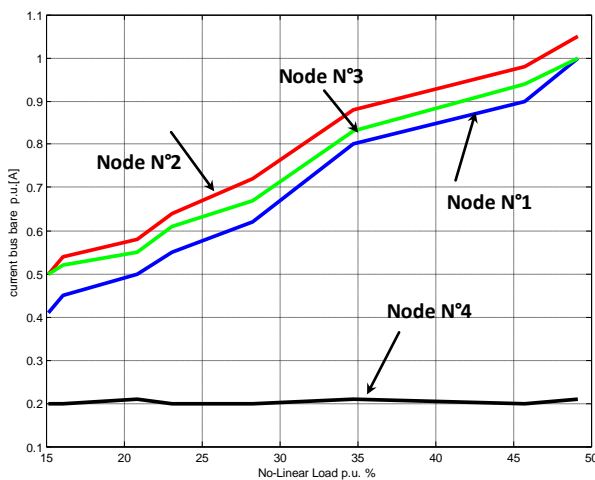


Fig. 3.10 Courants de ligne mesurés pour un générateur de parc éolien connecté

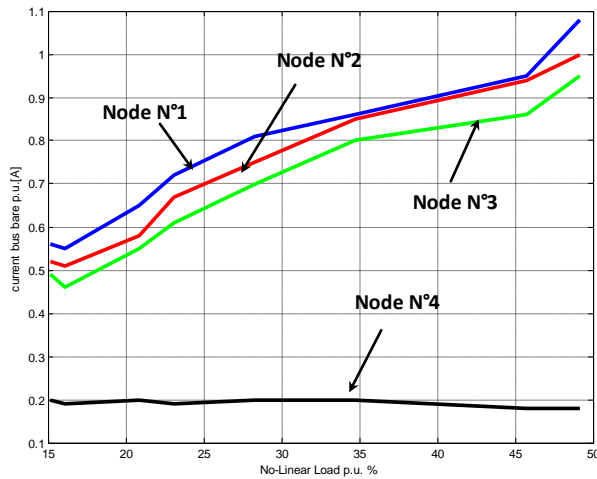


Fig. 3.11 Courants de ligne mesurés pour un générateur de parc éolien isolé

Pour les cas connectés et isolés, l'éolienne se comporte comme une source de courant, d'où une courbe presque identique des courants dans les deux cas (Fig 3.10, 3.11). Sauf à la sortie du transformateur présente une surintensité causée par une résonance partielle entre le circuit magnétique du transformateur et les boucles du réseau. Au cours des deux expériences (— pour une éolienne connectée et ---- pour une éolienne isolée), il est assuré un ajustement qui permet d'annuler toute énergie provenant du réseau électrique, en d'autres termes, toute l'énergie nécessaire à la charge est complètement fournie par les générateurs de vent, seul la puissance réactive est importée. Les avantages de l'éolienne en mode connecté n'est pas seulement le maintien des nœuds des tensions à des valeurs acceptables, mais aussi une quasi sinusoïdalité de la tension. D'autre part un parc éolien isolé (sans lien avec le réseau électrique) n'a pas cette faculté en raison de sa puissance limitée.

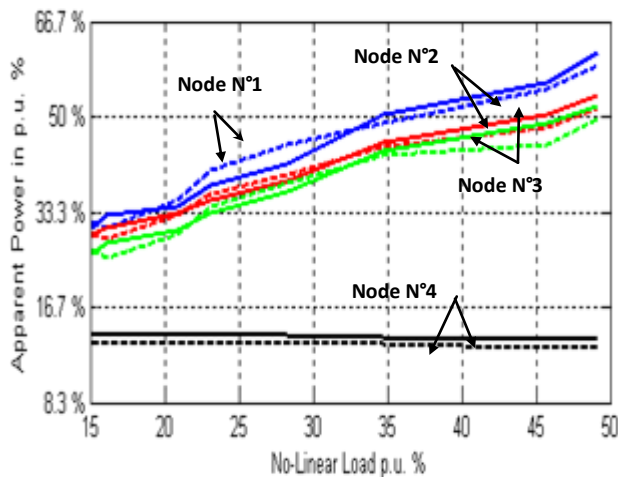
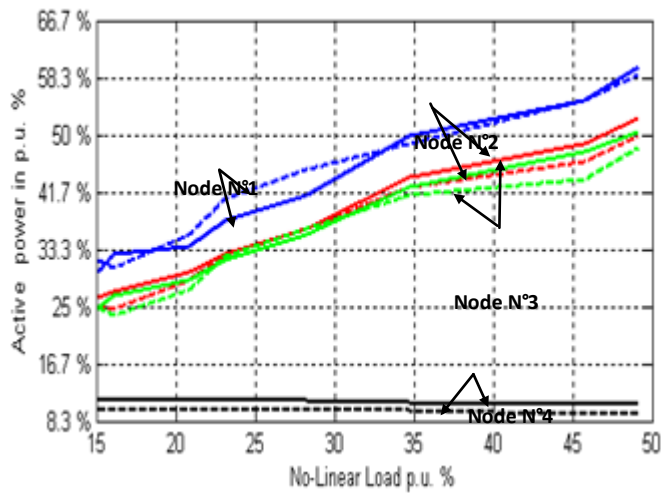
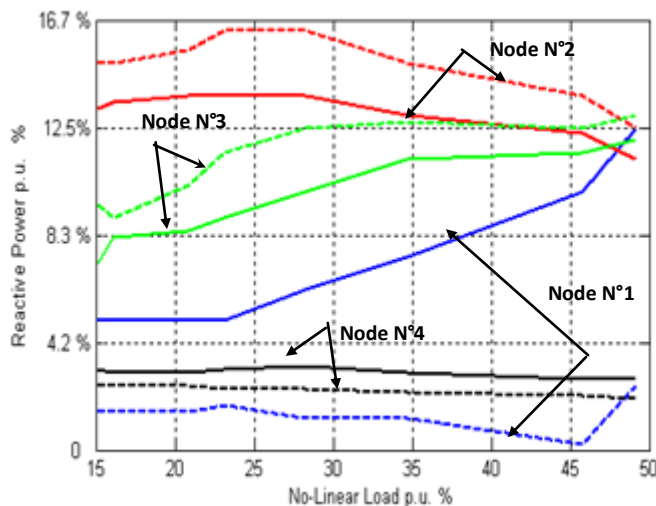


Fig. 3.12 Puissance apparente mesurée pour un mode connecté et isolé

Par conséquent, la variation représentée sur la figure 3.12 est due à la déviation de fréquence, dont l'énergie moyenne est transmise, puisque la puissance mécanique transformée en puissance électrique est la même dans les deux cas. En effet la distorsion simultanée de la tension produit une puissance active et réactive, en plus d'une puissance déformante. Par conséquent, une interprétation erronée de l'appareil de mesure, ce phénomène a également été observé au cours du laminage de l'usine

**Fig. 3.13** Puissance active mesurée pour un mode connecté et isolé**Fig. 3.14** Puissance réactive mesurée pour un mode connecté et isolé

Si le parc éolien est raccordé à un réseau puissant, la tension de liaison reste pratiquement sinusoïdale. En conséquence, la puissance \mathbf{S} éq.(3.14) donne des puissances actives et

réactives (Fig. 3.13 et Fig. 3.14), seulement à la fréquence fondamentale (rang 1). Mais dans le cas d'une éolienne isolée le VAR-mètre indique des valeurs moins importantes inversement proportionnelles à la charge non linéaire. Ceci s'explique par le fait que, le jeu de barre du parc éolien n'est pas en mesure de maintenir l'onde de tension sinusoïdale à sa valeur nominale, donc la puissance mesurée est celle exprimée par la relation de S, éq. (3.12), cette observation est moins marquée sur les courbes Fig 3.13, car sous l'effet des harmoniques les puissances des lignes du réseau électrique sont de nature inductive.

Pour toutes les mesures faites sur le jeu de barre Fig.3.14, les puissances réactives pour le mode connecté sont plus grandes que celles du mode isolé, parce que le parc éolien isolé a plus de difficultés à maintenir la forme d'onde de tension sinusoïdale [13], et cela s'aggrave de plus en plus que l'on s'éloigne de jeu de barres du générateur éolien.

Sur la Figure 3.13 contrairement aux puissances réactives, les puissances actives mesurées dans les cas isolés et connectés sont parfois plus grandes que les autres et inversement. L'explication est dans le sens d'écoulement des puissances. En effet, les puissances harmoniques ne circulent pas toujours à partir du générateur vers le consommateur comme généralement supposé, mais peut aussi être à partir des charges non linéaires vers les générateurs (les valeurs de puissance prennent le signe -).

Sur les Fig 3.13 et Fig 3.14, il est remarqué que pour une même charge non linéaire donnée, P et Q sont plus importants dans le cas connecté que pour le cas isolé. En effet à cause du principe du bilan énergétique, la réduction de la puissance active et réactive conduit à augmenter la puissance déformante D éq.(3.15). Ainsi, une limitation de la capacité de transport de l'énergie de l'éolienne, en particulier, dans le mode isolé, qui peut aussi compromettre le bon fonctionnement et la stabilité de tous les systèmes d'énergie [17].

III-6 Les erreurs dans les mesures

Tous les résultats (P, Q, U, I) donnés sont mesurés grâce à des appareils eux mêmes employés dans les usines. Afin de prouver la raison des oscillations des appareils de mesure, et dans le but de montrer l'incompatibilité de ces appareils à l'égard d'un environnement fortement non linéaire, une autre méthode est proposée afin d'évaluer l'effet des harmoniques du flux de puissance sur la forte incertitude de l'appareil de mesure et le comportement du générateur de éolien, dans le cas d'une énergie électrique exclusivement

basée sur l'énergie éolienne. Cette méthode consiste sur le calcul des impédances de deux façons:

- Pour la première, l'impédance est calculée par la relation entre les tensions et les courants mesurées comme suit $Z = U / \sqrt{3}I$;
- Pour la seconde, l'impédance est calculée par la relation entre les puissances et les courants mesurées comme suit $R = P / 3I^2$; $X = Q / 3I^2$ $Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{P^2 + Q^2} / 3I^2 = S / 3I^2$;

La différence entre les deux méthodes est donnée par l'erreur relative définie comme l'écart des valeurs obtenues comme $Er_z = 100(Z - \mathbf{Z}) / (Z + \mathbf{Z})$ % .

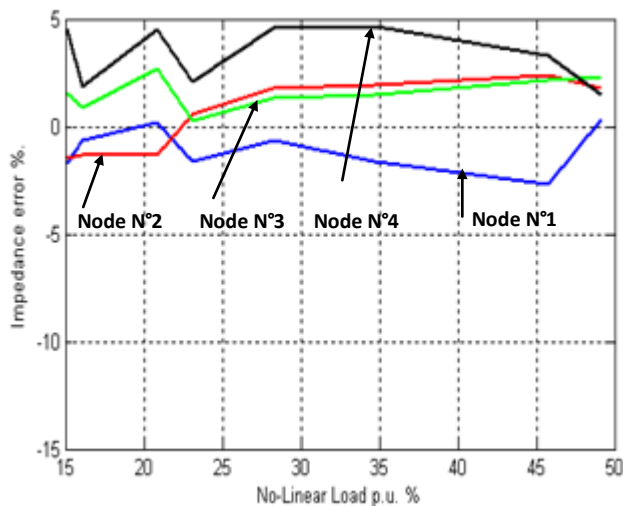


Fig. 3.15 Erreur de l'impédance dans le cas connecté

Dans la Fig 3.15, le réseau agit comme contrôleur de la forme d'onde sinusoïdale (éoliennes connectées au réseau d'alimentation), donc il ne permet pas une grande distorsion de la tension, comme c'est le cas pour le mode isolé. La distorsion affecte de manière plus importante le courant. Ainsi, la mesure fondamentale du courant diminue sous l'effet des harmoniques n'est pas concernée par la mesure, et la puissance mesurée ne sera pas augmentée par la puissance déformée, parce que les composantes harmoniques des tensions sont les plus faibles.

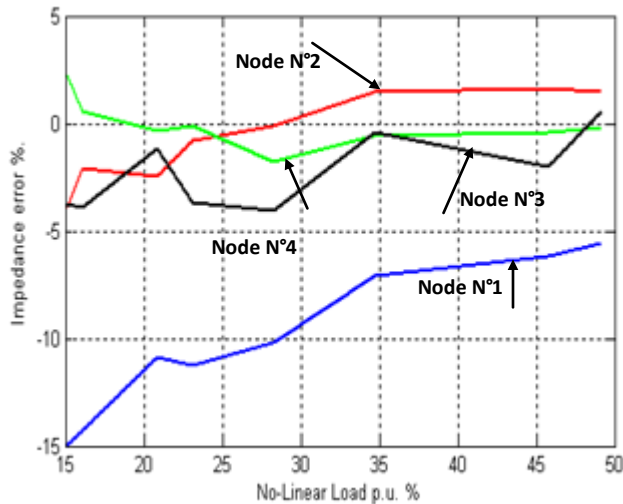


Fig. 3.16 Erreur de l'impédance dans le cas isolé

Dans la Fig 3.16 l'écart est négatif pour tous les jeux de barre, sauf à la sortie du transformateur, où l'écart est parfois positif ou négatif, et cela est dû à des résonances harmoniques d'une part, entre le circuit magnétique du transformateur et la ligne à haute tension, et d'autre part le circuit magnétique du transformateur et la charge non linéaire.

Mais pour le reste des jeux de barres, l'écart est négatif ce qui signifie que le wattmètre et le var-mètres mesure en plus de la puissance P éq. (3.10) et Q éq. (3.11), respectivement, une partie de la puissance déformante D éq. (3.15). Par conséquent Z est supérieur à Z . Cet écart devient plus important au jeu de barre du générateur éolien, en effet à la fois la tension et le courant sont déformés par la charge non linéaire, où une partie de la tension totale sera transformée en tensions harmoniques, afin de satisfaire le caractère non linéaire. En ce qui concerne l'autre jeu de barre le lien au AC fonctionnera comme un filtre, d'où l'écart est moins marqué. Tous ces écarts sont dus aux erreurs de l'appareil. L'erreur de mesure est définie comme la différence entre les fausses informations et les informations réelles sur une grandeur mesurée, exprimée dans ses mesures [15].

Tableau 3.1 Erreurs de mesure et de calcul

<i>Erreur de mesure %</i>				<i>Erreur de calcul %</i>			
ε_U	ε_I	ε_P	ε_Q	ε_S	ε_S	ε_Z	ε_Z
1	0,75	2,5	2,5	1,75	2,5	1,75	4

Les erreurs de mesure et les erreurs de calcul n'expliquent pas les grands écarts trouvés aussi bien pour les puissances (Fig 3.12-3.14) comme pour les impédances (Fig 3.15, 3-16), parce que ces indications d'erreurs (Tab 3.1) sont valables dans le cas d'un fonctionnement purement sinusoïdale. Cette étude a été incluse aussi dans le caractère de la non linéarité. Ainsi, il est montré qu'il existe une incompatibilité entre l'appareil de mesure et la forte non linéarité.

III-7 CONCLUSION

En termes de qualité de l'énergie, il est très difficile de maintenir dans des limites acceptables de fonctionnement, les générateurs éoliens, en particulier dans le cas d'une éolienne isolée, alimentant des grandes charges non linéaires, telles que les grandes usines industrielles. Même leur emplacement à proximité de ces types de charges (cas du réseau relié) n'est pas très recommandable. L'appareil de mesure devient de plus en plus incertain (ou erroné). Il a été prouvé que, dans le cas d'une exploitation des parcs éoliens dans le cas isolé, la formule qui calcule les puissances et les facteurs de puissance réelle devient incomplète et donc une nouvelle formulation de ces deux paramètres importants est proposée. Cette nouvelle formulation permet un contrôle plus adéquat de l'éolienne par le biais d'un contrôleur (boucle de régulation) qui gère les échanges d'énergie entre l'énergie électrique fournie par l'éolienne et les charges dont elles sont connectées. Il est montré que l'amélioration des appareils de mesure en prenant en compte les nouvelles formulations proposées, permet de maximiser la puissance délivrée par l'éolienne.

BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE III

- [1] Cano Plataa, Tacca, HE. Power load identification, *E.A Journal of the Franklin Institute. Elsevier.*, 2005, 97–113.
- [2] Celal Kocatepe, Aslan İnan, Oktay Arıkan, Recep Yumurtacı, Bedri Kekezoğlu, Mustafa Baysal, et al. Power quality assessment of grid-connected wind farms considering regulations in turkey, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, Issue 9, Dec. 2009, 2553-2561.
- [3] Filipski, P.S, Arseneau, R. Definitions and measurement of apparent power under distorted waveform conditions, IEEE Tutorial Course on Non sinusoidal Situations, Course Text 90EH0327-7-PWR, 37–42.
- [4] Lahaçani, N.A., Aouzellag, D., Mendil, B. Contribution to the improvement of voltage profile in electrical network with wind generator using SVC device, *Renewable Energy*, 2010, 35, 243–248.
- [5] Papathanassiou, S.A., Apadopoulo, M, P. Harmonic Analysis in a Power System with Wind Generation, " *IEEE Trans. Power Delivery*, Oct. 2006, 21, no. 4.
- [6] John Olav Gjøever Tande. Exploitation of wind-energy resources in proximity to weak electric grids. *Applied Energy*, April 2000, 65, Issues 1-4, 395-401.
- [7] Yong-June Shin, Edward J. Powers, Mack Grady, Ari Arapostathis. Power Quality Indices for Transient Disturbances." *IEEE Trans. on power delivery*, Jan. 2006, 21, No.1,
- [8] Renato Sasdelli, Alessandro Ferrero, Antonio Menchetti, Lorenzo Peretto. Electric-power quality measurements under distorted conditions:: Are they utopia or reality?" *Measurement*, June 1998, 23, Issue 4, 257-264.
- [9] Sanz, M, Llombart, A, Bayod, A.A, Mur, J. Power quality measurements and analysis for wind turbines, *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2000, 3, 1167-1172.
- [10] Balcells, J, Parisi, V, González, D. New trends in power quality measuring Instruments, *IEEE Annual Conference of the Industrial Electronics Society*, 2002, 4, 3344-3349.
- [11] Himri, Y., Boudghene Stambouli, A., Draoui, B. Prospects of wind farm development in Algeria, *Desalination*, April 2009, 239, Issues 1-3, 130-138.
- [12] Migoya Emilio., Crespo Antonio., Garcia Javier., Moreno Fermin., Manuel Fernando,

- Jimenez Angel, et all. Comparative study of the behaviour of wind-turbines in a wind Farm, *Energy*, 2007, 32, n°10, 1871-1885.
- [13] Hong Ying-Yi., Chang Huei-Li., Chiu Ching-Sheng. Hour-ahead wind power and speed forecasting using simultaneous perturbation stochastic approximation (SPSA) algorithm and neural network with fuzzy inputs, *Energy*, 2010, 35, n°9, 3870-3876.
- [14] Andrew Kusiak., Haiyang Zheng. Optimization of wind turbine energy and power factor with an evolutionary computation algorithm, *Energy*, 2010, 35, 1324-1332
- [15] Arjen Mulder . Do economic instruments matter? Wind turbine investments in the EU(15), *Energy Economics*, Novembre 2008, 30, Issue 6, 2980-2991.
- [16] Rafael B. Oliva .Simulation and measurement procedures for effective isolated wind and hybrid system development in south Patagonia, *Energy for Sustainable Development*, June 2008, 12, Issue 2, 17-26.
- [17] Garcia-Gracia, M., Paz Comech, M., Sallan, J., Llombart, A. Modelling wind farms for grid disturbance studies, *Renewable energy*, 2008, 33, no. 9, 2109-2121.
- [18] Laura C. Rodman., Ross K. Meentemeyer. A geographic analysis of wind turbine placement in Northern California. *Energy Policy*, October 2006, 34, Issue 15, 2137-2149.
- [19] Grady, SA., Hussaini, MY., Abdullah, MM. Placement of wind turbines using genetic Algorithm, *Renewable Energy*, 2005, 30, 259-270.
- [20] Celamovic, N., Boroyevich. A fast space vector modulation algorithm for multilevel three phase converters, *IEEE Trans on Ind App*, March/April 2001, 37.
- [21] Khadidja, Y., *Réduction des effets de la tension homopolaire dans les associations onduleurs multiniveaux-moteurs à induction*, Mémoire de Magister, Batna, 2005.
- [22] Celamovic, N. *Space vector modulation and control of multilevel converters*, Phd Thesis, Virginia Polytechnic Institute, 2000.

CHAPITRE IV

COMPORTEMENT

ELECTROENERGETIQUE NON

LINEAIRE D'UNE CENTRALE

THERMIQUE D'UN COMPLEXE

SIDERURGIQUE

IV-1 INTRODUCTION

Comme il a été proposé pour l'éolienne la récupération des énergies harmoniques peuvent aussi être achevées par le biais d'un alternateur soumis à une excitation elle même non linéaire. Etant donné que cet alternateur doit être entraîné nous proposons une mini centrale thermique qui utilise les gaz d'échappements dus aux processus sidérurgiques.

Un système thermique destiné à la production de l'énergie électrique est composé soit de centrales thermiques classiques ou nucléaires [1][2][3][4], dans une centrale thermique classique appelée centrale à flamme, l'énergie électrique est produite à partir de l'énergie thermique de combustion d'un fossile (charbon, pétrole, gaz naturel etc.), préalablement convertie en énergie mécanique par une turbine à vapeur. La plus part des grandes centrales modernes sont installées au voisinage des centres importants de consommation. On peut les utiliser comme centrales de base et/ou comme centrales de régularisation.

Les centrales thermiques modernes utilisent des turbines à vapeurs, à haute pression et resurchauffée. Les puissances normalisées sont 250, 500 et 600MW. Chaque turbine comporte ses auxiliaires propres et est capable de fonctionner en autonomie complète.

Certaines centrales mobiles utilisent des turbines à gaz ; elles sont généralement utilisées comme centrales d'appoint. Il faut noter que les centrales nucléaires sont généralement des centrales que l'on peut qualifié de thermiques.

La gestion d'un tel système de production d'énergie électrique est un objectif économique [2].

La gestion consiste à répartir la demande en énergie électrique entre toutes les centrales thermiques du système considéré de telle sorte à satisfaire la demande en énergie électrique et les capacités des centrales thermiques.

IV-1.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Une centrale thermique [1][2][3][4] comprend une ou plusieurs unités thermiques. Chaque unité se compose principalement d'une chaudière ou d'un générateur de vapeur, d'une turbine et d'un turboalternateur comme il est montré sur la fig 4.1[5]. Le principe de fonctionnement d'une unité thermique se résume comme suit :

Le combustible, charbon, fioul ou gaz est brûlé dans une chaudière. La chaleur dégagée transforme l'eau en vapeur. La turbine est alors alimentée de la chaudière par de la vapeur et la pression. La turbine à vapeur transforme l'énergie cinétique d'un flux de vapeur d'eau en énergie mécanique, entraînant le turboalternateur couplé à cette turbine qui génère ainsi l'électricité. La vapeur redevient ainsi eau en traversant le condenseur, puis repart pour un nouveau cycle vers la chaudière.

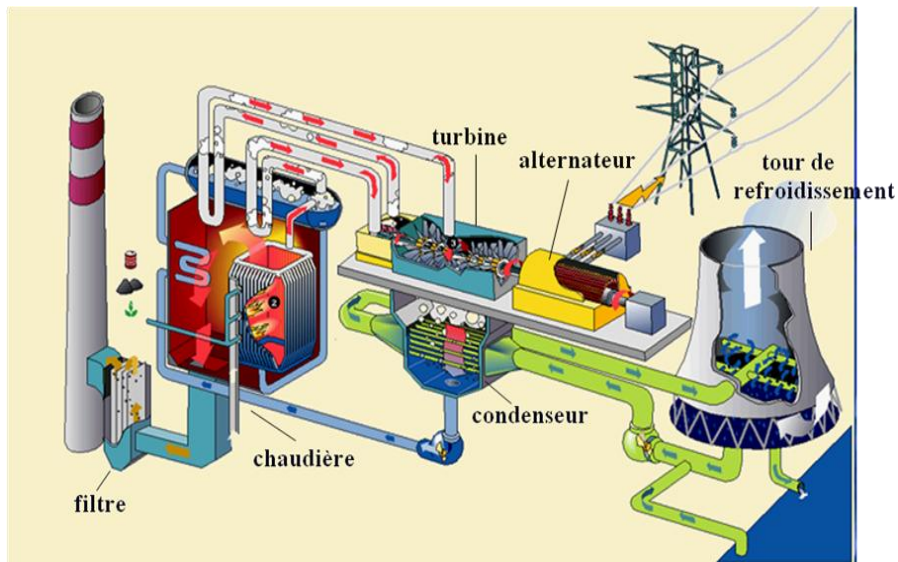


Fig. 4.1 Modèle d'une centrale thermique (turbine à vapeur)

IV-1.2 CENTRALE THERMIQUE

Les centrales thermiques classiques [6] utilisant comme matière première les combustibles fossiles : Pétrole, gaz naturel et charbon sont polluants, émettent le dioxyde de carbone CO_2 , le dioxyde de Soufre, les oxydes d'azote (NO, NO_2) et les poussières responsables des pluies acides et/ou de l'effet de serre. Ce qui les rend les plus polluants et perturbent continuellement l'environnement.

Des mesures sont prises par plusieurs pays, soucieux de l'environnement, dans le but de limiter les impacts sur l'environnement en procédant au lavage des fumées qui permet de retenir 90% des oxydes de Soufre et également de produire du gypse utilisé dans l'industrie du plâtre.

La centrale au gaz naturel [6], par son coût concurrentiel, son efficacité, sa mise en service rapide et ses impacts réduits sur l'environnement présente des avantages de grandes importances par rapport à ceux des centrales thermiques au charbon ou au Mazout.

Le principal inconvénient de ce type de centrale est l'émission d'une grande quantité de gaz à effet de serre.

Les centrales thermiques se répartissent en trois grandes catégories, selon la nature de leur source de chaleur.

- Centrales nucléaires.
- Centrales à flamme (charbon, fioul ou gaz).
- Centrales récupérant de la chaleur préexistante (solaire, géothermique...).

IV-2 DESCRIPTION DU LIEU D'APPLICATION (CENTRALE THERMIQUE D'ARCELOR MITTAL)

Il s'agit d'obtenir de la vapeur surchauffée à une pression de 50 bars, à une température de 500°C afin de permettre la rotation de la turbine jusqu'à la vitesse de 3000 tr/mn, laquelle est couplée après la synchronisation, à l'alternateur, dont le rôle est de produire l'énergie électrique attendue.

Pour cela, il est nécessaire de disposer d'une installation de déminéralisation dont le rôle est de produire l'eau déminéralisée indispensable pour le fonctionnement de la chaudière. Par contre le refroidissement est assuré par de l'eau industrielle qui est livrée par le département des fluides.

IV-2.1 Principe de fonctionnement du groupe N°3

L'eau condensée est aspirée du condenseur à une T° environ de 40°C, puis est refoulée par une pompe d'extraction à une pression de 5bars vers le réchauffeur BP(échangeur de chaleur) à la sortie duquel la T° atteindra 70°C environ, se dirige vers la bêche alimentaire ou dégazante où elle atteindra environ la température de 120°C. Nous appelons cette partie « basse pression ».

L'eau d'alimentation est alors aspirée par une pompe alimentaire HP (100 bars), vers le réchauffeur HP à la sortie duquel la T° avoisinera 167°C. L'eau d'alimentation va ensuite dans l'économiseur (échangeur de chaleur se trouvant au passage des fumées les moins chaudes~ 200°C), le ballon supérieur de la chaudière (210°C). Cette partie est appelée haute pression.

Du ballon l'eau descend par gravité dans les faisceaux tubulaires (échangeurs de chaleur se trouvant au passage des fumées), les collecteurs, les tubes écran chaudière, puis revient dans le ballon où la séparation eau/vapeur se fera (partie sup.vapeur/inf.eau).

La vapeur dans le ballon est appelée « vapeur saturée » (265°C).

La vapeur saturée se dirige vers le surchauffeur primaire (440°C à la sortie) puis le surchauffeur secondaire (500°C). Entre les deux surchauffeurs existe la désurchauffe.

(Les surchauffeurs sont aussi des échangeurs de chaleur se trouvant au passage des fumées les plus chaudes ~1000°C).

Maintenant la vapeur peut être envoyée (sous condition bien sur) vers la turbine, à travers des vannes d'admission de vapeur, puis des vannes de réglage du débit de vapeur à travers lesquelles elle fera tourner le corps HP, le corps BP au bout duquel la détente est totale dans le condenseur(notre point de départ). Le cycle reprend. [7]

IV-3 PRINCIPAUX ELEMENT DE LA CENTRALE D'ARCELOR MITTAL



Fig. 4.2 Principaux élément de la centrale d'Arcelor Mittal

Fig.a : Cheminée d'une chaudière

Fig. b : 02 Cheminées chaudières N°2et 3



Fig. c : Plaque signalétique de la turbine



Fig. d : Pupitre turbine



Fig. e : Palier avant turbine N°2



Fig. f : Palier avant turbine N°3



Fig. g : Alternateur



Fig. h : Alternateur, excitatrice

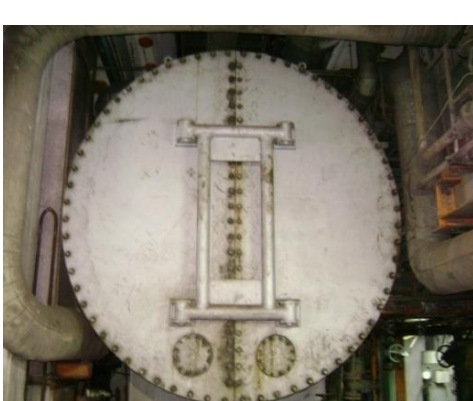


Fig. i : Condenseur



Fig. j : Niveau visuel condenseur



Fig. k : Bâche dégazante



Fig. l : Tour de refroidissement



Fig. m : Installation de déminéralisation



Fig. n : Conduites GN, G.COK, G.HF



Fig. o : Arrivée gaz naturel



Fig. p : Ballon supérieur (arrière chaudière)



Fig. q: Transformateur



Fig. r :Eau :entrée, sortie vers réfrigérant alternateur

IV-4 Turbines à soutirage de vapeur

But du soutirage (prélèvement) : Réchauffage de l'eau d'alimentation par de la vapeur prélevée en un ou différents étages la turbine.

Une partie seulement de la vapeur circulant dans la turbine est prélevée, et de plus, cette vapeur prélevée a déjà cédée à la turbine la majeure partie de son énergie.

L'échange de chaleur s'effectue dans un échangeur de chaleur à surface. La vapeur refroidie est ensuite redirigée vers le condenseur.

Avantages:

La canalisation XY sur laquelle se place l'échangeur est à la pression atmosphérique, d'où petite épaisseur du tube et échange de chaleur meilleur.

On évite alors l'économiseur sur la canalisation UV, peu efficace en raison de la haute pression exigeant une forte épaisseur du tube.

Comme le montre l'installation ci-dessous comportant un seul prélèvement

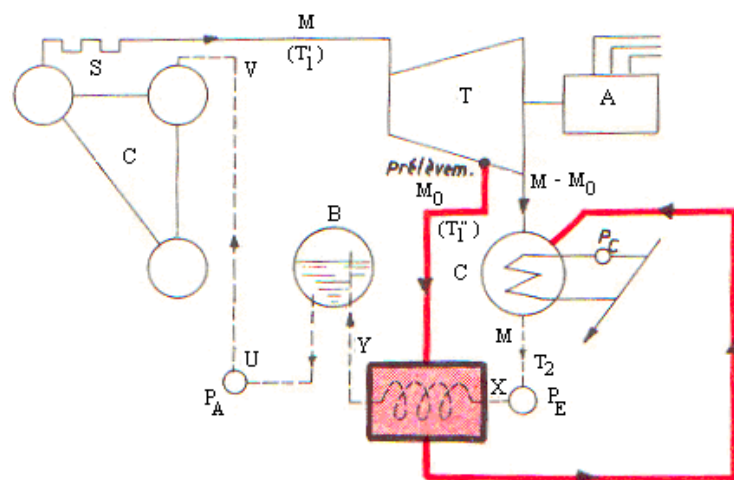


Fig. 4.3 Schéma d'une installation à un soutirage [8].

Une masse M de vapeur, surchauffée à la température T_1 , arrive à la turbine et travaille d'abord dans le premier étage, quand, au cours de sa détente, la température de cette vapeur est tombée à T''_1 , une fraction de masse M_0 , est soutirée et envoyée dans un réchauffeur pour chauffer l'eau que la pompe alimentaire (PE) véhicule.

Le reste de la vapeur, soit une masse $(M-M_0)$, continue son cycle dans les étages inférieurs de la turbine, puis passe dans le condenseur où elle se condense et en sort sous forme d'eau.

La masse M d'eau reconstituée dans le condenseur (la vapeur des étages inférieurs mélangée avec le condensât partiel sortant du réchauffeur) est enfin réinjectée dans la chaudière.

Le soutirage améliore le rendement global de l'installation.

En dépit des complications apportées aux installations par l'augmentation du nombre de soutirage, ce nombre atteint et même dépasse dix dans certaines grosses installations.

IV-5 CYCLE A SOUTIRAGE

Les cycles (surchauffe et resurchauffe) peuvent être améliorés par le prélèvement de vapeur au cours de la détente, le principe de ce cycle pour les deux cycles, consiste à extraire à un étage intermédiaire de la turbine une partie de débit de total de la vapeur pour réchauffer l'eau à la sortie du condenseur dans des réchauffeurs de température 28° à 30° jusqu'à la température 200° - 260° à l'entrée du générateur de vapeur, de cette façon une certaine quantité de vapeur fonctionne suivant un cycle de chauffage interne et le rendement de cette quantité de cette chaleur continue dans la vapeur va au lieu d'être cédée en pure perte au condenseur, elle va être transmise à l'eau d'alimentation, il en résulte une augmentation du rendement thermique global du cycle. La figure suivante représente schématiquement une installation comportant un soutirage de vapeur dérivée d'un cycle à surchauffe isobare obtenu précédemment.

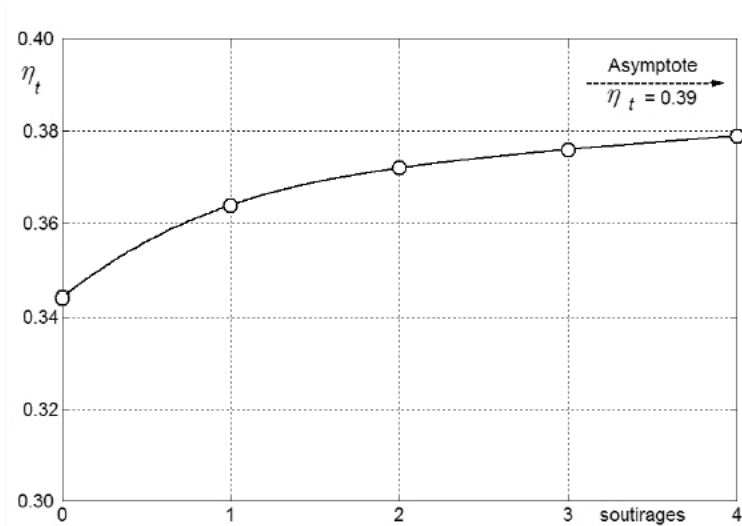


Fig. 4.4 Evolution du rendement thermique en fonction du nombre de soutirages [9]

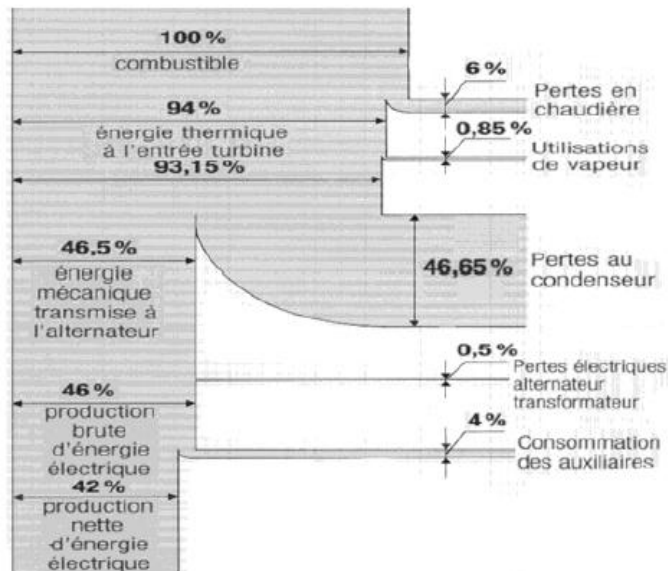


Fig. 4.5 Bilan énergétique global d'une installation simple à vapeur [9].

IV-6 Structure d'un cycle à vapeur de la centrale thermique d'Arcelor Mittal

Grâce à un logiciel spécialisé dans la simulation des cycles thermiques, nous avons reproduit le comportement du cycle de vapeur d'une centrale comparable à celle d'Arcelormittal.

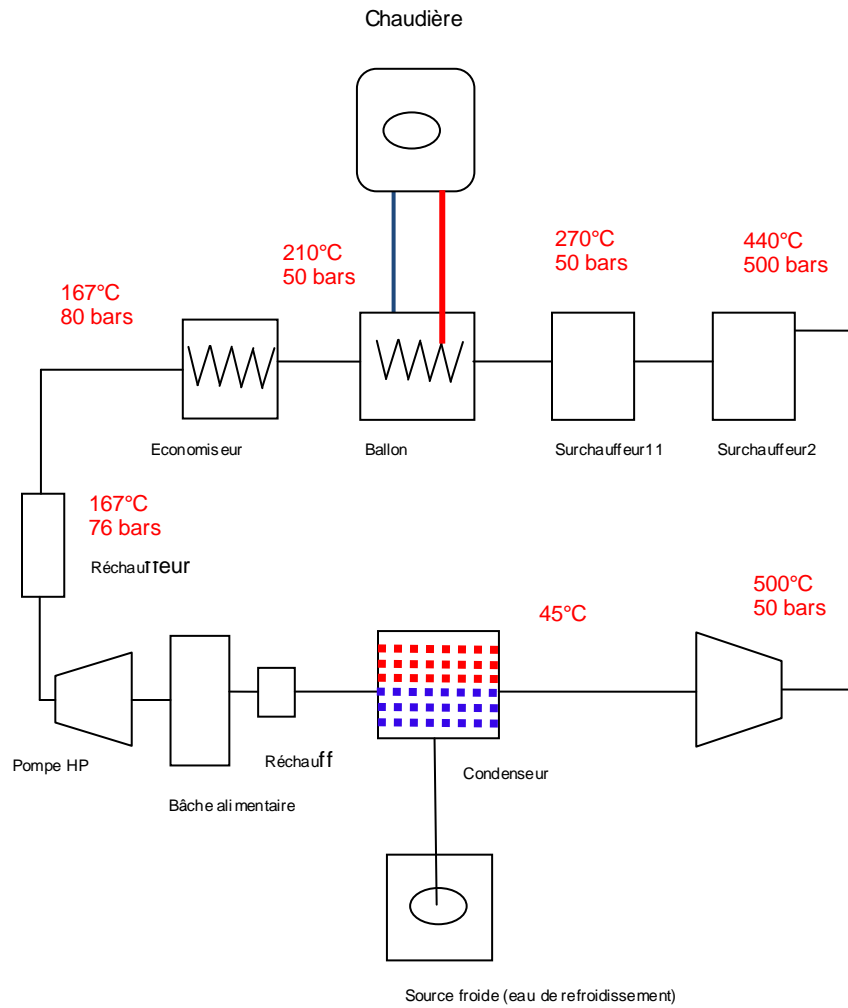


Fig. 4.6 Structure du cycle à vapeur réel de la centrale thermique d'Arcelor Mittal

La courbe suivante représente l'efficacité énergétique de la centrale afin de justifier les retombes économiques de l'installation vu qu'elle nécessite une rénovation.

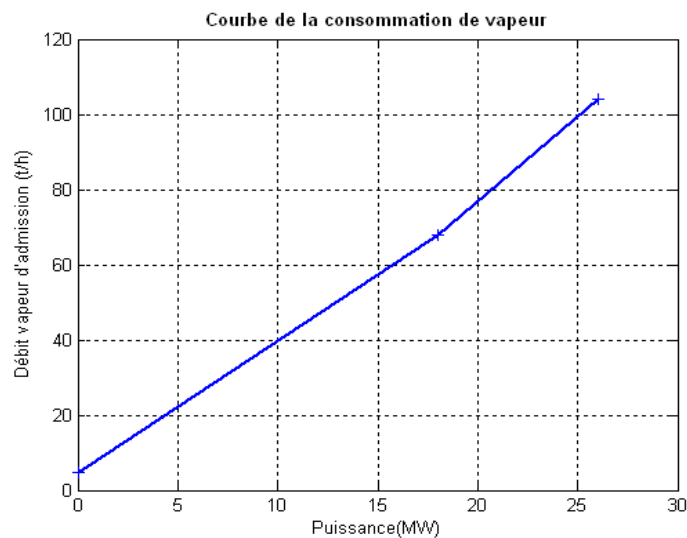


Fig. 4.7

Une des caractéristiques principale dans l'évaluation de notre proposition est l'effet du temps de réponse du système sur les grandeurs énergétiques à contrôler.

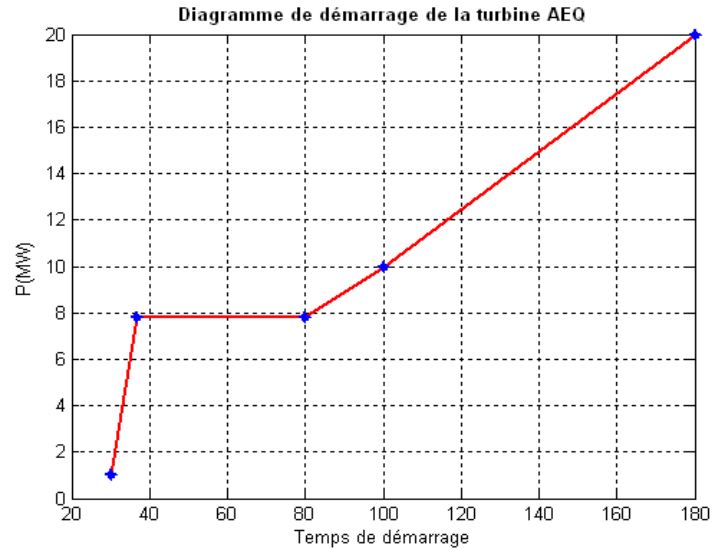


Fig. 4.8

VI-7 Définitions fondamentales de quelques paramètres

VI-7.1 Energie interne

On appelle *l'énergie interne* d'un système thermodynamique, l'énergie totale qu'il contient. En général, l'énergie interne d'une substance se compose de l'énergie cinétique du mouvement de ses molécules et de l'énergie potentielle contenue dans la dispersion des molécules.

On représente l'énergie interne par la lettre U . Dans le Système international (SI), elle est mesurée en joules (J) et en kilojoules (kJ) [10].

IV-7.2 Enthalpie

L'*enthalpie*, H , est une variable de système plus utile que l'énergie. On l'a défini comme la somme de l'énergie interne et du produit de la pression par le volume du système.

$$H = U + p \Delta V .$$

Dans un système thermodynamique dont le volume et la pression sont fixes, l'enthalpie joue le même rôle que l'énergie interne et se mesure également en kilojoules (kJ).

IV-7.3 L'entropie

L'*entropie* est une variable thermodynamique importante. On la représente par la lettre S .

L'entropie est la mesure de la chaleur ΔQ , échangée entre le système thermodynamique et son environnement dans un processus réversible, à température constante. La variation d'entropie du système est égale à : $\Delta S = \Delta Q/T$.

On voit aisément que l'unité de mesure de l'entropie est le Kj/K.

Tableau 4.1 : Résultats de calcul après simulation

Les données pour chaque élément sont données en température et pression, les calculs apportés par le logiciel ont donné:

	P(bar)	T°(C)	U(Kj/Kg)	S(Kj/Kg/K)	V(m³/Kg)	h(Kj/Kg)	exergie(Kj/Kg)
Economiseur	80	167	701,2740	2,003261	0,001105	710,115	132,875
Ballon	50	210	892,9847	2,41958	0,001169	898,8302	201,627
Surchauffeur	50	270	2616,2498	6,019390	0,0405257	2818,8784	1084,391
Turbine	50	500	112,5254	0,392986	0,001003	112,62577	-0,61336

VI-8 APPLICATION D'UNE EXCITATION NON LINEAIRE

Habituellement l'excitation d'un alternateur est parfaitement continue. Etant donné que nous désirons absorber les puissances harmoniques pour les réinjecter dans le réseau sous forme d'énergie utile véhiculée sur la fréquence fondamentale. Un redresseur MLI a été développé pour satisfaire ce type de réglage.

VI-8.1 MODELE DU REDRESSEUR MLI

Le pont redresseur est constitué de trois bras avec deux transistors antiparallèles avec des diodes (Fig.4.19). Ces bras sont présentés comme des interrupteurs pouvant être commandés en ouverture «1» et en fermeture «0». La tension redressée U_{dc} est en fonction des états de ces interrupteurs. La figure ci-dessous illustre le schéma d'un redresseur triphasé à IGBT [11].

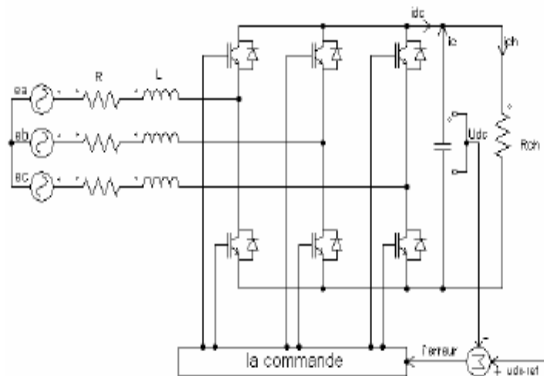


Fig. 4.9 Topologies de base d'un redresseur de tension

VI-8.2 Principe de fonctionnement

Contrairement aux redresseurs classiques, les redresseurs MLI sont réalisés à l'aide de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. La possibilité de commande à l'ouverture permet un contrôle total du convertisseur, parce que les interrupteurs peuvent être commutés, selon les besoins, aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture [12].

Le redresseur de tension fonctionne en gardant la tension du bus continu à une valeur de référence désirée, en utilisant une commande en boucle fermée. Pour accomplir cette tâche, la tension du bus continu U_{dc} est capturée puis comparée avec une référence U_{dref} , le signal d'erreur produit de cette comparaison est employé pour commuter les six interrupteurs du redresseur à la fermeture et à l'ouverture utilisant un contrôleur PI.

VI-8.3 MLI à porteuse triangulaire

Parmi les techniques de commande MLI, on a MLI à bande d'hystérésis, MLI à échantillonnage périodique, MLI à porteuse triangulaire, et MLI vectorielle.

Celle qu'on a adopté est la MLI à porteuse triangulaire.

La méthode de la MLI à porteuse triangulaire, compare l'erreur entre le signal (courant ou tension) et sa consigne avec une onde triangulaire (porteuse) d'une amplitude et d'une fréquence fixées. L'erreur passe par un correcteur avant d'être comparée avec la porteuse triangulaire[13].

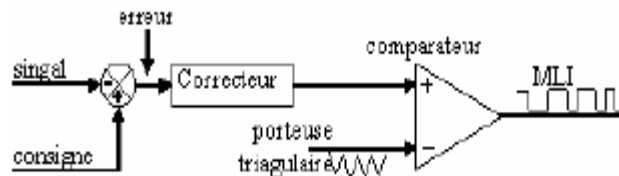


Fig. 4.10 Modulateur MLI à porteuse triangulaire

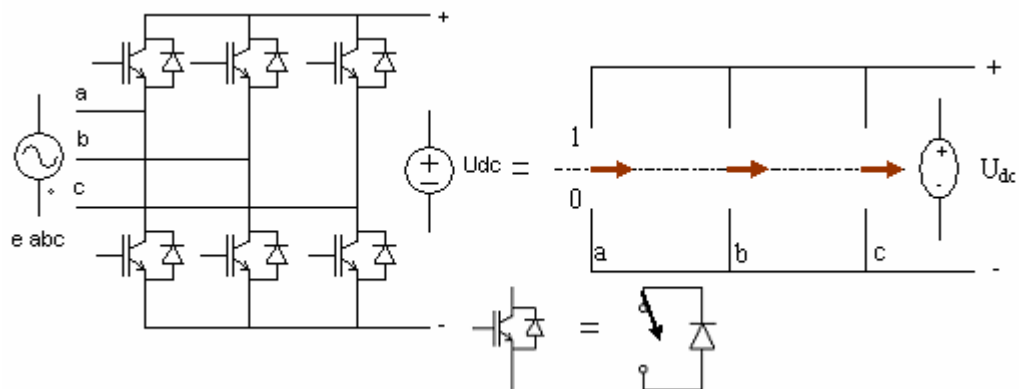


Fig. 4.11 Pont redresseur

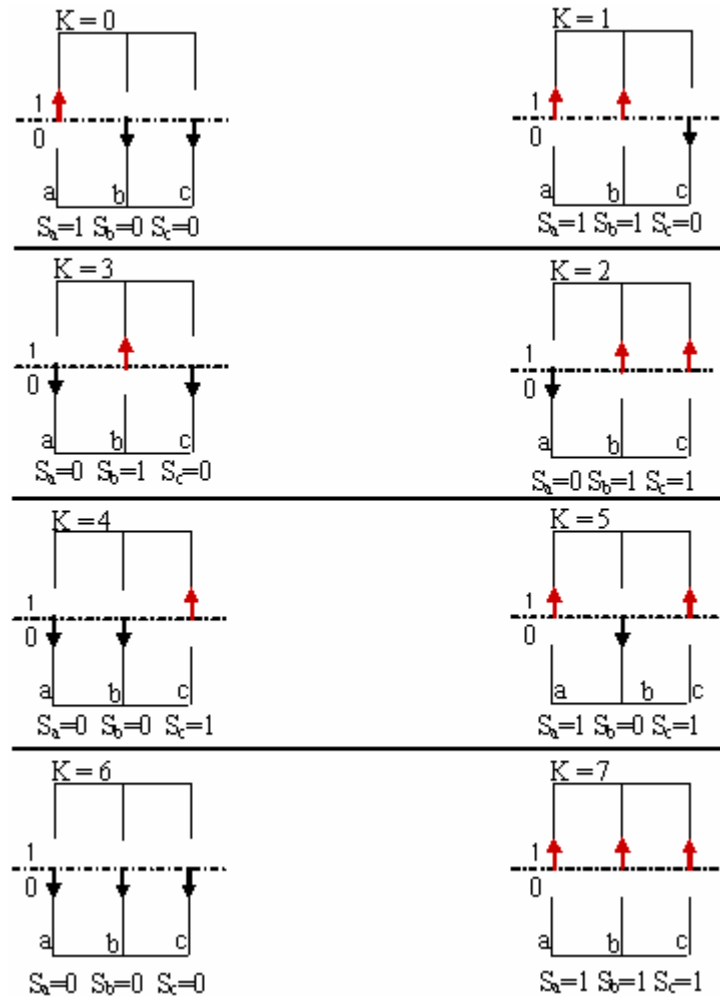


Fig. 4.12 Différents états de commutation des interrupteurs du redresseur MLI

K	S_a	S_b	S_c	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}
0	1	0	0	U_{dc}	0	$-U_{dc}$
1	1	1	0	0	U_{dc}	$-U_{dc}$
2	0	1	0	$-U_{dc}$	U_{dc}	0
3	0	1	1	$-U_{dc}$	0	U_{dc}
4	0	0	1	0	$-U_{dc}$	U_{dc}
5	1	0	1	U_{dc}	$-U_{dc}$	0
6	0	0	0	0	0	0
7	1	1	1	0	0	0

Tableau 4.2 Les huit états possibles des interrupteurs

De cette table on peut écrire les tensions d'entrée redresseur d'une manière générale comme suit :

$$V_{ab}=(S_a-S_b)U_{dc}$$

$$V_{bc}=(S_b-S_c)U_{dc}$$

$$V_{ca}=(S_c-S_a)U_{dc}$$

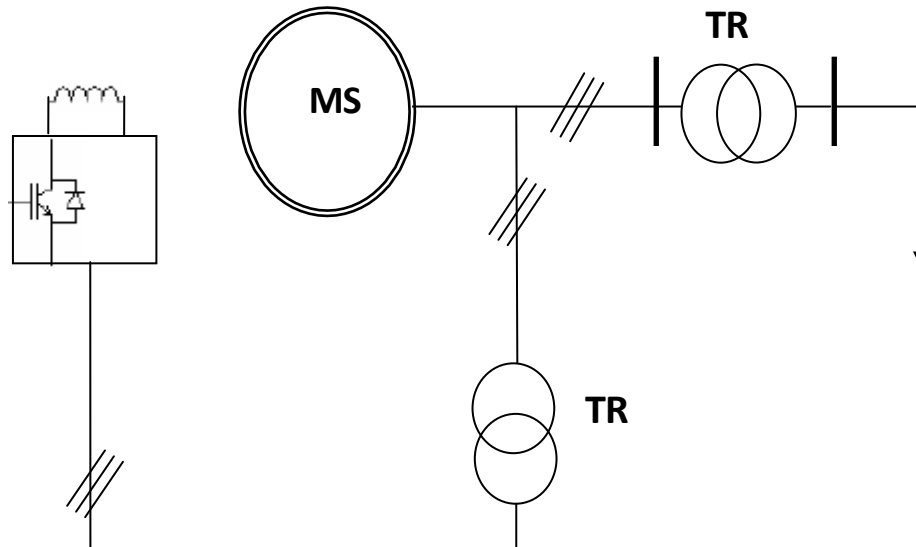


Fig. 4.13 Schéma unifilaire de la machine synchrone et son excitation

Les résultats de simulation ont donné :

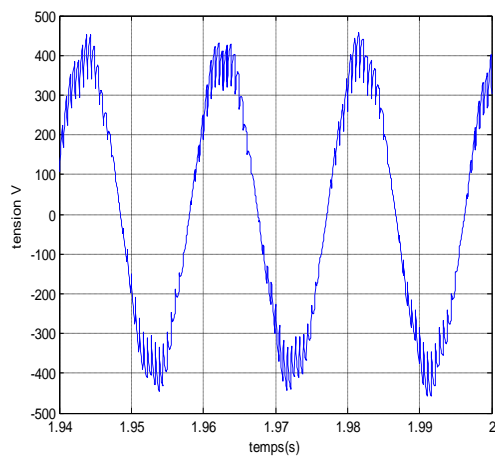


Fig. 4.14 Tension à l'entrée du réseau

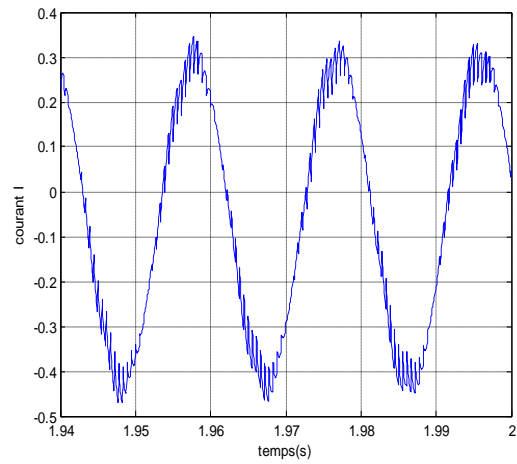


Fig. 4.15 Courant à l'entrée du réseau

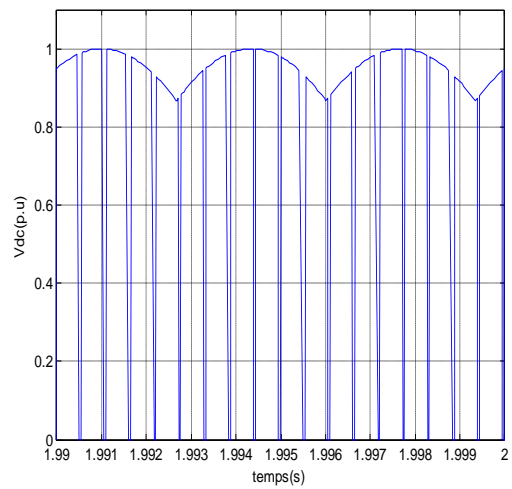


Fig. 4.16 Tension au niveau de l'excitation

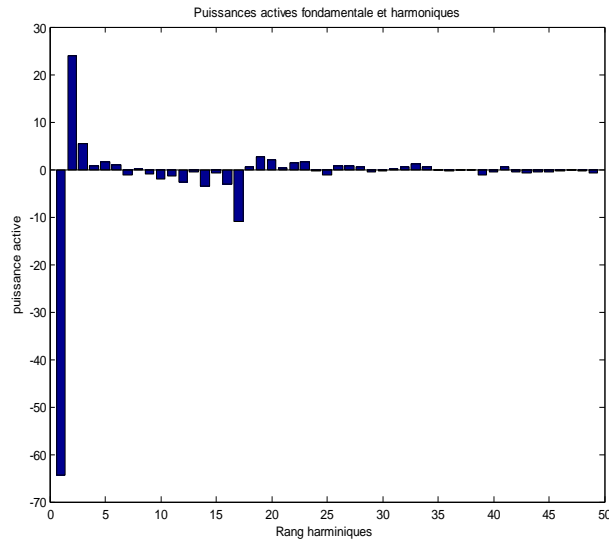


Fig. 4.17 Spectre d'harmoniques pour la puissance active

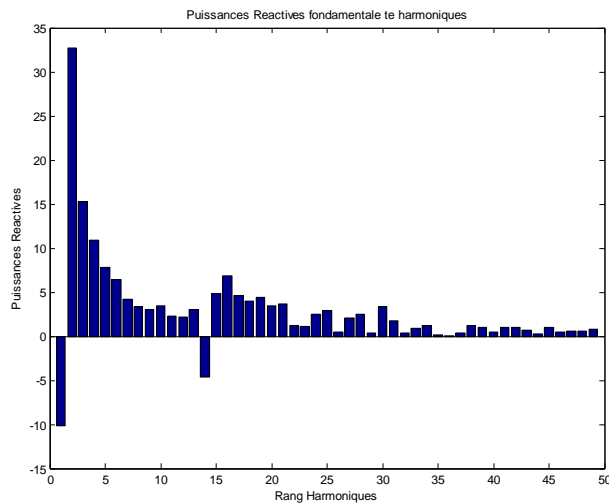


Fig. 4.18 Spectre d'harmoniques pour la puissance réactive

Conformément aux résultats obtenus l'alternateur peut aussi bien produire que consommer une puissance harmonique. Donc l'idée de récupération des énergies de déperditions harmoniques est théoriquement possible. Mais malheureusement ces résultats ne sont pas significatifs pour nous car la partie essentielle n'a pas été réalisée faute de données statistiques suffisante. Ces données nous auraient permis de voir le temps de réponse de ce type de centrale face à la rapidité de transit des puissances harmoniques. Dont l'inertie thermique a été déjà traitée dans ce même chapitre.

VI-9 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons détaillé le fonctionnement de la centrale d'Arcelor mittal avec quelques mesures réelles que nous jugeons insuffisantes. Ces mesures et données techniques nous ont permis de faire une simulation grâce à un logiciel spécifique (Thermoptim). Les résultats obtenus pour différents volumes de gaz inflammables présents et collectés au niveau de l'usine ont montré clairement l'incidence économique et environnementale de ce type de cogénération. Certes cette proposition nécessite un investissement initial important mais l'amortissement est à envisager à moyens termes, vu que les unités de production tels que les aciéries à oxygène, les hauts fourneaux dégagent d'importantes quantités de gaz dans l'atmosphère. Par voie de simulation notre proposition reste valable comme dans le cas de l'utilisation de l'éolienne à la seule différence dans ce cas le convertisseur utilisé pour linéariser la charge est plutôt un redresseur MLI. Nous jugeons aussi que le travail reste incomplet comparativement au chapitre précédent car la partie expérimentale n'a pas été faite. Pour voir la réponse de cette installation face à la rapidité d'écoulement des puissances harmoniques, qui ne peuvent pas être évaluées par simulation.

BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE IV

- [1] Encyclopédie libre Wikipédia . Centrales électriques. Site internet <http://fr.Wikipédia.org>.
- [2] M.E. El hawary . G.S Christensen: Optimal operation of electric power Extension. Academic press .inc 1973.
- [3] Encyclopédie canadienne: “Electricité , production,” encyclopedie.com/
- [4] A.J Wood , B.F Wallenbeg: Power generation, operation and control. John Willy and sons. Inc 1984.
- [5] Bensalem.A., *Analyse et gestion de la production des centrales électriques liées aux réseaux électriques de grande taille*. Doctorat d'état en Electrotechnique , Batna , Algérie, 2007.
- [6] Encyclopédie libre Wikipédia : Centrales électriques.
Site internet [http:// fr.Wikipédia.Org/](http://fr.Wikipédia.Org/).
- [7] Saïb.M , Données techniques, Arcelor mittal, 2010.
- [8] Silini.M ., Turbines à vapeur , Algerian petroleum institute.
- [9] Eric Goncalvés et Jean-Paul Thibault,Cycles thermodynamiques des machines. Thermiques. Institut national polytechnique de Grenoble , Octobre2006.
- [10] Silini.M ., Turbines à vapeur , Algerian petroleum institute.
- [11] Camblong,H. *Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable*. Doctorat, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers centre de Bordeaux. 18 Décembre 2003.
- [12] Kendouli.F. *Centrale éolienne et qualité de l'énergie électrique*. Doctorat, Université Mentouri.Constantine. 2012.
- [13] Boulahia.A. *Etude des convertisseurs statiques destinés à la qualité de l'énergie électrique*. Magister, Université Mentouri.Constantine. 2009.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

La prolifération des harmoniques issues des grandes zones industrielles conduit à une surconsommation électrique pour une même puissance utile. Le but de ce travail est de minimiser l'effet de ce foisonnement harmonique. Plusieurs techniques sont possibles, et la plus répandue d'entre elles est le filtrage. Malheureusement cette technique est limitée en puissance quant on parle d'usine tel que Arcelor Mittal. Notre proposition consiste à réutiliser ces puissances harmoniques, en les réinjectant sous forme de puissance utilisable. Pour ce faire on a besoin de convertisseur électrique et d'une source d'énergie, alors nous avons pensé à tester notre procédure sur deux types de sources distinctes, une renouvelable (Eolienne) l'autre conventionnelle (Thermique à gaz). Donc nous avons fait une évaluation en termes de capital et potentiel énergétique pour justifier l'utilisation de ces énergies.

Les ressources énergétiques peuvent être remplacées par d'autres énergies plus respectueuses de l'environnement, à cet effet on a mis en avant les potentiels énergétiques mondiaux et plus particulièrement algériens, afin de montrer le capital énergétique dont dispose le pays.

En effet ces énergies non conventionnelles obéissent à des lois climatiques et soumises aussi à des dynamiques différentes (différents inerties), afin de mettre en évidence l'effet de cette contrainte, une étude expérimentale basée sur des données industrielles réelles a été réalisée, où on a montré la difficulté de contrôle et d'optimisation d'une production à base de ferme éolienne sous un environnement non linéaire (tels que le cas des zones industrielles des usines)

Grâce à un convertisseur électrique doté d'une commande qui prend en charge la non linéarité de la puissance, les échanges énergétiques ont remodelé pour véhiculer l'essentiel de puissance utile. La raison d'utilisation de deux types différents de sources a été faite afin de voir la robustesse de la technique vu que les deux sources n'ont pas la même inertie. L'analyse et le développement théorique ont été validés par des résultats expérimentaux sauf pour le cas de la centrale thermique pour faute de données statistique suffisante.

En faisant un état de lieu de la consommation énergétique dans les grands complexes industriels, il est à remarquer que la consommation n'est pas rationnelle en plus des pertes énergétiques polluantes de l'environnement. En perspective, l'alternative que nous jugeons

la plus appropriée consiste à une minimisation des pertes énergétiques par des techniques de cogénération où on a montré son efficacité économique et écologique.

Nous envisageons de faire une évaluation technique et économique de la viabilité de notre proposition et de développer la meilleure procédure pour le faire.

ANNEXES

ANNEXE IV

FICHE TECHNIQUE DE LA CENTRALE N°2 ET 3

Ces deux unités sont identiques

Date de mise en service 1979.

Groupe 2 et 3 (alternateur)

Constructeur : AEG

Type : SU 7096/2

Puissance : 31300 KVA

Tension de sortie :10,5KV

Cosφ : 0,8

Vitesse :3000 T/min

Système d'excitation : diode tournante

Turbine N° 2 et 3

Constructeur : AEG KANIS

Type : V63 (année 1976)

Puissance : 26,6 MW

Vitesse : 3000 T/min

Température admission : 500°C

Pression vapeur : 50b

Nombre d'étages : 32b

Régulation : hydraulique

Chaudière N° 2 et 3

Constructeur : EVT

Année de construction : 1977

Type de chaudière : chaudière à rayonnement avec parois de tubes à ailettes

Débit en marche nominale :115T/h

Pression timbre : 60b

Température sortie : 500°C

Température H₂O alimentation : 167°C

Combustible : Gaz naturel, gaz HF et gaz de cokerie.