

RÉPUBLIQUE ALGIRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES

DÉPARTEMENT de GÉNIE ÉLECTRIQUE



MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Science et Technologie

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Réseaux Electriques et haute tension

**Etude des systèmes de production décentralisés et
leurs interconnexions aux réseaux électriques**

Préparé par :

ABDELOUAFI MOHAMMED

DAMERNA AHMED

Mr. KOULALI Mostafa

Mme. S. LARIBI

Mr. BEKKI. Brahim

Mr. BEY Mohamed

Président

Examineur

Encadreur

Co-encadreur

PROMOTION : 2016

Remerciements

Notre remerciement s'adresse en premier lieu à Allah le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.

*Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur **Mr. BEKKI Brahim** qui nous a apporté une aide précieuse. Nous lui exprimons notre gratitude pour sa grande disponibilité ainsi que pour sa compréhension et les encouragements qu'il nous a apportés...*

Nous adressons également nos remerciements à Mr le président du jury et Mrs les membres du jury pour avoir accepté d'examiner et de juger notre travail.

*Nos vifs remerciements vont aussi au Doctorant en Réseaux électriques **Mr Bey Mohamed** pour ses conseils et ses orientations et à tous nos amis et tous nos collègues qui nous ont assisté durant notre encadrement.*

Dédicace

Je tiens à dédier ce mémoire :

A ma très chère Mère et à mon cher Père, en témoignage et en gratitude de leurs dévouement, de leurs soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leurs réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affectations sans limite.

A ceux qui sont la source de mon inspiration et mon courage, à qui je dois de l'amour et de la reconnaissance :

*A mes Chères Sœurs, mes chers Frères : ABDELDJALILE ET
ABDELDJBARÈ.*

A toute ma famille.

*A mes amis : ELFAIEZ, NOREDDINE, DIH, BEY, CHAALALE ET
KHALED.*

*A mes collègues de la promotion 2016
« Réseaux électriques ».
A tous mes amis (chaque un à son nom).*

ABDELOUAFI

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A ma mère avec toute mon affection.

A mon père avec toute ma reconnaissance.

A mes frères et mes sœurs.

*A mes amis et mes collègues de la promotion 2016
« Réseaux électriques ».*

A mes féaux amis (chaque un à son nom).

.

DAMERNA Ahmed

Table des figures

Numéro de la figure	Nom de la figure	page
Figure I-1	Le réseau électrique	5
Figure I-2	Organisation des différents niveaux de tension du système électrique	7
Figure I-3	Niveaux de tension normalisés	8
Figure I-4	Schéma de principe des postes sources HTB/HTA	8
Figure I-5	Simple dérivation	9
Figure I-6	Double dérivation	10
Figure I-7	Coupure d'artère	10
Figure I-8	Les tensions des harmoniques	11
Figure I-9	Déséquilibre de tension	11
Figure I-10	Exemple de cas de surtensions transitoires	13
Figure I-11	Classification de la stabilité des réseaux électriques	14
Figure I-12	Machine synchrone connectée à un jeu de barres infini	15
Figure I-13	Relation puissance- angle de rotor.	16
Figure I-14	Variation d'angle de rotor	17
Figure I-15	Evolution de la puissance électrique en fonction des angles rotoriques	18
Figure II-1	Centrale nucléaire	24
Figure II-2	Centrale thermiques à flamme	25
Figure II-3	Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique	26
Figure II-4	Schéma de fonctionnement d'une turbine	27
Figure II-5	La micro-turbine	28
Figure II-6	Générateur à gaz de la biomasse 2000kw	29
Figure II-7	Les moteurs diesel de la centrale de Tamanrasset (5MW)	29
Figure II-8	Gros moteur Stirling solaire auto (50 KW)	30
Figure II-9	Principe de fonctionnement de la cogénération.	31

Figure II-10	Principe de fonctionnement d'éolienne	32
Figure II-11	Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique	32
Figure II-12	Centrale géothermique	33
Figure II-13	Centrale solaire thermique	33
Figure II-14	Centrale solaire photovoltaïque	34
Figure II-15	Fonctionnement de centrale biomasse	34
Figure II-16	Transit de puissance d'un réseau avant raccordement de GED	36
Figure II-17	Transit de puissance d'un réseau après raccordement de GED	37
Figure II-18	Impacts sur la qualité de service	38
Figure II-19	Protection de découplage dans le réseau de distribution 30 KV	39
Figure III-1	Principe de la conversion d'énergie	44
Figure III-2	Composants d'un parc d'éoliennes aux réseaux électrique	45
Figure III-3	Système de stockage inertiel associé à l'énergie éolienne	46
Figure III-4	Volant d'inertie	47
Figure III-5	Supraconducteur	48
Figure III-6 :	Super condensateur	48
Figure III-7 :	Pompage hydraulique	49
Figure III-8 :	Compresseur d'air	50
Figure III-9	Les batteries	51
Figure III-10	Les piles à combustibles	52
Figure III-11	Profil aérodynamique d'une pale	53
Figure III-12	Système éolien basé sur la machine MADA	54
Figure III-13	Représentation simplifiée de la MADA	55
Figure III-14	Transformation de Park	58
Figure III-15	Les régions ventées en Algérie	65
Figure IV-1	Présentation PSAT	68
Figure IV-2	Réseau test simulé par PSAT	69
Figure IV-3	Comportement du réseau test	73
Figure IV-4	Intégration d'une éolienne au nœud 5	74

Figure IV-5	Vitesse et angle de charge avec éolienne intégré au nœud 4	75
Figure IV-6	Tension avec éolienne intégré au nœud 4	75
Figure IV-7	Vitesse et angle de charge avec éolienne intégré au nœud 5	76
Figure IV-8	Tension avec éolienne intégré au nœud 5	76
Figure IV-9	Circulation de puissances du réseau test	78
Figure IV-10	Circulation de puissances du réseau test raccorde avec éolienne.	79

LISTE DES TABLEAUX

Numéro du tableau	Nom du tableau	page
Tableau 1	Moyens de stockage à court terme	46
Tableau 2	Moyens de stockage à long terme	46
Tableau 3	Caractéristique des nœuds	69
Tableau 4	Caractéristiques des lignes	69
Tableau 5	Caractéristique des charges	70
Tableau 6	Caractéristiques des transformateurs	70
Tableau 7	Caractéristiques des noeuds PV	70
Tableau 8	Caractéristiques de noeud bilan	70
Tableau 9	Les données des machines	71
Tableau 10	Paramètres du modèle du vent	71
Tableau 11	Paramètres de la MADA	72
Tableau 12	Les pertes totales de puissance active et réactive de réseau sans raccordement d'une éolienne.	77
Tableau 13	Représente les pertes de puissance active et réactive dans le réseau en présence d'une éolienne.	77

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale 1

Chapitre I: Généralité sur les réseaux électrique

I.1 Introduction 4

I.2 Le réseau électrique et son rôle 4

I.3 Différents types de réseaux électriques 5

I.3.1 Réseaux de transport et d'interconnexion..... 6

I.3.2 Réseaux de répartition 6

I.3.3 Réseaux de distribution 6

I.4 Les raisons de choix du système électrique verticalement intégré :..... 7

I.5 Schémas d'exploitation 8

I.5.1 Les postes sources HTB/HTA 8

I.5.2 Les lignes HTA 9

I.6 Quelques problèmes survenant sur le réseau électrique 10

I.6.1. Tensions harmoniques 10

I.6.2 Déséquilibre de tension 11

I.6.3 Papillotement 12

I.6.4 Coupures brèves 12

I.6.5 Surtensions temporaires 12

I.6.6 Variation de fréquence 12

I.6.7 Surtensions transitoires 13

I.7 Stabilité des réseaux électriques 13

I.7.1 Stabilité angulaire 14

I.7. 1.1 Stabilités angulaire aux petites perturbations 15

I.7.1.2 Stabilité transitoire 15

I.7. 2 Stabilité de fréquence	19
I.7.3 Stabilité de tension	20
I.7. 3.1 Stabilité de tension vis-à-vis de petite perturbation	20
I.7. 3.2 Stabilité de tension vis-à-vis des grandes perturbations	20
I.8 Conclusion	20

Chapitre II : la production d'énergie électrique

II.1 Introduction :	22
II.2 Production centralisée :	22
II.2.1 Introduction :	22
II.2.2 Différents types de production centralisé :	22
II.2.2.1 Les centrales thermiques :	23
II.2.2.2 Les centrales nucléaires :	23
II.2.2.2.1 Les avantages et les inconvénients	24
II.2.2. 3 Les centrales thermiques à flamme :	25
II.2.2.4 Les centrales hydraulique :	26
II.3 La production décentralisée :	27
II.3.1 Introduction :	27
II.3.2 Définition :	27
II.3.3 Différents types de production décentralisée :	27
II.3.3.1 Les sources classiques :	27
II.3.3 .1.1 Les unités de secours	27
II.3.3.1.2 La cogénération	30
II.3.3.2 Les sources nouvelles et renouvelables :	31
II.3. 3.2.1 L'énergie éolien	31
II.3. 3.2.2 L'énergie hydraulique	32
II.3. 3.2.3 L'énergie géothermique	33
II.3. 3.2.4 L'énergie solaire thermique	33

II.3. 3.2.5 L'énergie solaire photovoltaïque	34
II.3. 3.2.6 L'énergie biomasse	34
II.3.4 Les avantages de la production décentralisée :	35
II.3.5 Impacts de la Production Décentralisée :.....	36
II.3.5.1 Impacts de la production décentralisée sur le réseau de distribution :.....	36
II.3.5.2. Impacts de la production décentralisée sur le réseau de transport :.....	38
II.3.6.La Protection de la Production Décentralisée :	39
II.4. Conclusion :	40

Chapitre III : couplage d'une centrale isolé au réseau électrique

III.1 Introduction	42
III.2 Intégration de la GED sur les réseaux	42
III.2.1 Étude de raccordement d'une installation	42
III.3 La centrale éolienne	43
III.3.1 Principe de conversion	43
III.3.1.1 Connexion au réseau	44
III.3.1.1.1 Condition de couplage et perturbations	44
III.3.1.1.2 Stockage de l'énergie électrique	45
III.3.1.1.2.1 Moyens de stockage à court terme	47
III.3.1.1.2.2 Moyens de stockage à long terme	49
III.3.2 La turbine	52
III.3.3 Modèle de machine à double alimentation (MADA)	53
III.3.3.1 Modélisation modèle de machine à double alimentation (MADA)	54
III.3.3.1 .1 Hypothèses simplificatrices	55
III.3.3.1.2 Equation électrique et magnétique	56
III.3.3.1.2.1 Equation électrique	56
III.3.3.1.2.2 Equation magnétique	57
III.3.3.1.3 Application de la transformation de Park	58

III.3.3.1.4 Modélisation de la machine asynchrone dans le repère de Park	60
III.3.3.1.4.1 Equation électrique	60
III.3.3.1.2.2 Equation magnétique	61
III.3.4 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	63
III.3.5 Répartition régionale de la vitesse du vent	64
III.4 Conclusion	65

Chapitre IV : résultat et simulation

IV.1.Introduction	67
IV.2. Outils de simulation	67
IV.2.1 Utilisation de PSAT	68
IV.3 Description du réseau étudié	68
IV.3.1 Les paramètres de réseau test	69
IV.4 Réseau test sans l'intégration de la ferme éolienne	72
III.4.1 Simulation	72
IV.5 Réseau test avec l'intégration de la ferme éolienne	73
IV.5.1 Position optimal	74
IV.5.1.1 Caractéristiques des machines	74
IV.5.1.2 Les pertes actives et réactives.....	77
IV.5.1.3 Les transits de puissance	78
IV.6.Conclusion	79
Conclusion général	80

Introduction générale

Introduction générale

Les réseaux électriques sont considérés comme des infrastructures hautement critiques pour notre société. Ces réseaux sont conçus traditionnellement d'une manière verticale où les transferts de l'énergie suivent le schéma dit « du haut en bas » : Production -Transport- Distribution

En effet, les réseaux électriques sont traditionnellement exploités d'une manière centralisée, ainsi, la plus grande partie de la production électrique est centrée autour de centrales à grande capacité de production (type centrales hydrauliques, thermiques, nucléaires). Cette production est souvent liée à des emplacements géographiques adéquats (sources d'eau, impératifs techniques, ...). L'énergie est ensuite acheminée vers les grands centres de consommation à travers un réseau de lignes aériennes et de câbles, souvent à de grandes distances et à des niveaux de tension plus au moins importants. Cette structure a été construite sur des bases économiques, de sécurité du système et de qualité de fourniture de l'énergie. [1]

La production décentralisée introduit des changements radicaux sur les métiers de la génération, du traitement et de la distribution de l'énergie électrique et remet en cause la planification, la conception, le fonctionnement et l'exploitation de ces réseaux. En effet, ces réseaux n'ont pas été conçus dans cette optique (raccordement d'unités de production à « grande échelle ») et la possibilité d'introduire ces sources d'énergie au sein de ces réseaux peut avoir des conséquences importantes sur la circulation des flux énergétiques et donc sur la philosophie et l'implémentation du système de gestion et de la protection du réseau. Par ailleurs, cette forme de production, de par sa nature distribuée, a le potentiel de permettre une meilleure sécurisation des infrastructures. En effet, le mode classique de l'écoulement de l'énergie dépend beaucoup du réseau de transport. Ce dernier est considéré comme le maillon faible de la chaîne. Une meilleure pénétration de la production décentralisée permettra au réseau tout entier de moins dépendre du réseau de transport. [2]

L'objet de notre travail porte sur l'intégration de la production décentralisée dans réseau électrique.

L'étude présentée dans ce travail s'organise comme suit :

Le premier chapitre expose une généralité sur le réseau électrique, son rôle où l'on s'intéresse aux réseaux de distribution et transport avec leurs différentes architectures ensuite les différents problèmes survenant sur ces réseaux ainsi les différents types de stabilité de réseau électrique.

Introduction générale

Dans le deuxième chapitre nous exposons les deux systèmes de production d'énergie électrique (centralisée et décentralisée), leurs différents types et l'impact de la production décentralisée sur le réseau électrique et sa protection.

Le troisième chapitre expose le couplage d'une centrale isolée au réseau électrique et explique le raccordement de Génération d'Energie Dispersée au réseau. Nous étudierons un type de production décentralisée (centrale éolienne) son principe de fonctionnement, la modélisation de sa machine, et enfin les avantages et les inconvénients de ce système.

Dans la quatrième partie nous allons exposer les résultats obtenus de la simulation des différentes configurations et étudier les performances d'un réseau test avant et après le raccordement du système de production décentralisé cette simulation a été effectuée en utilisant le logiciel PSAT. Les résultats obtenus seront commentés et comparés aux travaux précédents.

I.1 Introduction

A l'origine, le réseau électrique a été construit et dimensionné pour transporter l'énergie électrique produite par les centres de production jusqu'aux centres de consommation les plus éloignés. Ainsi, les transits de puissances circulent de l'amont depuis les productions d'énergie électrique de type grosses centrales thermiques, hydraulique ou nucléaire, vers l'aval représenté par les consommateurs.

Le « système » réseau électrique met donc en œuvre des milliers de kilomètres de ligne, des milliers de poste de transformation, ainsi que de nombreux organes de coupure et d'automates de réglage, dimensionnés pour assurer le bon fonctionnement de la fourniture d'énergie électrique. Ainsi, des contrôles hiérarchisés assurent la tenue en tension et en fréquence ; ceux-ci couplés aux divers automates, ont la charge de garantir la qualité et la continuité de service du système.

Cependant le réseau peut être soumis à des perturbations se propageant vite et sur une partie étendue, et qui peuvent avoir un impact critique pour tout le système électrique. Ces perturbations peuvent être, entre autres, accentuées par des productions locales ajoutées sur le réseau transport ou de distribution.

On assiste donc à une prolifération de système de production décentralisée connectée pour l'essentiel à un système électrique non prévu pour les accueillir

I.2 Le réseau électrique et son rôle :

Les premières centrales électriques ont été construites par des industries pour s'autoalimenter en courant continu. L'usage public de l'électricité n'a réellement débuté qu'après l'Exposition Universelle de 1881. Les premières concessions municipales de production et de distribution d'électricité sont alors faites à des entreprises privées ou à des régies municipales pour l'éclairage public et l'alimentation de particuliers.

Le courant alternatif s'est généralisé avec l'évolution technologique qui a permis d'adapter les tensions à des puissances importantes grâce aux transformateurs. [3]

Le réseau électrique est hiérarchisé par niveau de tension, celui-ci est fractionné en trois principales subdivisions à savoir le réseau de transport, de répartition et de distribution. Une notion de frontière peut être définie entre les niveaux de tension du réseau électrique, ces frontières sont assurées par les postes sources et les transformateurs. Figure (I-1). [4]

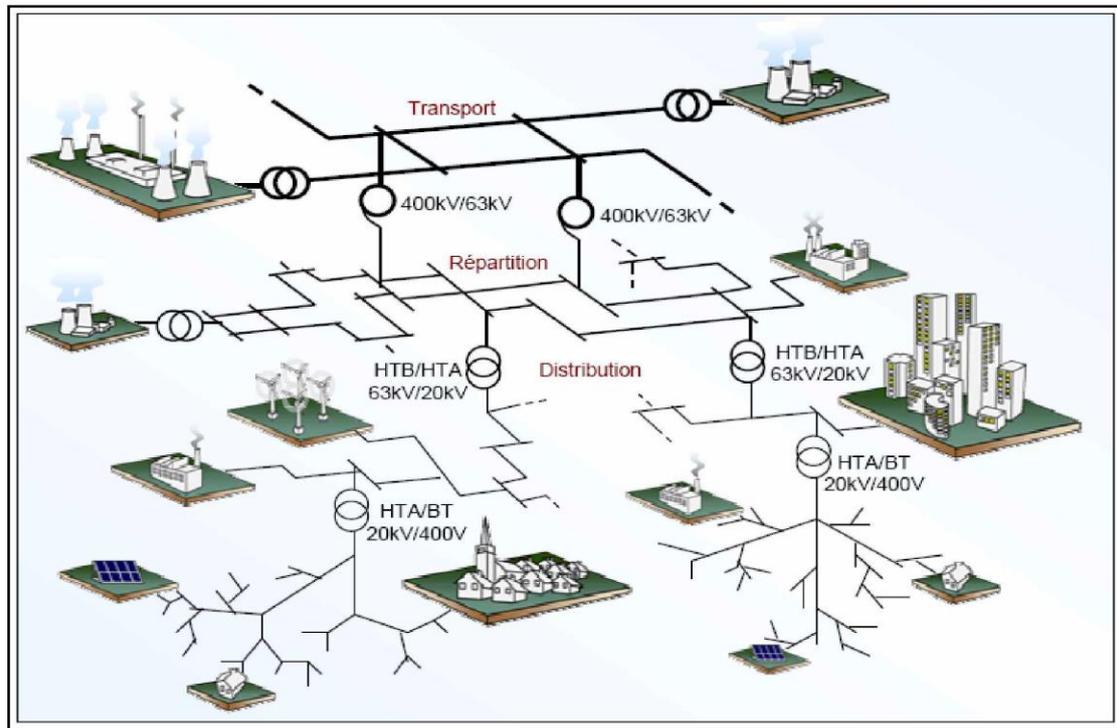


Figure I-1 : Le réseau électrique

Le réseau électrique est exploité de manière à assurer trois principaux objectifs :

- La distribution d'électricité doit pouvoir être garantie et ce malgré les aléas du réseau. En effet, celle-ci est un enjeu à la fois financier et de sécurité pour les biens matériels et des personnes. Ainsi l'opérateur du réseau doit être capable de faire face à ces aléas et d'éviter les dégâts potentiels ainsi que leurs propagations. Cet enjeu de sûreté de fonctionnement en régime normal et en régime perturbé est un des premiers objectifs. [4]
- L'onde de tension fait l'objet d'engagement contractuel que l'opérateur se doit de tenir en respectant une règle d'égalité c'est-à-dire une impartialité entre clients en conservant une continuité de service maximale. [4].
- Le dernier objectif d'exploitation est un objectif économique, l'exploitation doit être menée de manière optimale dans le but de réduire les pertes ainsi que les coûts de maintenance et d'investissement. D'autre part l'exploitation doit favoriser l'ouverture du marché de l'électricité. [4]

I.3 Différents types de réseaux électriques :

Un réseau électrique est généralement hiérarchisé par niveau de tension, celui-ci est fractionné en trois principales subdivisions à savoir le réseau de transport, de répartition et de distribution. Une notion de frontière peut être définie entre les niveaux de tension du réseau électrique, ces frontières sont assurées par les postes sources et les transformateurs.

I.3.1 Réseaux de transport et d'interconnexion :(en Algérie 225kV, 400kV) ou réseau de haute tension de niveau B (HTB) :

Sur ce réseau sont connectées les centrales de production classique comme les centrales nucléaires, thermiques, hydrauliques de l'ordre du millier de mégawatts. Ces réseaux ont une architecture maillée, ainsi les productions ne sont pas isolées mais toutes reliées entre elles, cette structure permet une sûreté de fonctionnement accrue par rapport à une structure de réseau dite radiale puisqu'elle assure la continuité du service ou d'alimentation en cas d'aléas comme la perte d'une ligne, d'une production, etc. En effet, lors de l'ouverture d'une ligne, le fait d'avoir cette structure maillée permet au flux de puissance de trouver un nouveau chemin pour contourner cette ligne en défaut et donc de garantir la continuité de l'alimentation en aval du problème. C'est à ce niveau de tension que sont assurées les interconnexions entre régions au niveau nationale et les échanges (importation/exportation) d'énergie électrique au niveau internationale [5].

I.3.2 Réseaux de répartition :(63kV, 220kV) :

Celui-ci assure le transport des réserves en électricité composées de l'énergie puisée au réseau de transport et de productions de plus petites échelles vers les zones de consommations et à quelques gros clients industriels directement connectés à celui-ci. (Mentionnant que la terminologie "réseau de répartition" tend à disparaître, ce niveau de tension étant généralement englobé dans le terme "transport".)

La gestion de la tension et de la fréquence des réseaux de transport et de répartition est effectuée de manière centralisée. Des mesures de puissances actives et réactives et de tension sont effectuées sur le réseau et sont rapatriées aux centres de télé conduite. Ces mesures sont ensuite disponibles aux opérateurs en charge du bon fonctionnement du réseau ainsi que de la coordination des productions. L'opérateur en charge du bon fonctionnement de ces réseaux est le gestionnaire du réseau de transport. (En Algérie c'est le GRTE (**G**estionnaire de **R**éseau de **T**ransport d'**E**lectricité), cette entité exploite et entretient le réseau public de transport Algérien). [5]

I.3.3 Réseaux de distribution : (30kV, 400V) :

Ce réseau a pour fonction d'alimenter l'ensemble de la clientèle principalement connectée à ce réseau. Son exploitation est gérée par un **G**estionnaire de **R**éseau de **D**istribution (GRD). Les réseaux de distribution ont principalement une structure radiale. A la différence d'une structure maillée une structure radiale est une structure arborescente ; cette structure arborescente simplifie considérablement le système de protections puisque le transit de puissance se fait de manière unilatérale du poste source (HTB/HTA) vers les postes HTA/BT et les consommateurs finaux. Ceci permet notamment la localisation et l'élimination rapide de défauts, ainsi que le comptage de

l'énergie aux postes sources. Cette structure est donc parfaitement adaptée à un système verticalement intègre dans lequel la production est centralisée et la consommation distribuée. [5]

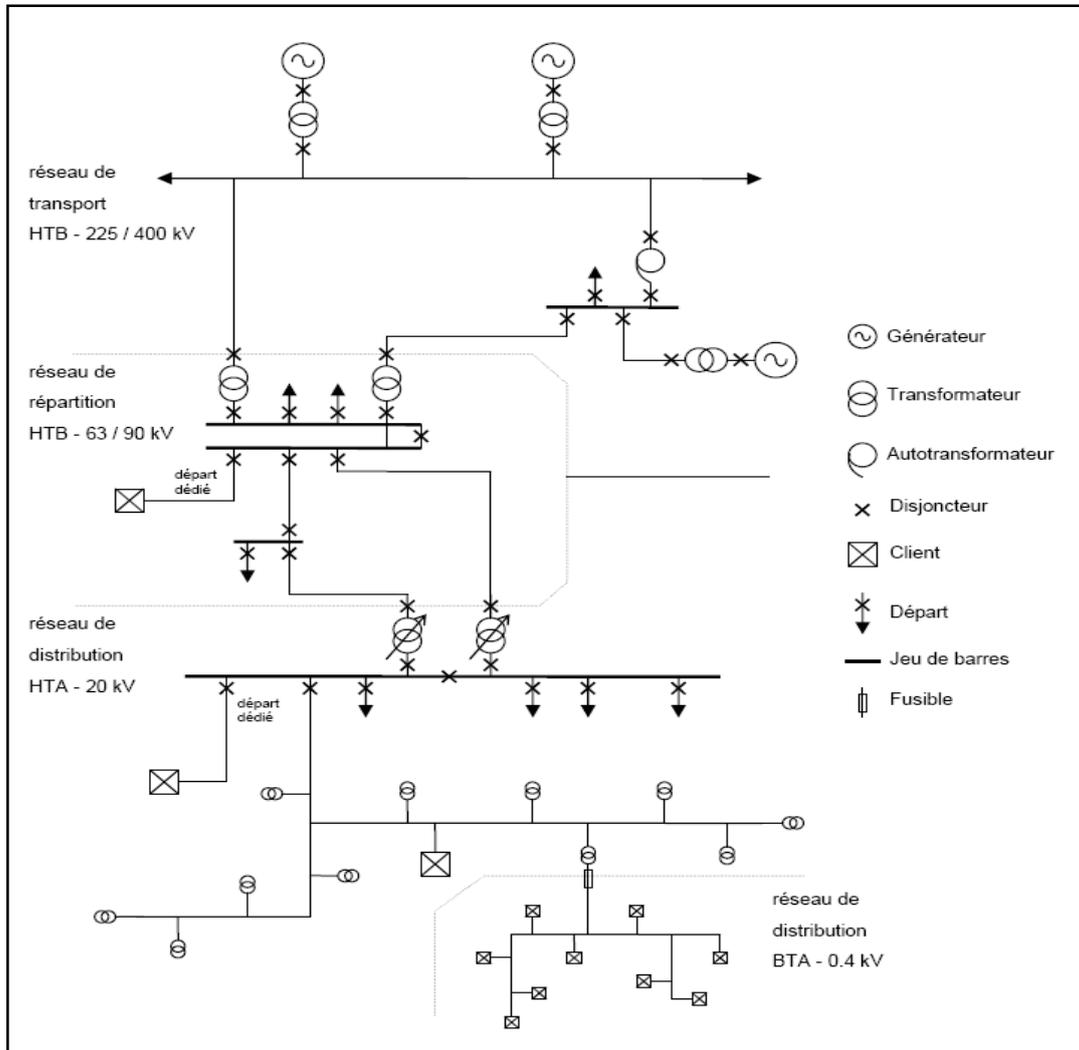


Figure I-2 : Organisation des différents niveaux de tension du système électrique

I.4 Les raisons de choix du système électrique verticalement intégré :

Le système électrique est basé sur un monopole production – transport – distribution pour des raisons économiques liées au coût de construction et d'entretien des installations de production, de transport et de distribution de l'électricité, ainsi que politiques. Cette structure verticalement intégrée était aussi favorisée par les obligations de service public du distributeur d'énergie électrique comme la continuité de service, l'égalité de traitement des consommateurs, ou l'obligation de fourniture. [3]

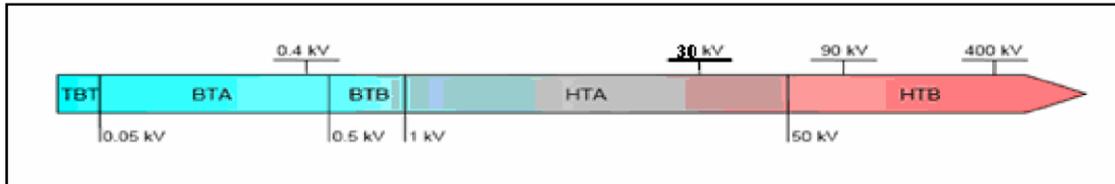


Figure I-3 : Niveaux de tension normalisés

La définition des différents niveaux de tension résulte à la fois de choix historiques et d'optimisations technico-économiques entre le coût d'installation et de maintenance des ouvrages et leur capacité à transporter l'énergie du point de production au client final en générant un minimum de pertes. Ainsi, le niveau de tension HTA à 30 kV s'est imposé pour la distribution car il permet de minimiser le nombre de postes sources et de limiter les chutes de tension tout en utilisant des matériels peu exigeants en termes de tenue de tension. [3]

I.5 Schémas d'exploitation :

I.5.1 Les postes sources HTB/HTA : [3]

Les postes sources, en général alimentés par le réseau de répartition à 63 ou 90 kV (quelquefois directement par le réseau de transport à 225 kV) constituent l'interface entre les réseaux de transport/répartition et les réseaux de distribution. Ils sont constitués en phase initiale d'un transformateur alimenté par une arrivée HTB (HT1) et alimentant lui-même une ou deux rames, ou jeux de barres (figure I.4.a). En seconde phase, avec l'augmentation des charges à desservir, un second transformateur est ajouté (figure I.4.b), et le poste est généralement raccordé à une deuxième arrivée HTB (HT2) appelée "garantie ligne". En phase finale, un troisième (et quelquefois plus) transformateur est ajouté en double attache (figure I.4.c).

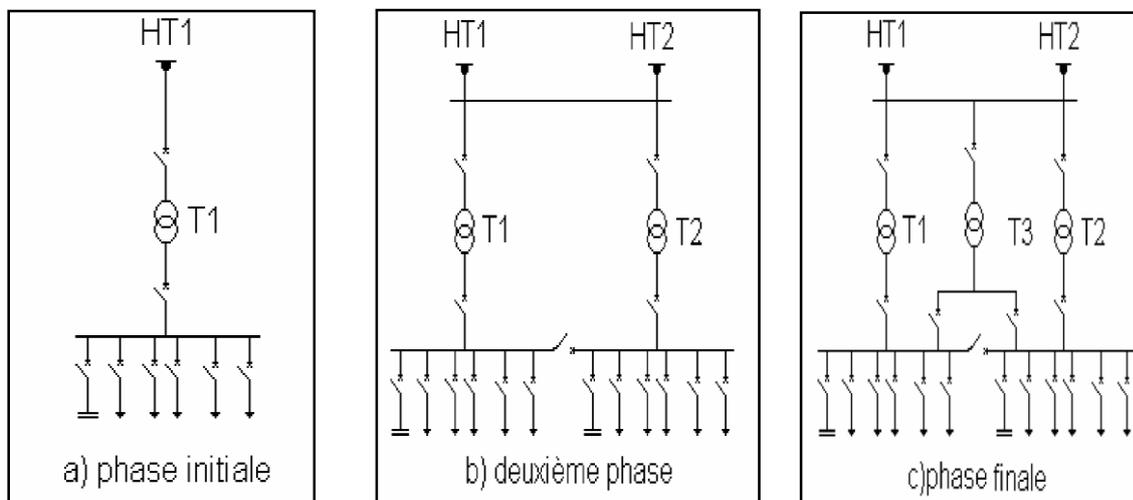


Figure I-4 : Schéma de principe des postes sources HTB/HTA

En exploitation normale, un transformateur peut alimenter plusieurs rames, le second étant en secours ; ou bien chaque transformateur alimente une rame ou une demi-rame. Les transformateurs ne sont jamais en parallèle, sauf de courts instants pendant un changement de schéma d'exploitation du poste.

Les départs HTA sont regroupés par demi-rame en fonction de leur nature (aérien ou souterrain) et de la similarité de leur courbe de charge, c'est-à-dire du type de clients raccordés.

I.5.2 Les lignes HTA : [3]

Le réseau HTA à une structure arborescente radiale le plus souvent bouclée par une autre demi-rame ou un autre poste source pour la sécurité d'exploitation. Il est en général constitué d'une artère ou ossature principale et de dérivations. Selon la densité de charges à desservir, le réseau de distribution sera réalisé soit en lignes aériennes, soit en câbles souterrains.

a. Réseaux HTA aériens : [3]

Les zones rurales à faible densité de charge sont alimentées par des lignes HTA aériennes en simple dérivation (figure I.5), traditionnellement moins coûteuses que les câbles enterrés. Le dimensionnement de ces ouvrages est lié aux chutes de tension maximales admissibles en raison de l'éloignement des charges à desservir.

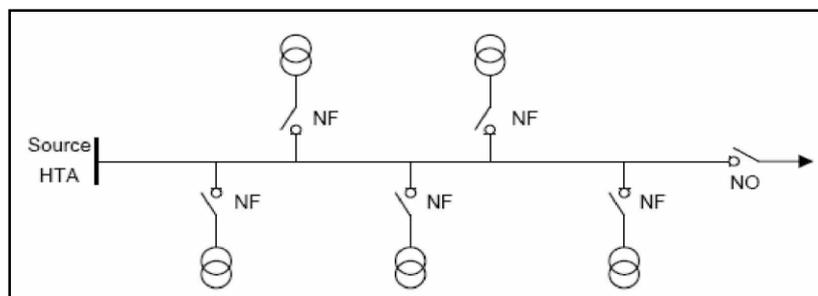


Figure I-5 : Simple dérivation

NF désigne un interrupteur normalement ferme, et **NO** un interrupteur normalement ouvert.

b. Réseaux HTA souterrains : [3]

Les zones urbaines ou mixtes à forte densité de charge sont alimentées par des câbles HTA enterrés en double dérivation (figure I.6) ou en coupure d'artère (figure I.7).

En double dérivation, les postes HTA/BT sont normalement alimentés par le câble de travail (CT), le câble de secours (CS) permet de garantir une bonne continuité de service en cas de défaut.

La technique en coupure d'artère est moins coûteuse que la précédente et permet une isolation rapide des défauts, mais nécessite un temps d'intervention plus long.²

Le dimensionnement des ouvrages souterrains est principalement lié aux courants admissibles dans les câbles en raison de la densité des charges à desservir.

Les ouvrages de distribution neufs ou les rénovations en zones rurales sont également réalisés en câble enterré depuis les années 1990, en raison de la baisse notable du surcoût lié à cette technique. De plus, une volonté politique croissante de qualité environnementale tend à la réduction de l'impact visuel des ouvrages.

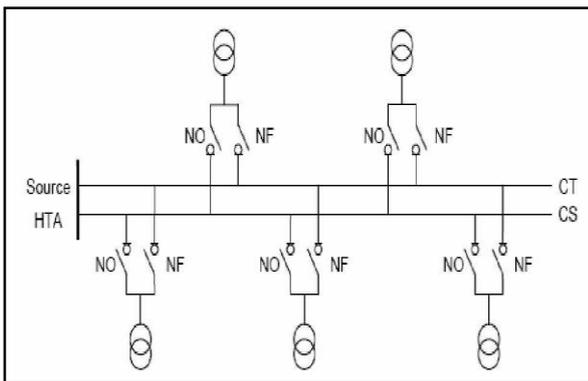


Figure I-6: Double dérivation

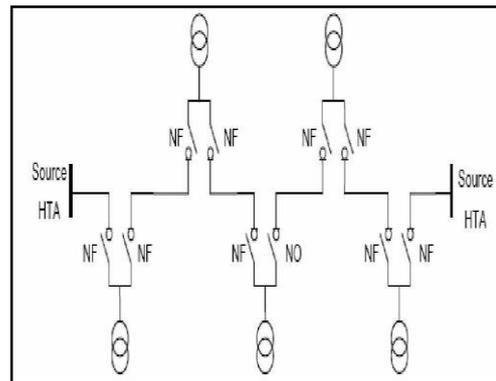


Figure I-7 : Coupure d'artère

I.6 Quelques problèmes survenant sur le réseau électrique : [6]

I.6.1. Tensions harmoniques :

Description : Les harmoniques sont des tensions ou des courants sinusoïdaux dont les fréquences correspondent à des multiples entiers de la fréquence fondamentale (50 ou 60 Hz). On considère dans la présente définition les harmoniques de longue durée, excluant les phénomènes transitoires isolés.

Causes : Les harmoniques sont créés par des appareils dont la caractéristique tension/courant n'est pas linéaire, comme c'est le cas avec les convertisseurs électroniques de puissance des entraînements de moteurs, les redresseurs utilisés pour l'électrolyse, les fours à arc, etc.

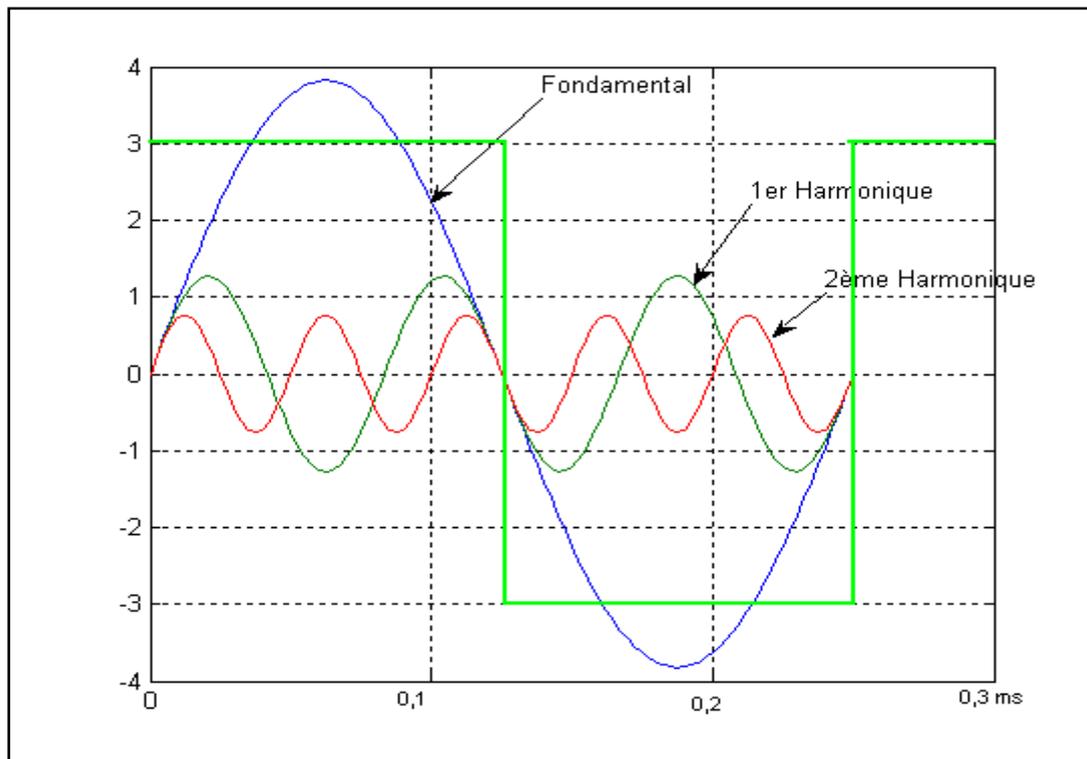


Figure I-8 : les tensions des harmoniques

I.6.2 Déséquilibre de tension :

Description : Cet indice sert à caractériser les asymétries d'amplitude et de déphasage des tensions triphasées en régime permanent. Le taux de déséquilibre de tension est défini, suivant la méthode des composantes symétriques, comme le rapport existant entre le module de la composante inverse de la tension et celui de la composante directe.

Causes : Les déséquilibres de tension qui s'appliquent aux tensions triphasées ont deux causes principales, soient les asymétries d'impédance des lignes du réseau et les déséquilibres de charge.

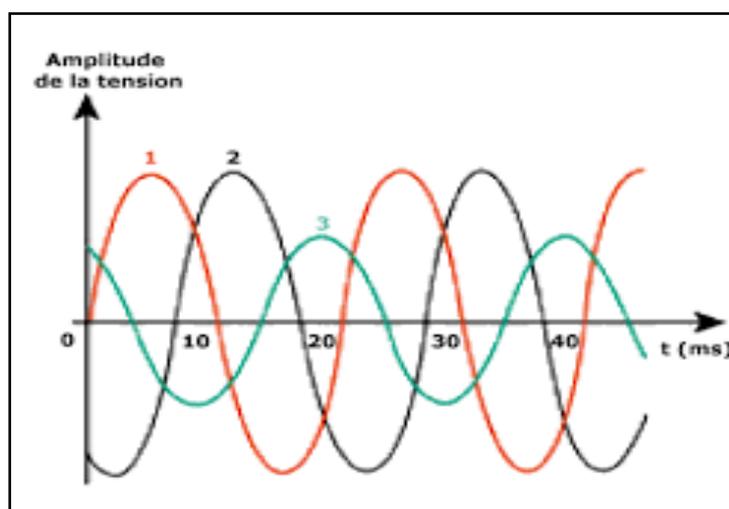


Figure I-9 : Déséquilibre de tension

I.6.3 Papillotement :

Description : Le papillotement traduit l'inconfort physiologique éprouvé au niveau de la vision à la suite de changements répétitifs de luminosité de l'éclairage.

À certaines fréquences, l'œil peut percevoir l'effet sur l'éclairage de très faibles variations de tension. La plupart des appareils ne sont toutefois pas perturbés par ce phénomène.

Causes : Le papillotement est dû aux variations répétitives de tension causées par certaines charges industrielles comme les machines à souder, les laminoirs, les gros moteurs à charge variable, les fours à arc, etc.

I.6.4 Coupures brèves :

Description : Les coupures brèves correspondent à la perte momentanée de la tension d'alimentation sur toutes les phases pour des durées inférieures à 1 minute.

Causes : La plupart du temps, les coupures brèves sont dues à l'action des dispositifs de protection des réseaux en vue d'éliminer les défauts. Sur les lignes à haute tension, il est de pratique courante d'effectuer un réenclenchement automatique dans le but de réalimenter le plus rapidement possible une ligne perturbée par un défaut fugitif. Ainsi, au lieu d'une interruption, les clients alimentés par la ligne perturbée ne subissent qu'une coupure brève dont la durée peut varier de 0,5 à 1,5 seconde, en l'absence de contraintes de coordination de protection.

I.6.5 Surtensions temporaires :

Description : Les surtensions temporaires sont des hausses soudaines de la valeur efficace de la tension de plus de 110% de la tension nominale, laquelle se rétablit après une courte durée. Les surtensions temporaires comprennent des durées entre 8 millisecondes et une minute.

Causes : Les surtensions temporaires peuvent être attribuables à des défauts, à des délestages de charge ou à des phénomènes de résonance et de ferrorésonance. Le plus souvent, elles résultent des surtensions qui se produisent sur les phases saines lors de court-circuit monophasés à la terre, par exemple.

I.6.6 Variation de fréquence :

Description : La fréquence nominale de la tension alternative fournie par le réseau est de 50 ou 60 Hz. Cette valeur est déterminée par la vitesse des alternateurs des centrales.

Causes de variations : Le maintien de la fréquence d'un réseau dépend de l'équilibre établi entre la charge et la puissance des centrales. Comme cet équilibre évolue dans le temps, il en résulte de petites variations de fréquence dont la valeur et la durée dépendent des caractéristiques de la charge et de la réponse de la production. Par ailleurs, le réseau peut-être soumis à des variations plus importantes dues à des défauts ou des variations de charge ou de production qui causent des

variations de fréquence temporaires dont l'amplitude et la durée dépendent de la sévérité de la perturbation.

I.6.7 Surtensions transitoires :

Description : On classe généralement dans cette catégorie les perturbations de très courte durée, qui durent typiquement moins d'un demi-cycle, c'est-à-dire de quelques microsecondes (μs) à plusieurs millisecondes (ms). Les surtensions transitoires peuvent être unidirectionnelles ou oscillatoires et elles peuvent endommager les isolants de l'appareillage ou des composantes électroniques.

Causes : Les surtensions peuvent être reliées à :

- des manœuvres sur les lignes et les équipements en réseau, notamment des commutations de batteries de condensateurs qui se traduisent par une onde oscillatoire amortie superposée à l'onde fondamentale et présentent une fréquence généralement comprise entre 100 Hz et 9 kHz, et d'une durée de crête inférieure à $\frac{1}{2}$ cycle ;
- la foudre qui se traduit généralement par une impulsion unidirectionnelle présentant, dans les cas les plus rapides, un temps de montée de l'ordre de la microseconde

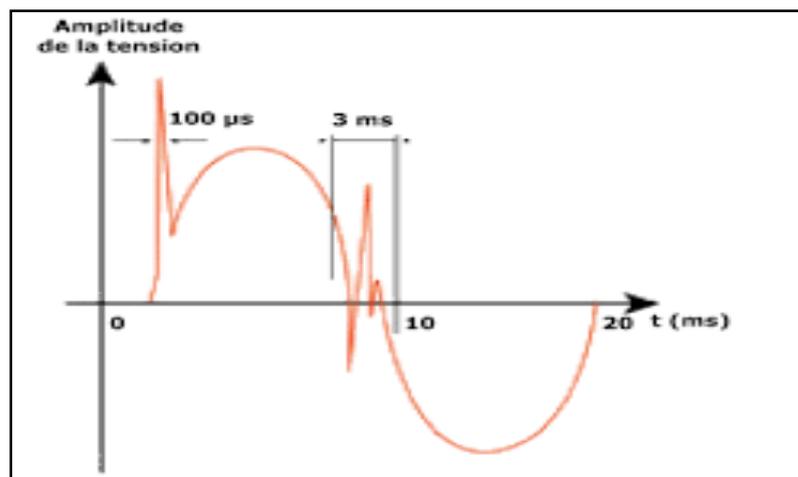


Figure I-10 : Exemple de cas de surtensions transitoires.

I.7 Stabilité des réseaux électriques : [6]

La stabilité d'un réseau électrique est la propriété qui lui permet de rester dans un état d'équilibre, pour des conditions de fonctionnement normales, et de retrouver un état d'équilibre acceptable, suite à une perturbation. Selon la nature physique de l'instabilité, la plage de temps des phénomènes et l'amplitude de perturbations, on peut classifier les types de la stabilité :

- Stabilité angulaire
- Stabilité de fréquence
- Stabilité de tension

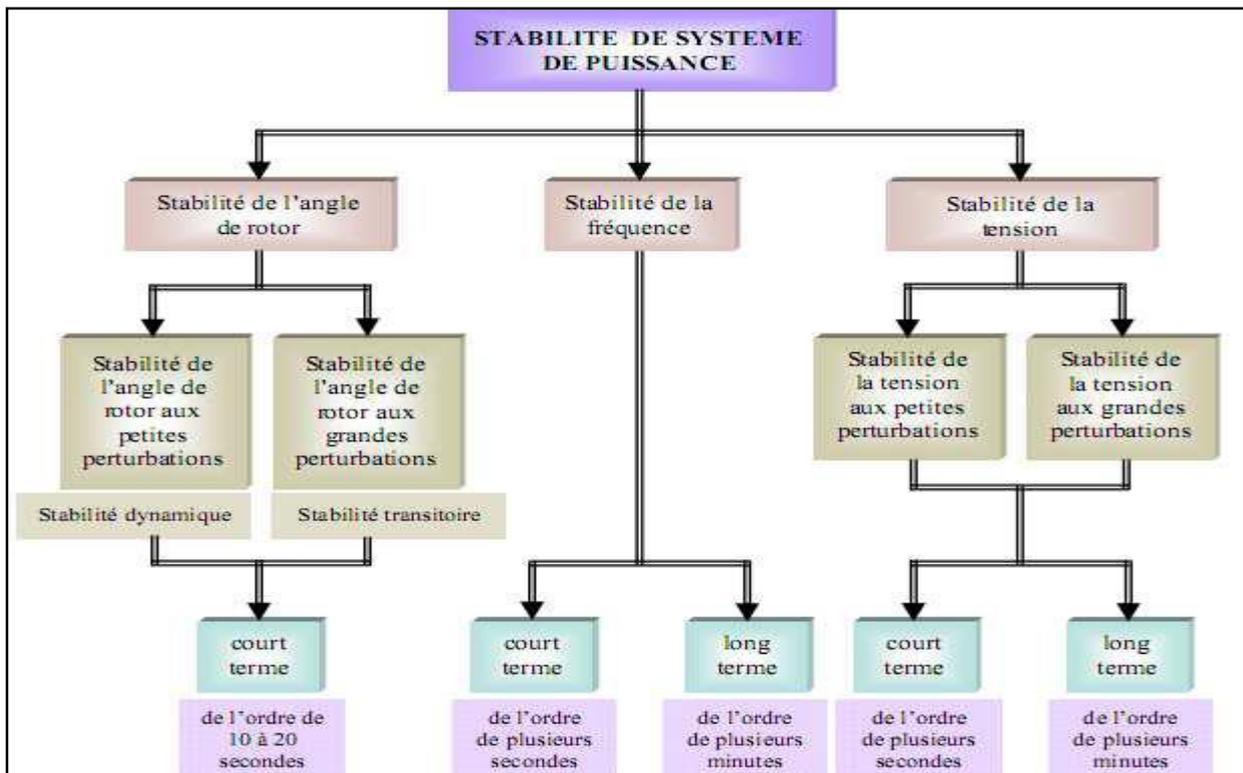


Figure I-11 : Classification de la stabilité des réseaux électriques

I.7.1 Stabilité angulaire : [6]

Etant donné que les systèmes de puissance recourent principalement aux machines synchrones pour la génération de puissance électrique, un aspect important est le fonctionnement de ces générateurs au synchronisme.

La stabilité angulaire (ou stabilité d'angle rotoriques) implique l'étude des oscillations électromécaniques inhérentes aux réseaux électriques. Elle est définie comme la capacité d'un ensemble de machines synchrones interconnectées de conserver

Le synchronisme dans des conditions de fonctionnement normales ou après avoir été soumis à une perturbation.

L'instabilité angulaire se manifeste sous forme d'un écart croissant entre les angles rotoriques : soit d'une machine et de reste du système, soit d'un groupe de machines et du reste du système. Une machine qui a perdu le synchronisme sera déclenchée par une protection de survitesse ou par une protection de perte de synchronisme, ce qui met en danger l'équilibre production consommation du système.

Selon l'amplitude de la perturbation, on parle de la stabilité angulaire aux petites perturbations ou de la stabilité transitoire.

I.7. 1.1 Stabilités angulaire aux petites perturbations : [6]

La stabilité angulaire aux petites perturbations concerne la capacité du système à maintenir le synchronisme en présence de petites perturbations comme : une petite variation de la charge ou de génération, manœuvre d'équipement, etc.

I.7.1.2 Stabilité transitoire :

La stabilité transitoire concerne la capacité du réseau à maintenir le synchronisme suite à une perturbation sévère comme un court-circuit, arrêt d'un générateur, etc. La réponse du système comporte de grandes variations des angles rotoriques et est influencée par la relation non linéaire entre couples et angles. [6]

Le concept de stabilité transitoire peut être expliqué par une approche graphique simple, à savoir le critère des aires égales (en anglais, Equal Area Criterion). Cette approche regroupe l'équation du mouvement et la courbe (P- δ) traditionnelle représentant la relation entre la puissance produite par le générateur et l'angle de rotor.

Pour expliquer cette approche, nous prenons un système de puissance simple constitué d'un générateur synchrone connecté à un jeu de barres infini via une ligne de transmission, Figure. Le générateur est modélisé par une source de tension idéale E_g en série avec une réactance X_g (modèle classique). La ligne et le transformateur sont représentés par la réactance X_E . [8]

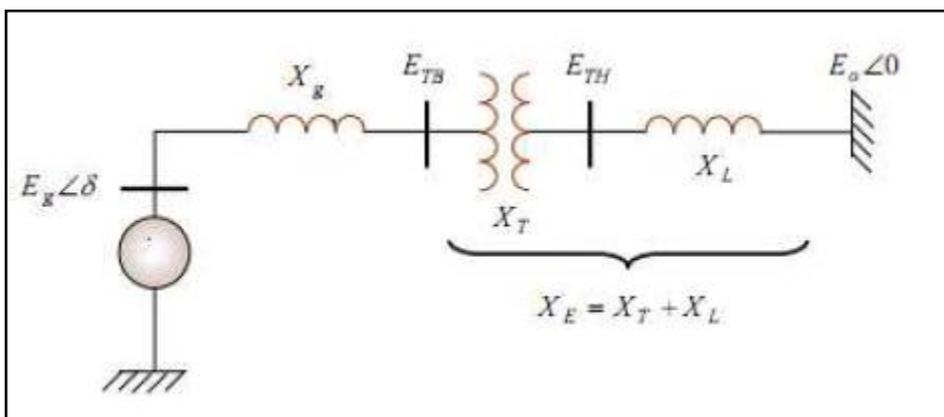


Figure I-12 : Machine synchrone connectée à un jeu de barres infini

a. Relation entre la puissance électrique et l'angle rotoriques (P- δ) :

Dans l'état d'équilibre, la puissance produite par le générateur P_e est donnée par l'équation suivante :

$$P_e = \frac{E_g \cdot E_0}{X_g + X_E} \sin \delta \quad (1)$$

Où, δ est l'angle de rotor, est le déphasage entre la tension interne du générateur (E_g) et la tension du jeu de barres infini (E_0).

L'équation (1) est représentée graphiquement à la Figure.

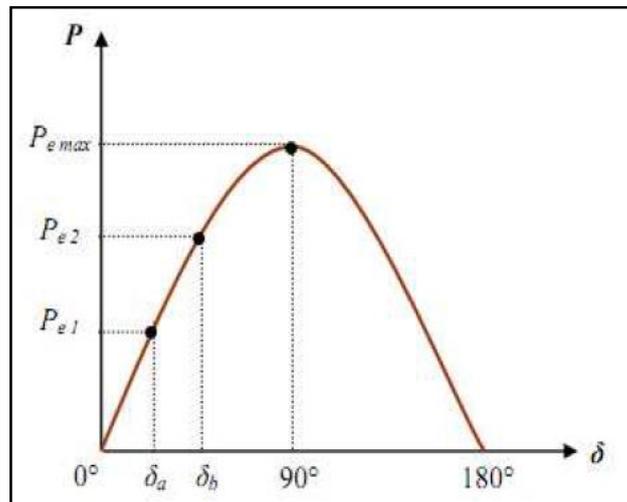


Figure I-13 : Relation puissance- angle de rotor.

Lors de l'équilibre, la puissance électrique P_{e1} est égale à la puissance mécanique appliquée pour l'angle correspondant δ_a . Un brusque changement sur la charge du générateur entraîne une variation de la puissance mécanique, et par conséquent de la puissance électrique, par exemple de P_{e1} à P_{e2} , (Figure I-13). Le rotor va donc accélérer de sorte que l'angle de puissance augmente, de δ_a à δ_b , pour pouvoir fournir une puissance supplémentaire à la charge. Cependant, l'accélération du rotor ne peut pas s'arrêter instantanément. Ainsi, bien que la puissance développée pour l'angle δ_b soit suffisante pour la charge, le rotor va dépasser l'angle δ_b jusqu'à ce qu'un couple opposé suffisant soit développé pour arrêter cette accélération. L'énergie supplémentaire va entraîner le ralentissement du rotor et la diminution de l'angle de puissance. Suivant l'inertie et l'amortissement du système, les oscillations de l'angle de rotor résultant vont ou s'amortir, et la machine restera stable (cas 1, Figure I-14), ou diverger, et la machine deviendra instable en perdant le synchronisme avec le système (cas 2, Figure I-14).

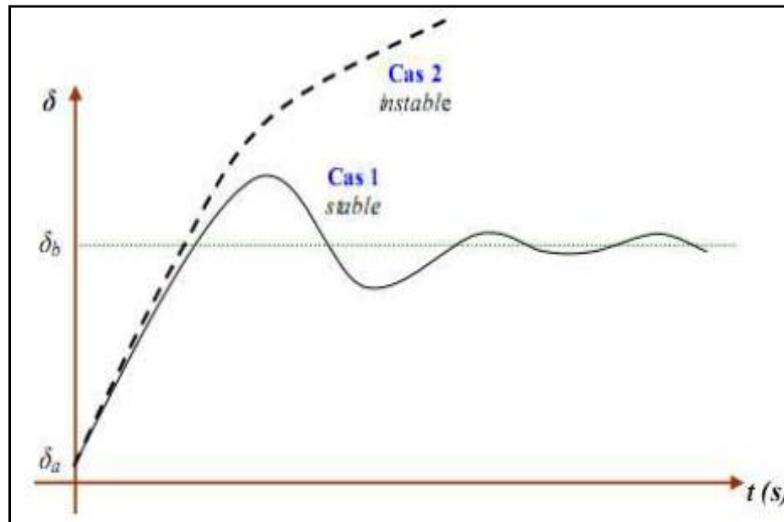


Figure I-14 : Variation d'angle de rotor

b. Critère d'égalité des aires :

Considérons un défaut, sur la ligne de transmission, appliqué au système précédent disparaissant après quelques périodes du système. Ceci va modifier l'écoulement de puissance et, par conséquent, l'angle de rotor δ . Retracer la courbe (P - δ) en tenant compte de ce défaut, Figure I-15 En dessous de cette courbe, nous pouvons considérer deux zones :

- La première zone (zone A₁, zone d'accélération) se situe au-dessous de la droite horizontale correspondante au point de fonctionnement initial (la droite de charge). Elle est limitée par les deux angles de rotor (δ_0 et δ_1) correspondants à l'apparition et à la disparition de défaut. Cette zone est caractérisée par l'énergie cinétique stockée par le rotor du fait de son accélération : $P_m > P_e$
- La deuxième zone (zone A₂, zone de décélération), qui commence après l'élimination du défaut, se situe en dessus de la droite de charge : elle est caractérisée par la décélération du rotor : $P_m < P_e$ Si le rotor peut rendre dans la zone A₂ toute l'énergie cinétique acquise durant la première phase, le générateur va retrouver sa stabilité. Mais si la zone A₂ ne permet pas de restituer toute l'énergie cinétique, la décélération du rotor va continuer jusqu'à la perte de synchronisme. [8]

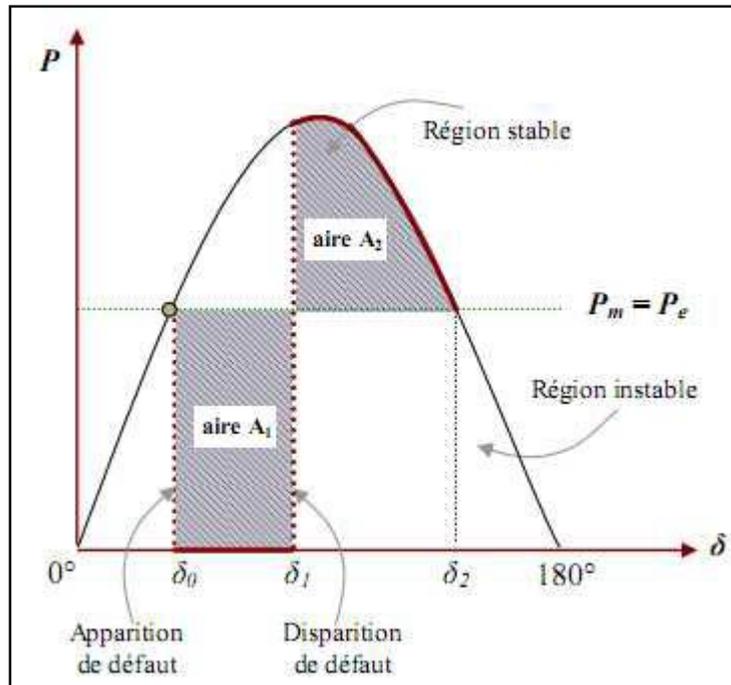


Figure I-15 : Evolution de la puissance électrique en fonction des angles rotoriques

La relation entre les aires des zones (A_1 et A_2) et la stabilité transitoire peut être mathématiquement expliquée comme suit :

Rappelons tout d’abord que l’équation du mouvement de générateur est donnée par la relation Suivante :

$$\frac{d^2\delta}{dt} = \frac{\omega_0}{2H} (P_m - P_e) \tag{2}$$

Ou :

H : la constante d’inertie.

ω_0 : la vitesse de synchronisme.

P_m : la puissance mécanique fournie au générateur.

P_e : la puissance électrique du générateur.

En multipliant cette équation par $2 \cdot \frac{d\delta}{dt}$, en intégrant par rapport au temps et en faisant un changement de variables, nous obtenons :

$$\left(\frac{d\delta}{dt}\right)^2 + \text{cte} = \int_{\delta_0}^{\delta_2} \frac{\omega_0}{2H} (P_m - P_e) \cdot d\delta \tag{3}$$

Ou :

δ_0 : L'angle de rotor, initial, a l'instant de l'application de défaut.

δ_2 : L'angle de rotor à la fin de la période transitoire.

Ainsi, lorsque : $t = 0 \quad \triangleright \quad = \delta_0, \frac{d\delta}{dt} = 0 \quad \triangleright \quad \mathbf{cte} = \mathbf{0}$

Après l'élimination du défaut, l'angle δ va s'arrêter de varier et le générateur va retrouver sa vitesse de synchronisme, lorsque $\frac{d\delta}{dt} = 0$.

Par conséquent, l'équation (1.3) s'écrit comme suit :

$$\int_{\delta_0}^{\delta_2} (P_m - P_e). d\delta = 0 \quad (4)$$

$$\int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_m - P_e). d\delta + \int_{\delta_1}^{\delta_2} (P_m - P_e). d\delta = 0 \quad (5)$$

Ou : δ est l'angle de rotor à l'instant de l'élimination de défaut.

$$\triangleright A_1 - A_2 = 0$$

Ainsi, la limite de la restauration de la stabilité transitoire se traduit mathématiquement par l'égalité des aires de la zone A_1 et de la zone A_2 : cette condition est appelée critère d'égalité des aires (Equal Area Criterion).

Par conséquent, les contrôleurs de la stabilité transitoire peuvent améliorer la stabilité soit en diminuant la zone d'accélération (zone A_1), soit en augmentant la zone de décélération (zone A_2). Cela peut être réalisé soit en augmentant la puissance électrique, soit en diminuant la puissance mécanique.

En outre, un système statique d'excitation avec une tension maximale élevée et d'un régulateur de tension possédant une action "puissante" et rapide représente un moyen très efficace et économique pour assurer la stabilité transitoire [9]. Enfin, une amélioration significative de la stabilité transitoire est obtenue avec des systèmes très rapides de détection des défauts et de disjoncteurs.

I.7. 2 Stabilité de fréquence :

La stabilité de fréquence concerne la capacité du système à maintenir sa fréquence proche de la valeur nominale, suite à un incident sévère ayant ou non conduit à un morcellement du système. La stabilité de fréquence est étroitement liée à l'équilibre global entre la puissance active produite et consommée. [6]

I.7.3 Stabilité de tension :

La stabilité de tension concerne la capacité d'un système de puissance à maintenir des tensions acceptables à tous ses nœuds, dans des conditions de fonctionnement normales ou suite à une perturbation. L'instabilité de tension résulte de l'incapacité du système production-transport à fournir la puissance demandée par la charge. Elle se manifeste généralement sous forme d'une décroissance monotone de la tension.

Selon l'amplitude de la perturbation, on distingue la stabilité de tension de petites perturbations et celle de grandes perturbations. [6]

I.7.3.1 Stabilité de tension vis-à-vis de petite perturbation :

La stabilité de tension de petites perturbations concerne la capacité du réseau électrique à maintenir la tension dans les limites permises en présence de perturbations telles que : une variation faible de la charge, de la production,...etc.

I.7.3.2 Stabilité de tension vis-à-vis des grandes perturbations :

Elle est définie comme la capacité du réseau électrique à maintenir les tensions des nœuds dans les limites de fonctionnement permises en présence des grandes perturbations à savoir la perte d'équipement de transport ou de production, le court-circuit,...etc.

Dans ce mémoire, nous nous intéressons seulement à la stabilité de tension. Une étude détaillée sera présentée dans la section suivante.

I.8 Conclusion :

Ce chapitre expose une vision sur le réseau électrique avec son rôle et architecture et schémas d'exploitation, sans oublier les différents types de problèmes et stabilité de réseau électrique

Le but premier d'un réseau d'énergie est de pouvoir alimenter la demande des consommateurs. Comme on ne peut encore stocker économiquement et en grande quantité l'énergie électrique il faut pouvoir maintenir en permanence l'égalité : Production = Consommation + pertes.

Le réseau électrique doit permettre de livrer aux utilisateurs un bien adapté à leurs besoins, caractérisé par :

- Une puissance disponible, fonction des besoins quantitatifs du client ;
- Une tension fixée, fonction de cette puissance et du type de clientèle ;
- Une qualité traduisant la capacité à respecter les valeurs et la forme prévues de ces deux paramètres et à les maintenir dans le temps.

II.1 Introduction :

A notre époque, et sans électricité, la vie quotidienne serait difficilement envisageable. Il est donc nécessaire de savoir la produire de manière efficace et continue. Pour répondre à la consommation croissante d'électricité, il a fallu inventer et construire des usines capables de produire de l'électricité en grande quantité. La turbine et l'alternateur sont les deux pièces maîtresses de ces générateurs d'électricité. [20]

Dans le cas des usines thermiques, la turbine est entraînée par la vapeur produite dans les chaudières où l'on brûle les combustibles, alors que dans le cas des usines hydroélectriques, la turbine est animée par la force de l'eau. La turbine est couplée à un alternateur, un grand aimant cerclé d'une bobine, qui va produire un courant alternatif en tournant. Une fois le courant produit, il doit être amené jusque chez le consommateur.

II.2 Production centralisée :

II.2.1 Introduction :

L'électricité joue un rôle croissant dans les consommations d'énergie. Au fur et à mesure qu'on améliore l'isolation des bâtiments les consommations de chauffage baissent d'importance, alors que les autres consommations (éclairage et autres applications électriques) jouent un rôle croissant. Alors que 80% des appareils électroménagers tendent à avoir d'excellentes performances énergétiques (classement A+), le développement des ordinateurs domestiques et l'usage d'Internet compensent largement cette tendance à la réduction des consommations. Il est donc très important de situer les usages électriques. C'est d'autant plus délicat que deux solutions se présentent pour la production :

- . La **solution centralisée**, l'électricité étant produite dans des centrales souvent puissantes,
- . Et la **solution décentralisée**, qui consiste à produire l'électricité sur les lieux mêmes d'utilisation.

Nous ne traitons, dans ce livret, que des productions centralisées.

II.2.2 Différents types de production centralisé :

Les productions classiques d'électricité reposent, pour l'essentiel:

- Les centrales thermiques
 - Les centrales nucléaires
 - Les centrales thermiques à flamme
- Les centrales hydrauliques

II.2.2.1 Les centrales thermiques :

Une centrale thermique est une centrale électrique qui produit de l'électricité à partir d'une source de chaleur. Cette source peut être un combustible brûlé (tels gaz naturel, certaines huiles minérales, charbon, déchets industriels, déchets ménagers), la fission de noyaux d'uranium 235 ou de plutonium 239.

La source de chaleur chauffe un fluide (souvent de l'eau) qui passe de l'état liquide à l'état gazeux (vapeur par exemple), gaz qui entraîne une turbine accouplée à un alternateur qui transforme l'énergie cinétique de la turbine en énergie électrique [20].

II.2.2.2 Les centrales nucléaires :

Une centrale nucléaire est un site industriel utilisant la fission de noyaux atomiques pour produire de la chaleur, dont une partie est transformée en électricité (entre 30 % et 40 % en fonction de la différence de température entre la source froide et chaude). C'est la principale mise en œuvre de l'énergie nucléaire dans le domaine civil.

Une centrale nucléaire est constituée d'un ou plusieurs réacteurs nucléaires dont la puissance électrique varie de quelques mégawatts à plus de 1 500 mégawatts pour le réacteur soviétique de grande puissance RBMK. Selon les promoteurs du futur réacteur européen EPR, il devrait atteindre une puissance record de 1 600 mégawatts. [20]

➤ Description :

Une centrale nucléaire regroupe l'ensemble des installations permettant la production d'électricité sur un site donné. Elle comprend fréquemment plusieurs tranches, identiques ou non ; chaque tranche correspond à un groupe d'installations conçues pour fournir une puissance électrique donnée (par exemple 900 MW, 1 300 MW ou 1 450 MW). Une tranche comprend généralement [23]:

- le bâtiment réacteur, généralement double enceinte étanche qui contient le réacteur nucléaire, les générateurs de vapeur (trois ou quatre selon la génération), un pressuriser qui a pour fonction de maintenir l'eau du circuit primaire à l'état liquide, le groupe motopompe primaire servant à faire circuler le fluide caloporteur (eau) et une partie du circuit d'eau secondaire et le circuit d'eau primaire, dont le rôle principal est d'assurer le transfert thermique entre le cœur du réacteur et les générateurs de vapeur ;
- le bâtiment salle des machines, qui contient principalement :
 - une ligne d'arbre comprenant les différents étages de la turbine à vapeur et l'alternateur.
 - le condenseur

- des bâtiments annexes qui contiennent notamment des installations diverses de circuits auxiliaires nécessaires au fonctionnement du réacteur nucléaire et à la maintenance, les tableaux électriques alimentant tous les auxiliaires et générateurs diesel de secours
- un aéroréfrigérant atmosphérique (la partie la plus visible d'une centrale nucléaire), ou simplement une station de pompage pour les tranches dont le refroidissement utilise l'eau de mer ou de rivière.

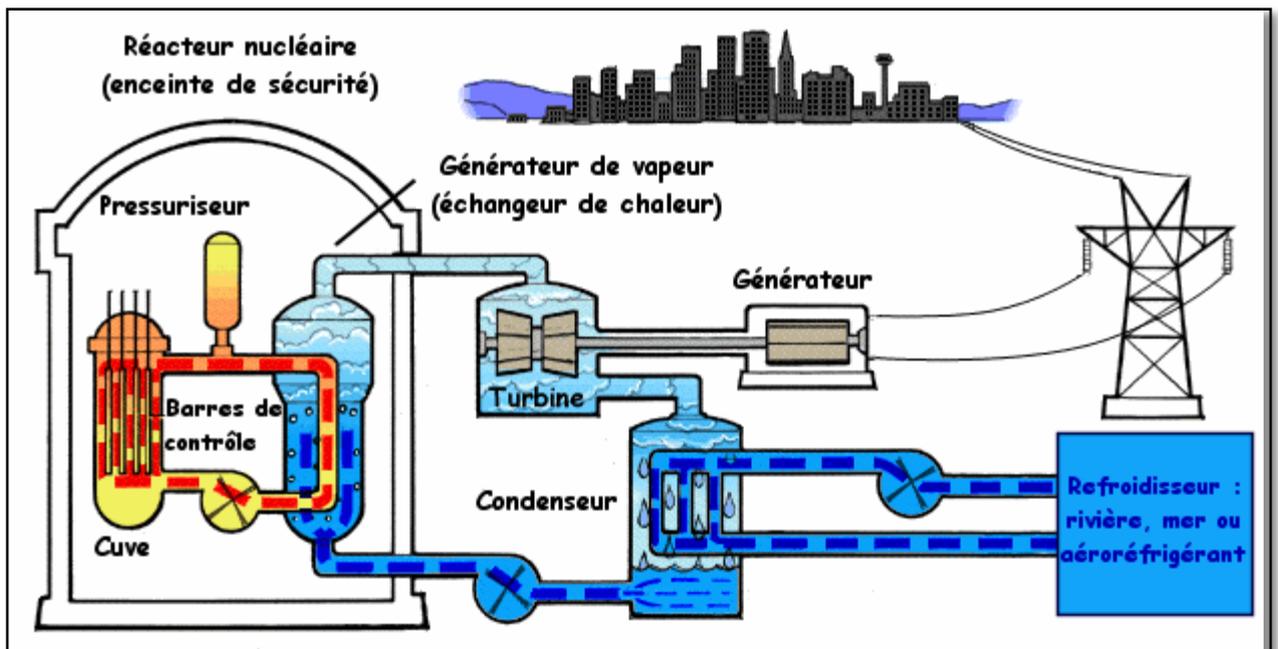


Figure II-1 : Centrale nucléaire

II.2.2.2.1 Les avantages et les inconvénients :

➤ Les avantages :

- production d'énergie en masse sur un espace restreint.
- production d'énergie ne libérant que très peu de gaz carbonique, et autre gaz ou polluant atmosphérique.
- possibilité facilement accessible d'indépendance et/ou autosuffisance énergétique pour les états non-pourvu de réserve de carburants fossiles (mais dépendance vis-vis des états possédants des mines de carburant nucléaire, le but étant alors d'avoir le plus de fournisseurs possible pour réduire les risques liés à cette dépendance).

- production de produits radioactifs à caractère médical (donc, médecine nucléaire possible).
- **Les inconvénients :**
- Déchets ultimes hautement toxique d'une durée de vie beaucoup plus longue que nos capacités à les "sécuriser".
- les technologies liées au nucléaire civil peuvent facilement être détournée à des fins militaires.

II.2.2. 3 Les centrales thermiques à flamme :

Une centrale thermique à flamme utilise l'énergie fournie par la combustion d'un combustible (charbon, pétrole, gaz naturel, gaz issus de hauts-fourneaux). Cette combustion a lieu dans une chaudière. La combustion dégage une grande quantité de chaleur utilisée pour chauffer de l'eau dans la chaudière (ou générateur de vapeur). On dispose alors de vapeur d'eau sous pression.

Cette vapeur sous pression fait tourner à grande vitesse une turbine qui entraîne elle-même un alternateur qui produit une tension alternative sinusoïdale. A la sortie de la turbine la vapeur est refroidie pour se transformer en eau, puis renvoyée dans la chaudière.

Le refroidissement de la vapeur issue de la turbine est confié à une réserve d'eau (cours d'eau) ou plus rarement à une tour de refroidissement analogue à celle d'une centrale nucléaire.

Une centrale thermique à flamme fournit une puissance électrique de l'ordre de quelques centaines de mégawatts [23].

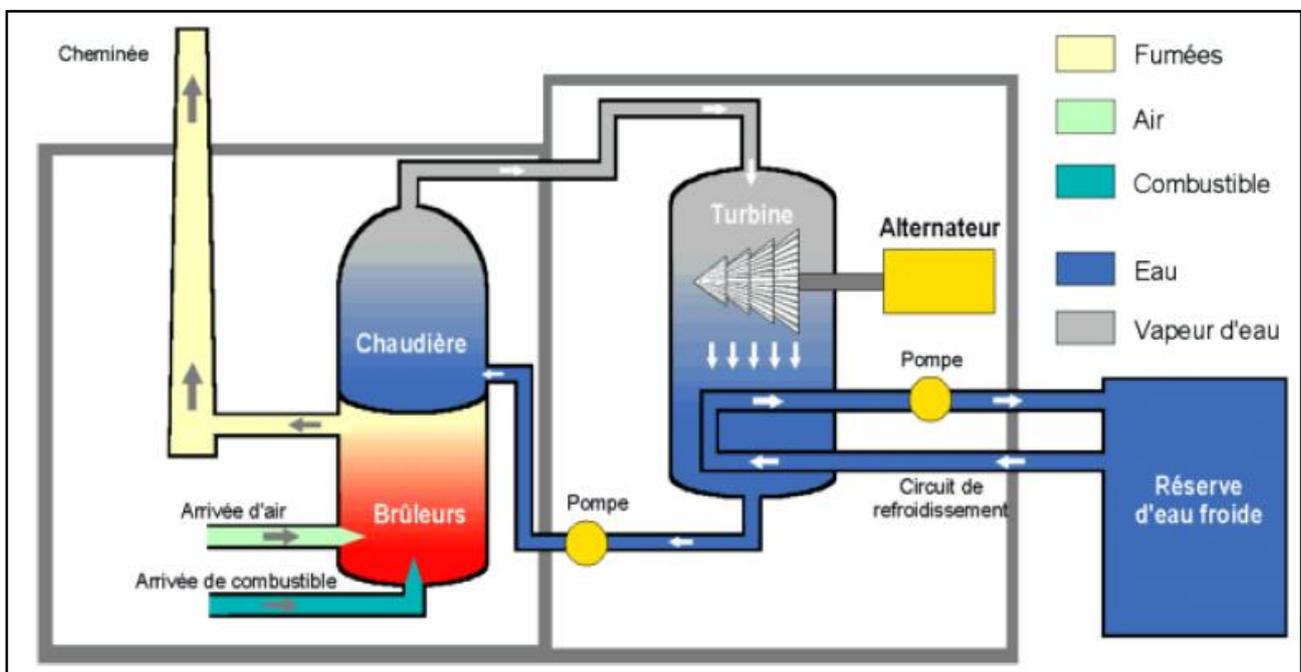


Figure II-2 : Centrale thermiques à flamme

II.2.2.4 Les centrales hydraulique :

Jusqu'à la Révolution Industrielle, le bois et la force animale fournissaient l'essentiel de l'énergie utilisée par l'homme. Mais, utilisée depuis longtemps pour entraîner des machines, l'énergie hydraulique fournissait la plus grande partie de l'énergie mécanique. Aujourd'hui, l'énergie hydraulique représente 6 à 7 % de l'énergie consommée mondialement, mais près de 20 % de l'électricité.

L'eau accumulée dans les barrages ou dérivées par les prises d'eau, constitue une énergie potentielle disponible pour entraîner en rotation la turbine d'une génératrice. L'énergie hydraulique se transforme alors en énergie mécanique. Cette turbine accouplée mécaniquement à un alternateur l'entraîne en rotation afin de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique.

La puissance disponible résulte de la conjonction de deux facteurs :

- hauteur de la chute,
- débit de la chute.

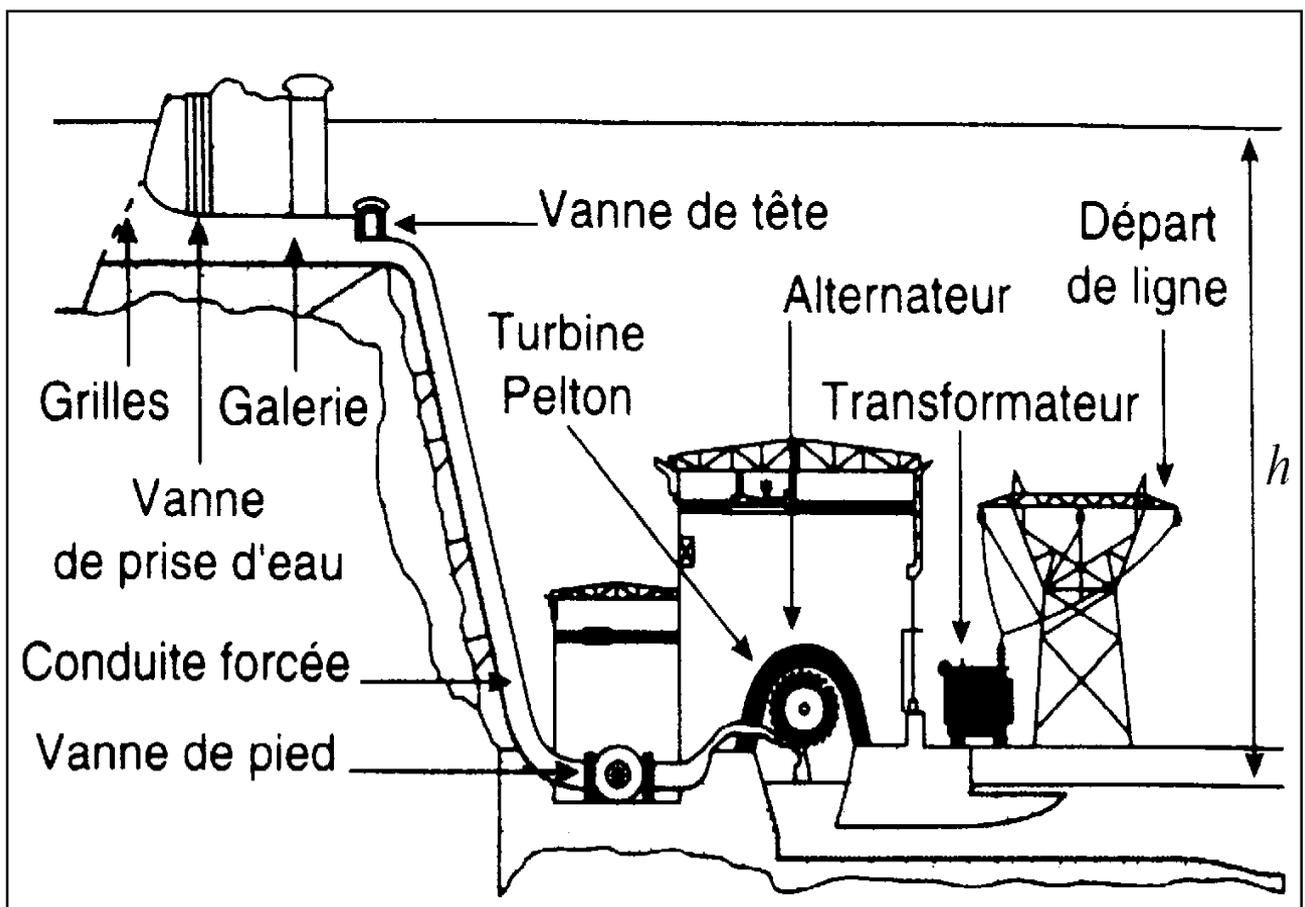


Figure II-3 : Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique

II.3 La production décentralisée :

II.3.1 Introduction :

Traditionnellement, le renforcement du système de production électrique se fait par l'insertion de nouvelles unités de production centralisée au réseau de transport, Au cours de ces dernières années, la tendance de libération du marché de l'électricité a favorisée l'apparition de nombreux producteurs dans les réseaux électriques. [10]

On appelle ces nouveaux producteurs par plusieurs noms comme production décentralisée, production distribuée, génération d'énergie distribuée ou génération d'énergie dispersée (GED).

II.3.2 Définition :

La production décentralisée est la production d'énergie électrique à l'aide d'installations de petite capacité raccordées aux réseaux électriques à des niveaux de tension peu élevée basse ou moyenne tension. [11]

Les unités décentralisées sont caractérisées par des puissances ne dépassant pas 50 à 100MW, ne sont pas planifiées de manière centralisées, ni actuellement coordonnées, elles sont généralement raccordées aux réseaux de distribution (<15MW) et ne sont pas actuellement destinées à assumer des services systèmes. [12].

Cette production décentralisée se développe dans tous les pays sur base d'unités de cogénération, d'énergie renouvelables ou de production traditionnelle par des producteurs indépendants. [12]

II.3.3 Différents types de production décentralisée :

II.3.3.1 Les sources classiques :

II.3.3.1.1 Les unités de secours : [11]

- les turbines à combustion (puissance sur le marché de 25KW a 200MW).

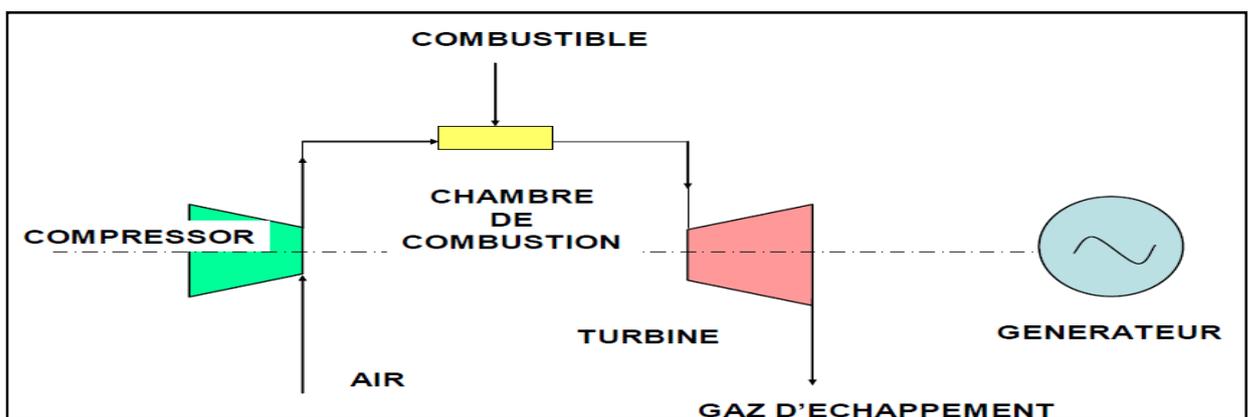


Figure II-4 : Schéma de fonctionnement d'une turbine

➤ **Les micro-turbines à combustion (de 30 à 250KW) :**

Les niveaux de puissances disponibles dans le marché oscillent entre 30 et 250 kW. Ces micro-turbines ont l'avantage de travailler avec différents types de combustibles. Ces générateurs ont été conçus pour les utilisations commerciales de la cogénération. L'interface avec le réseau est normalement réalisée avec des étages d'Electronique de Puissance (convertisseurs AC/DC/AC). Ces convertisseurs adaptent la vitesse des turbines à la fréquence du réseau. Le niveau de tension de raccordement est usuellement de 400 V.

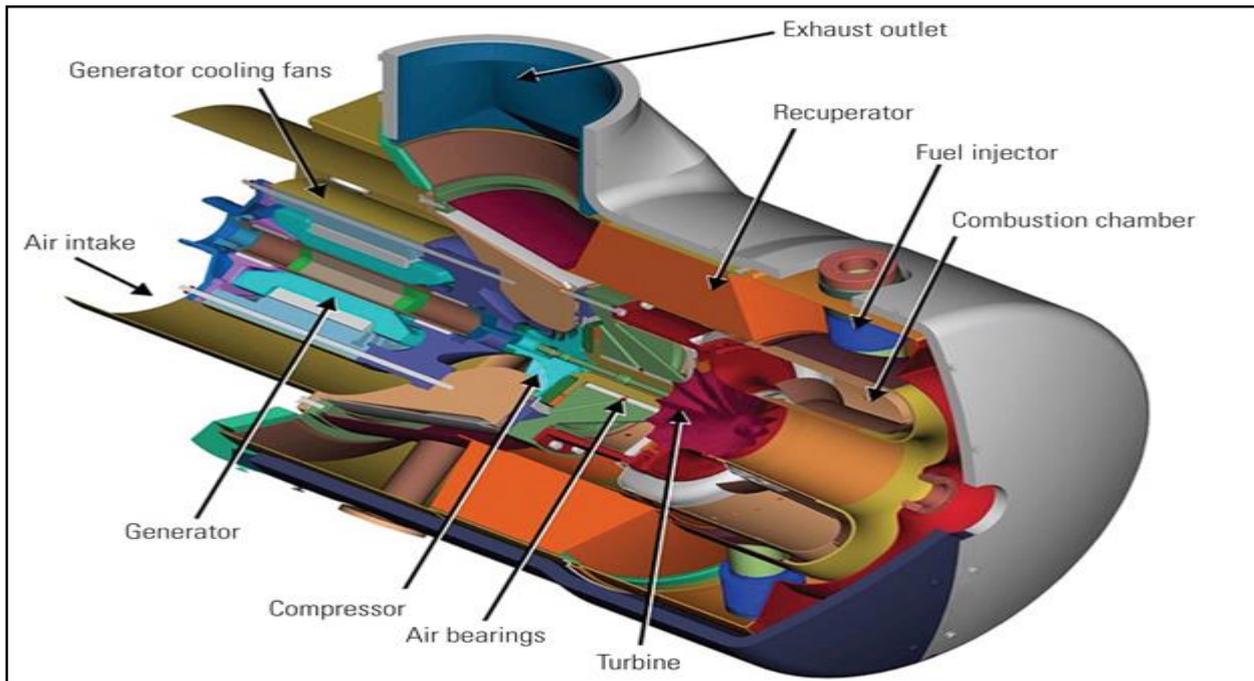


Figure II-5 : La micro-turbine

➤ **Les moteurs à gaz (de 5KW a 5MW) :**

Ils sont destinés à la cogénération. Leur niveau de puissance varie de 5 kW à 5 MW. L'utilisation première de ce type de moteur est l'unité de secours ; mais la tendance aujourd'hui est son utilisation dans la cogénération. Le niveau de tension d'insertion est de 400 V avec un rendement électrique de 25-30% et de 90% pour la cogénération



Figure II-6 : Générateur à gaz de la biomasse 2000kw

➤ **Les moteurs diesel (de 100KW a 25MW) :**

Le gabarit des puissances varie de 100 kW à 25 MW. Ils sont normalement utilisés dans la cogénération et comme groupes de secours. Le rendement électrique est d'environ 35 %. L'intégration dans le réseau se fait au niveau de la HTA ou la BT. Le moteur Diesel est relié avec une génératrice (asynchrone, synchrone ou à une machine à courant continu).



Figure II-7 : Les moteurs diesel de la centrale de Tamanrasset (5MW)

➤ **Les moteurs Stirling (de 5 à 50KW) :**

L'intervalle de puissance va de 5 à 50 kW. Il est possible de produire de l'énergie à partir de combustibles fossiles, biomasse, entre autres. Ils sont aussi employés dans la cogénération. Les moteurs qui peuvent travailler à une vitesse constante sont directement couplés au réseau via une génératrice synchrone.



Figure II-8 : Gros moteur Stirling solaire auto (50 KW)

II.3.3.1.2 La cogénération : [14]

La cogénération électricité – chaleur est une technique permettant de récupérer la chaleur produite par toute microcentrale électrique proche de bâtiments et fonctionnant à haute température, qu'il s'agisse de centrales thermiques classiques ou de certains types de piles à combustible. Le rendement énergétique global d'une telle installation peut atteindre 90% et l'utilisation locale de la chaleur produite permet d'éviter une consommation supplémentaire d'énergie pour le chauffage des bâtiments.

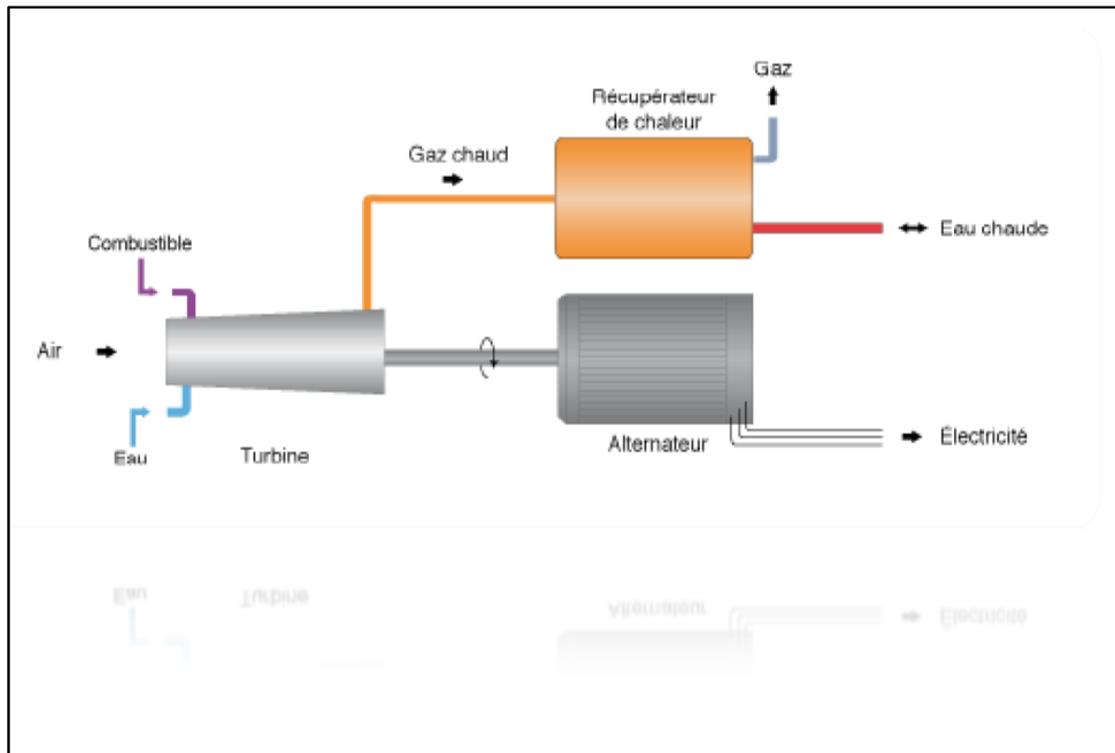


Figure II-9 : Principe de fonctionnement de la cogénération.

II.3.3.2 Les sources nouvelles et renouvelables :

II.3. 3.2.1 L'énergie éolien:

Ce mode transmet l'énergie cinétique du vent à l'énergie électrique grâce aux turbines aérogénérateurs. Deux technologies utilisées principalement sont les générateurs synchrones et asynchrones. En fonction de la technologie choisie, leur raccordement au réseau se fait soit directement, soit via des interfaces d'électronique de puissance. En tenant compte de l'intermittence de ce type d'énergie, les turbines éoliennes sont normalement associées avec un système de stockage d'énergie et/ou avec un moteur diesel. Il existe également deux possibilités d'installation des parcs éoliennes: éolien en mer et éolien sur terre dont les installations en mer comportent une capacité très importante. La puissance d'un parc éolien varie de quelques Mégawatts à quelques centaines de Mégawatts. [15]

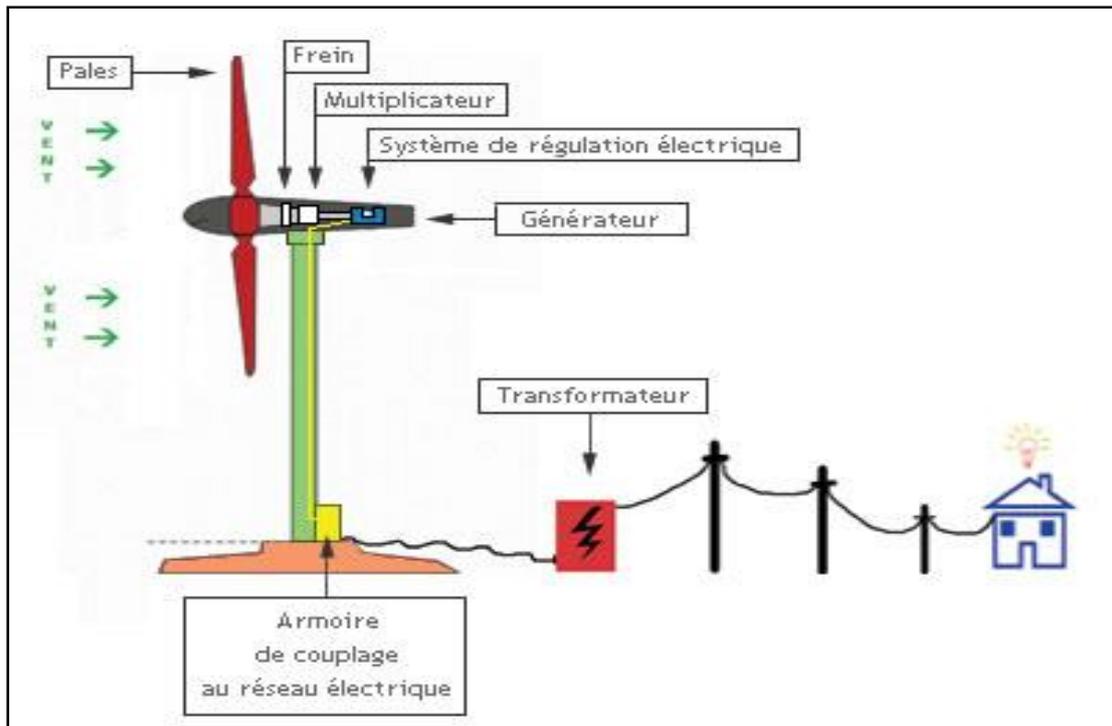


Figure II-10 : Principe de fonctionnement d'éolienne

II.3. 3.2.2 L'énergie hydraulique:

Les centrales hydrauliques fonctionnent grâce à l'énergie potentielle de pesanteur de l'eau des rivières, des lacs ou des fleuves. Celle-ci est transformée en énergie électrique par un alternateur entraîné par une turbine mue par la force de l'eau qui est due soit à la hauteur de chute de centrales alimentées par une conduite forcée ,soit au débit dans le cas de centrale au fil de l'eau.[17]



Figure II-11 : Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique

II.3. 3.2.3 L'énergie géothermique:

Les centrales géothermiques utilisent la chaleur de nappes d'eau souterraines qui peuvent atteindre 350 C° dans les zones les plus favorables, Cette eau chaude est pompée vers la surface pour passer dans des échangeurs, la vapeur produite est turbinée dans une installation thermique classique. [14]

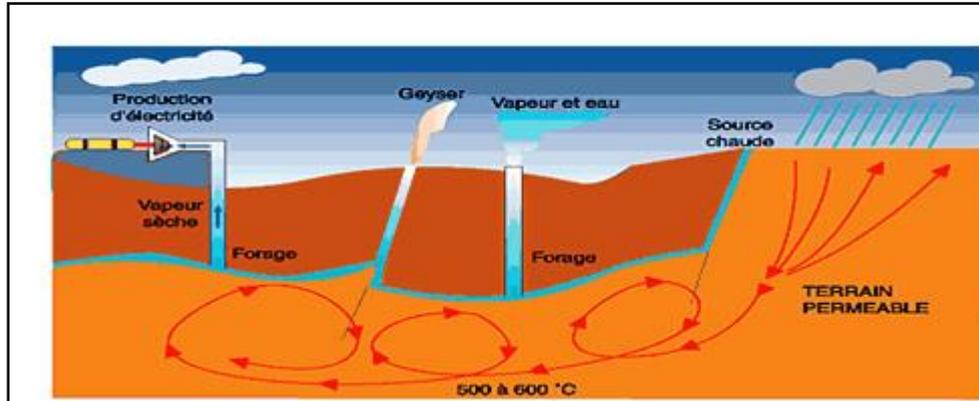


Figure II-12 : Centrale géothermique

II.3. 3.2.4 L'énergie solaire thermique :

Les centrales solaires thermiques sont des centrales thermiques utilisant des turbines à vapeur, Celle-ci étant produite par chauffage de l'eau via un fluide caloporteur en utilisant le rayonnement solaire concentré sur un échangeur par des miroirs paraboliques.[15]

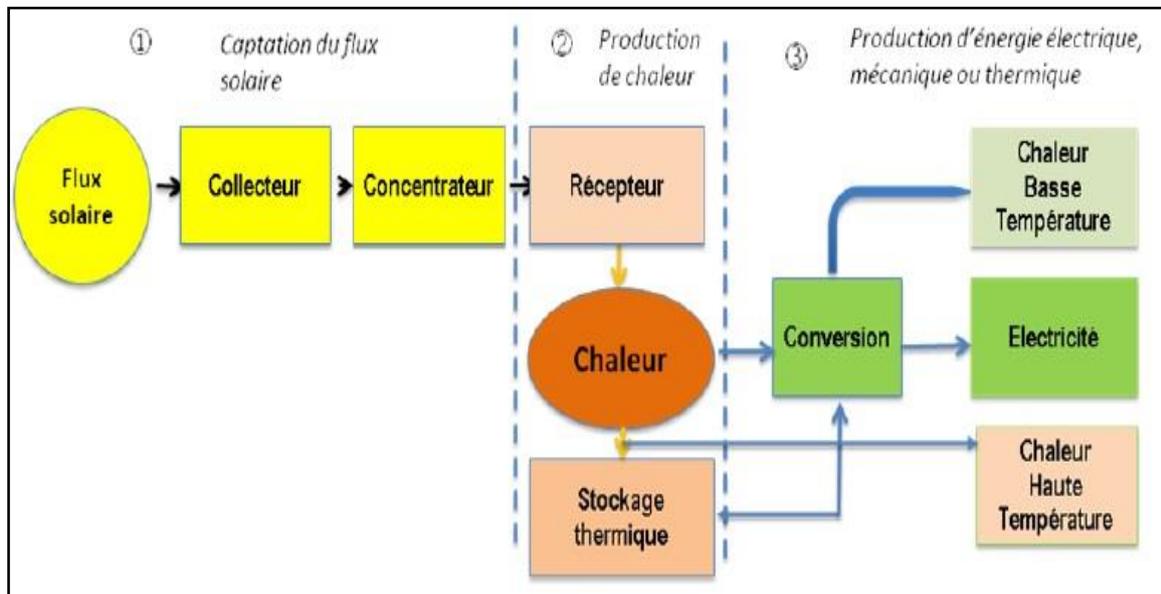


Figure II-13 : Centrale solaire thermique

II.3. 3.2.5 L'énergie solaire photovoltaïque:

Les panneaux solaires convertissent directement l'énergie reçue par rayonnement solaire en énergie électrique à courant continu, ils sont très utilisés pour l'alimentation du site isolé (non connecté aux réseaux) en association avec un système de stockage. [14]



Figure II-14 : Centrale solaire photovoltaïque

II.3. 3.2.6 L'énergie biomasse:

Certaines centrales thermiques à flamme utilisent comme source primaire des combustibles issus de la biomasse (bois, biogaz, paille, déchets organiques, etc.) ou de déchets industriels et domestiques. [15]

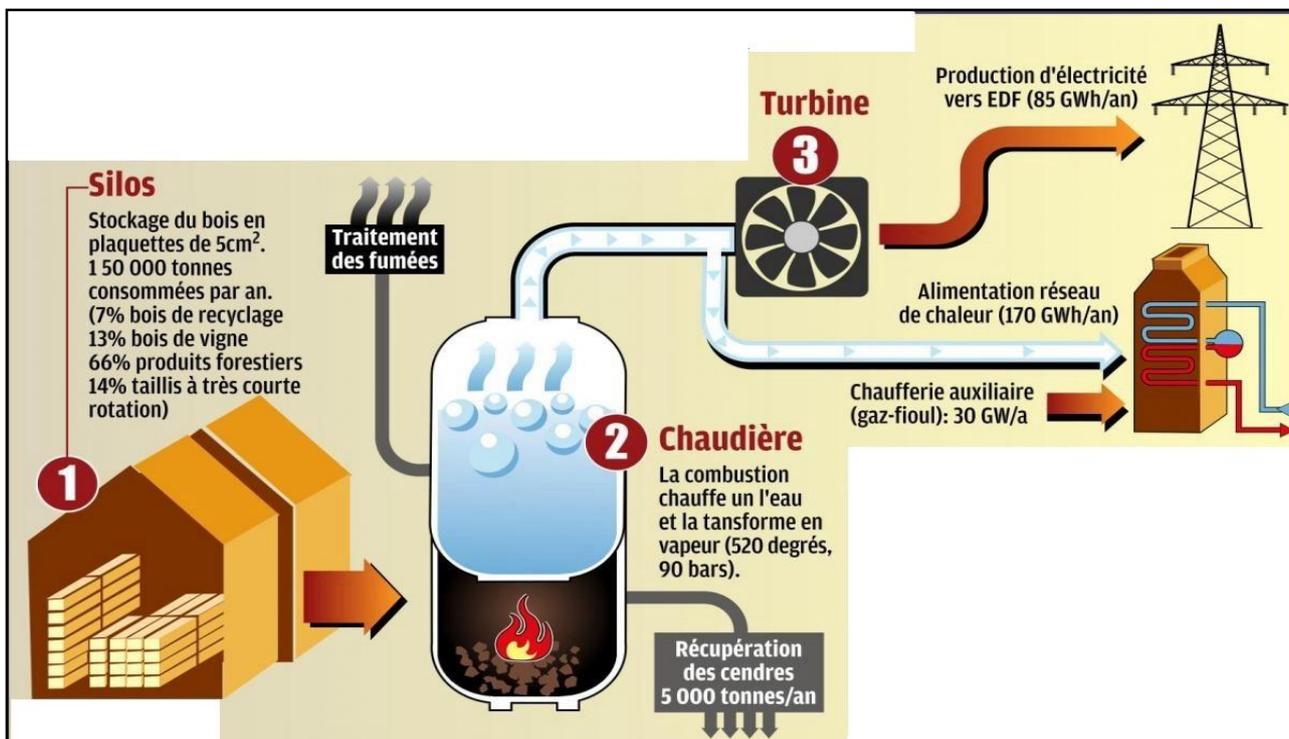


Figure II-15 : Fonctionnement de centrale biomasse

II.3.4 Les avantages de la production décentralisée : [16]

Les avantages de l'insertion des GED dans le système électrique sont à rappeler, parmi lesquels :

- **L'aspect environnemental** : les productions basées sur les énergies nouvelles et renouvelables sont moins polluantes que celles à base de l'énergie fossile et nucléaire. C'est pour cette raison qu'actuellement, l'aspect environnemental représente un avantage des GED de petite et moyenne puissance
- **Le temps de construction des installations** : Pour les installations de production centralisée il faut compter de 7 à 10 ans, voire plus dans le cas de construction des grandes centrales hydroélectriques ou nucléaires. Par contre, un projet d'installation de production décentralisée peut être assez court (jusqu'à moins de 6 mois).
- **Le coût d'installation et d'entretien** : Pour les grandes productions centralisées, en dehors des coûts importants liés à la construction propre de l'installation, il faut compter aussi le surcoût lié à des infrastructures spécialement construites nécessaires pour les travaux (les routes, les lignes dédiées, etc.). Par contre, le coût d'un projet de production décentralisée peut être accessible à des petites entreprises, ce qui favorise la diversité dans la production électrique et active la compétition.
- **La réponse rapide à l'évolution de consommations locales**: Les productions décentralisées de type conventionnel peuvent être placées là où il y a un besoin d'énergie. Leurs applications dans la cogénération permettent de satisfaire à la fois la demande d'électricité et de thermique. Elles permettent de réduire les pertes, et éventuellement, de retarder les investissements pour renforcer les infrastructures du réseau.
- **Le prix des énergies primaires** : Sur ce point, les productions décentralisées à base d'énergies nouvelles et renouvelables prennent l'avantage devant les productions à base d'énergie fossile. Surtout, si on considère le prix de l'énergie fossile dans le contexte actuel où il y a une menace d'épuisement de ce type d'énergie et une augmentation incessante du prix de pétrole au cours de ces dernières années.
- **L'aspect opérationnel** : comme les productions décentralisées sont souvent de capacité petite et moyenne, elles sont beaucoup plus dynamiques et rapides pour mettre en service l'énergie au réseau. Grâce à ces avantages attractifs économiquement et énergétiquement, on espère que dans le futur les GED seront les alternatives des grands producteurs centralisés.

II.3.5 Impacts de la Production Décentralisée :

La production décentralisée peut occasionner quelques impacts sur le système électrique. Ces impacts peuvent être classés en deux groupes : les impacts sur la distribution et les impacts sur le transport.

II.3.5.1 Impacts de la production décentralisée sur le réseau de distribution :

On trouve dans la littérature plusieurs études qui ont été faites afin d'identifier et d'évaluer les impacts de la production décentralisée sur le réseau, puis, de proposer des solutions adaptées. L'opérateur du réseau se préoccupe de ce type d'étude lors de la phase de planification ou de l'approbation d'un projet de raccordement des GED. Les principaux impacts à rappeler sont les suivants :

- **Impacts sur le sens de transit de puissance :**

Les réseaux sont dimensionnés pour recevoir les flux d'énergie du réseau de transport vers la distribution. L'insertion des GED dans les niveaux de tension autres que le réseau de transport peut créer une injection de puissance dans le sens contraire, c'est-à-dire de la distribution vers le transport. Les équipements, notamment les protections doivent alors être bidirectionnelles. [17], Ainsi, sachant que les réseaux aux niveaux de tension inférieure sont normalement surdimensionnés afin de faire face à l'accroissement de consommation, on n'aura peut-être pas, à court terme, de problèmes liés à des limites de la capacité de transfert d'énergie ; mais à plus long terme, lorsque le taux de pénétration de GED augmentera, la modification du sens de transit de puissance pourra éventuellement provoquer des congestions locales. [18]

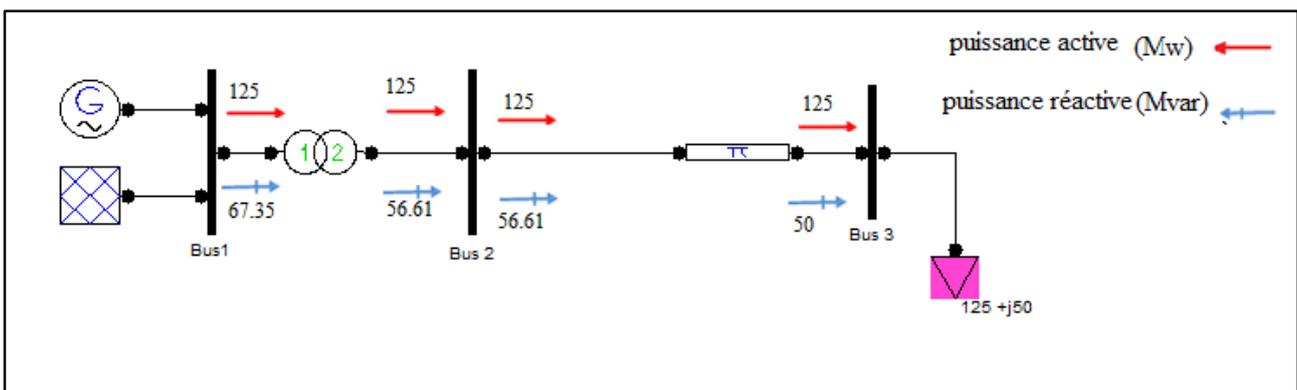


Figure II-16 : transit de puissance d'un réseau avant raccordement de GED

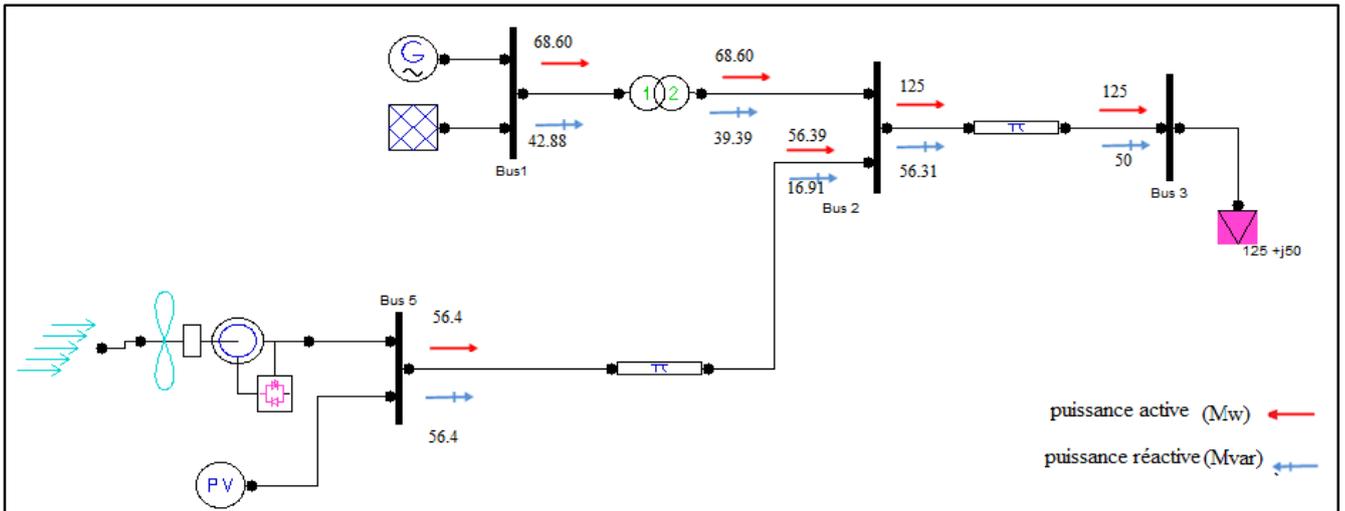


Figure II-17 : transit de puissance d'un réseau après raccordement de GED

- **Impacts sur le profil de tension :**

On sait que les nœuds proches d'une source ont une tension plus élevée, la tension diminuant au fur et à mesure que l'on s'en éloigne. La connexion de sources de GED à proximité des charges modifiera donc naturellement le profil de tension sur le réseau. [16]

- **Impacts sur la stabilité du système :**

Les génératrices de productions décentralisées peuvent être de type synchrone ou asynchrone. L'insertion de générateurs synchrones dans le réseau va changer le temps critique d'élimination de défaut (correspondant à la durée maximale d'une perturbation à laquelle le système peut résister sans perte de stabilité). Ceci influencera directement la limite de la stabilité dynamique du système en considération. [20]

- **Impacts sur le plan de protection :**

La connexion de nouveaux générateurs au réseau modifiera également les courants de court-circuit et donc le réglage des seuils des protections. D'ailleurs, ce changement peut provoquer une mauvaise sélectivité, des déclenchements intempestifs ou l'aveuglement du système de protection. [17]

- **Impacts sur l'observabilité et de contrôlabilité du système :**

Les GED, notamment celles à type énergie nouvelle et renouvelable, sont caractérisées par l'intermittence des sources primaires. Cela sera difficile pour l'opérateur d'estimer la puissance de sortie de ces producteurs, donc la puissance fournie du système, par conséquent. [17]

- **Impacts sur la continuité de service:**

Pour la même raison concernant la caractéristique d'intermittence, l'indisponibilité des GED lors que le système les sollicite peut occasionner la rupture d'électricité par manque de puissance. [16]

- **Impacts sur la qualité de service :**

Les GED de type asynchrone consomment de la puissance réactive afin de magnétiser leur circuit magnétique. Lors de la connexion au réseau, elles appellent un courant fort, ce qui contribue au creux de tension (en profondeur). D'ailleurs, la présence d'interfaces d'électronique de puissance peut faire augmenter le taux des harmoniques qui nuisent gravement à la qualité de service fournie. [16]

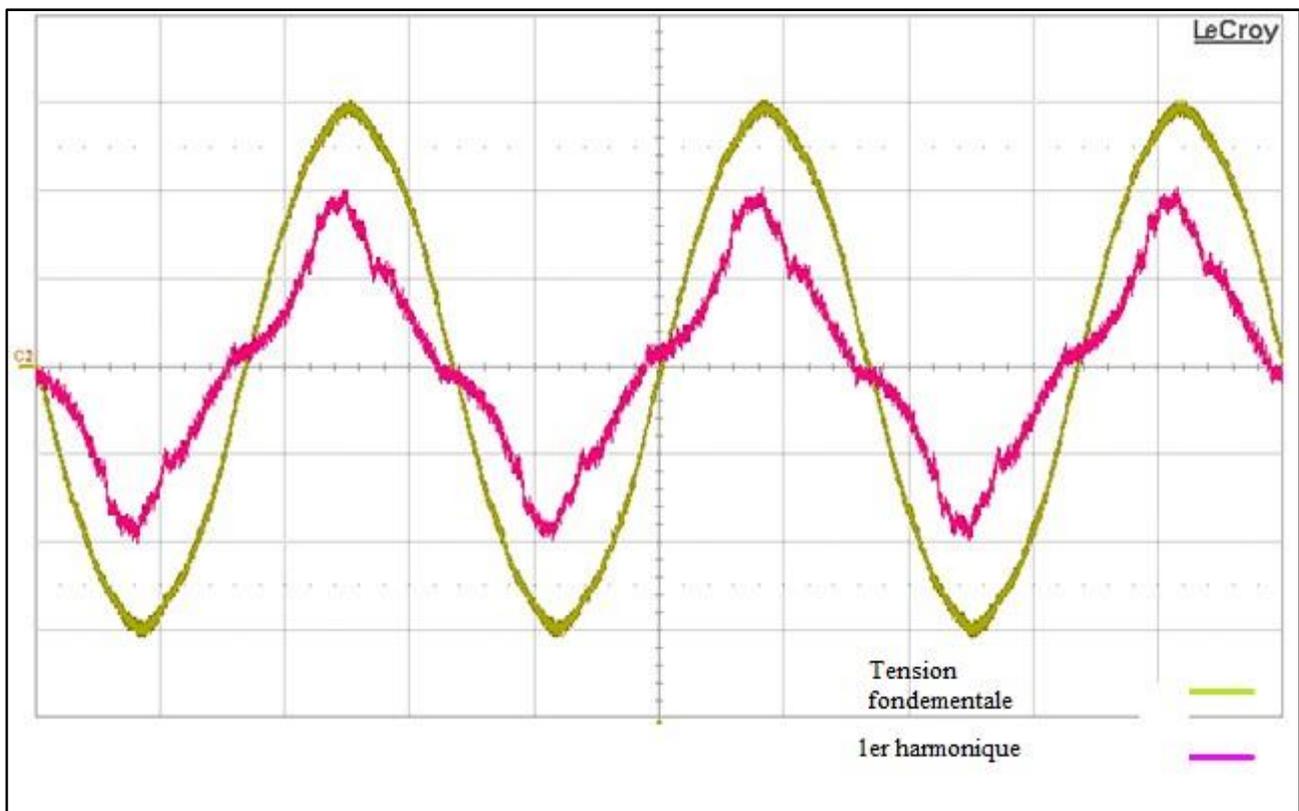


Figure II-18 : Impacts sur la qualité de service

II.3.5.2. Impacts de la production décentralisée sur le réseau de transport :

L'intérêt de l'étude des impacts de l'insertion massive de production décentralisée sur le réseau de transport est apparu récemment lorsque certaines technologies utilisées sont arrivées à une certaine maturité (le cas de l'éolien). Cependant, ce type d'étude devenait un véritable besoin notamment après des incidents majeurs qui se sont passés au cours des dernières années dans le monde (black-out en Italie en septembre 2003, par exemple où la stratégie d'exploitation inadéquate des GED a contribué

à des causes décisives de l'écroulement total du réseau. C'est pour cette raison que dans cette partie, différents impacts que la pénétration à grande échelle de production décentralisée peut provoquer sur réseau de transport seront analysés.

II.3.6. La Protection de la Production Décentralisée : [19]

Il existe trois types principaux de protection peuvent être énumérés : la protection de découplage, les protections des machines et les protections du réseau proprement dites.

- Les protections dans le réseau ont pour but l'élimination de défauts dans le réseau, c'est-à-dire la protection des biens et des personnes. Cette tâche est normalement réalisée par des mesures du courant (et mesures de la tension homopolaire).
- La protection entre le réseau et la production décentralisée (ou protection de découplage) est placée au point de raccordement de la production décentralisée et du réseau. Le but de cette protection est de protéger les générateurs d'un mauvais état de fonctionnement dans le réseau, ou, les personnes chargées de la réparation du réseau. Ainsi, lorsqu'un tronçon est déconnecté, il faut éviter que les producteurs décentralisés n'électrocutent les agents responsables de la maintenance ou de la réparation.

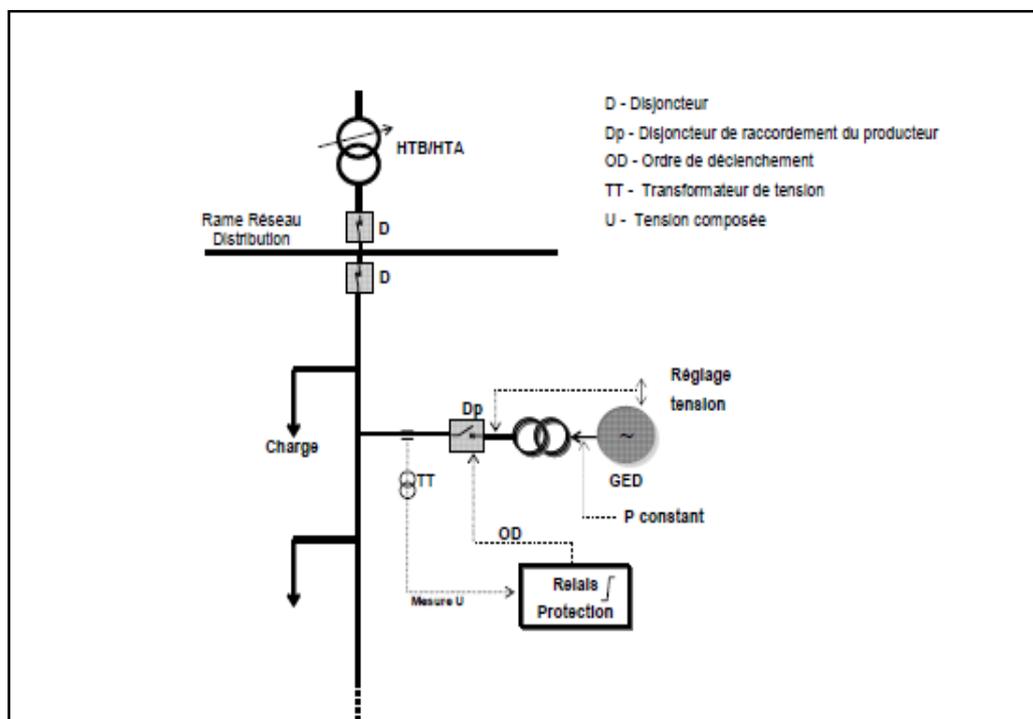


Figure II-19 : Protection de découplage dans le réseau de distribution 30 KV

II.4. Conclusion :

Dans le présent chapitre nous avons présenté un aperçu sur la production centralisée, décentralisée et les différentes technologies pour la production. Ainsi les avantages et l'impact de production décentralisée sur le système électrique.

Ce chapitre expose une vision sur la production décentralisée ainsi que ses intérêts qui justifient le développement de ce type de production, parmi lesquelles nous relevons les suivantes:

- La production d'énergie plus près des consommateurs permet de réduire les pertes dans les lignes.
- La substitution de l'énergie conventionnelle « polluante » (produite par les grandes Centrales nucléaires et thermiques) par des énergies nouvelles « propres ».
- Le coût d'un projet de production décentralisée peut être accessible à des petites entreprises, ce qui favorise la diversité dans la production électrique et active la compétition

III.1 Introduction :

Le raccordement aux réseaux électrique (HTA) d'unités de production décentralisées doit respecter certaines contraintes techniques et impose généralement des aménagements dans le réseau pour assurer un fonctionnement correct de ce dernier, en particulier dans les réseaux qui n'ont pas été à l'origine conçus et développés pour accueillir des unités de production. Des précautions quant à l'insertion de GED sur les départs de réseaux électrique sont ainsi à prévoir par des règles de raccordement afin de conserver le bon déroulement du fonctionnement du réseau. Ces règles sont des prescriptions techniques de conception et de fonctionnement : la protection, la puissance d'installation, la perturbation et la fréquence, tension.... [21]

Ces règles, actuellement en vigueur, sont prévues pour garantir le bon fonctionnement du réseau tel qu'il est actuellement. Si les réseaux (HTA) évoluent vers d'autres architectures et d'autres modes d'exploitation, ces règles sont susceptibles d'être modifiées.

III.2 Intégration de la GED sur les réseaux :

III.2.1 Étude de raccordement d'une installation :

Les différentes étapes de l'étude de raccordement ont pour objet de concourir à la détermination des ouvrages à établir ou à modifier pour assurer une desserte dans des conditions techniques et économiques optimales. Chacun des domaines d'interaction du site avec le réseau ou les autres utilisateurs est exploré et le dimensionnement du raccordement projeté doit assurer le maintien du réseau existant et futur dans un domaine de fonctionnement acceptable. [32]

Pour les utilisateurs producteurs, les vérifications complémentaires suivantes sont à effectuer :

- Vérification de la tenue de la tension au poste source : risque de butée régulateur,
- Modification des comptages au poste source,
- Vérification de la tenue des matériels aux courants de court-circuit supplémentaires apportés par l'installation de production,
- Vérification du fonctionnement du plan de protection contre les défauts entre phases du réseau HTA et du poste de livraison,
- Choix de la protection de découplage,
- Évaluation de la nécessité d'installation d'un dispositif d'échange d'informations d'exploitation.

III.3 La centrale éolienne :

L'énergie éolienne est l'une des plus importantes et prometteuses sources d'énergie renouvelable à travers le monde, principalement parce qu'on la considère non polluante et économiquement viable. En même temps, il y a eu un développement rapide relatif à la technologie des turbines de vent [22].

Généralement, les turbines éoliennes peuvent fonctionner à vitesse fixe ou à vitesse variable. Pour une vitesse fixe, le générateur est directement relié au réseau électrique. La vitesse de rotor de la vitesse fixe en principe est déterminée par la boîte de vitesse et le nombre de paires de pôle du générateur. Un empêchement de la vitesse fixe est que sa qualité de puissance est pauvre. Pour une vitesse variable équipée d'un convertisseur connecté au stator du générateur, le générateur peut être un générateur d'induction de barre de camp, générateur synchrone ou générateur synchrone à un aimant permanent [23].

Les turbines utilisent le générateur d'induction à double alimentation (MADA) sont dominants, dues à son opération à vitesse variable, au contrôle séparé de la puissance active et réactive, et à son convertisseur de puissance partiellement évaluée [24].

III.3.1 Principe de conversion :

Un système éolien, quel que soit sa technologie, convertit l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

- La conversion d'une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique ; cette conversion se fait au niveau de la turbine.
- La conversion de cette énergie mécanique en énergie électrique au niveau de la génératrice.

Suivant la technologie utilisée, la transmission de l'énergie électrique au réseau se fait soit directement, soit par l'intermédiaire total ou partiel d'une interface d'électrique de puissance. [31]

Ce principe général de conversion est illustré figure.

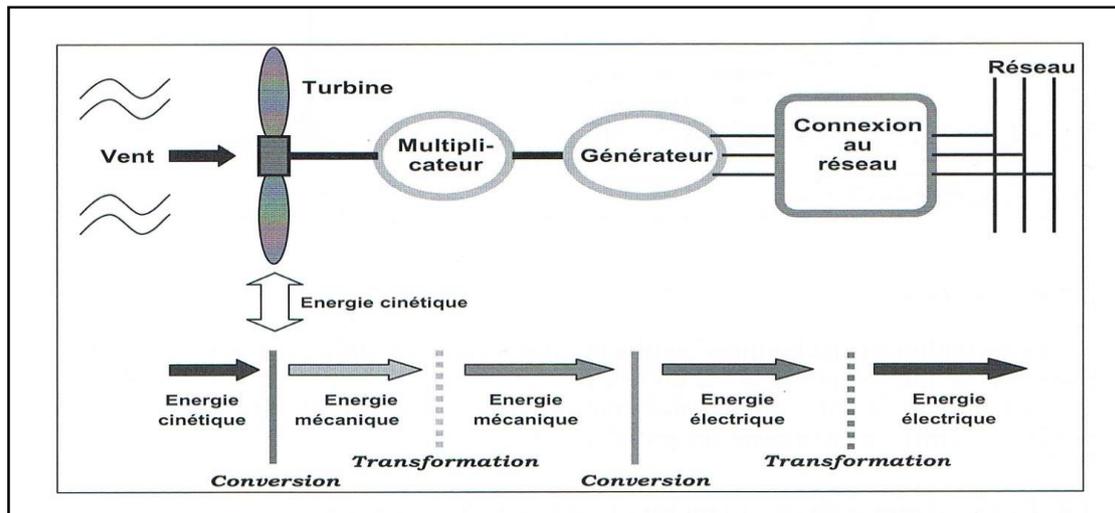


Figure III-1 : Principe de la conversion d'énergie

III.3.1.1 Connexion au réseau :

Un parc d'éoliennes comme celui montré à la Figure II-8, comprend plusieurs éoliennes (souvent installées en rangs perpendiculaires à la direction des vents dominants), des voies d'accès, des raccordements électriques ainsi qu'un poste de raccordement, un système de surveillance et de commande, et dans les parcs de grande envergure, un bâtiment d'entretien. Pour mener à bien un projet de centrale éolienne, il faut évaluer la ressource éolienne, obtenir toutes les approbations et les permis requis, assurer la conception de l'infrastructure civile, mécanique et électrique, exécuter les travaux d'implantation des éoliennes, acheter l'équipement, puis construire et mettre en service l'installation. La construction comporte plusieurs étapes : préparation du site, aménagement des voies d'accès, coulage des fondations des éoliennes, installation des câbles de raccordement électrique et des transformateurs, érection des éoliennes, du poste de raccordement et du bâtiment d'entretien. [33]

III.3.1.1.1 Condition de couplage et perturbations :

Le couplage de l'installation au réseau doit respecter des contraintes sur la fréquence, l'amplitude et la phase de la tension et ne doit pas affecter la stabilité du réseau.

Les perturbations produites par l'installation au point de raccordement doivent être limitées en ce qui concerne les à-coups de tension, les déséquilibres et les harmoniques. Un système de communication entre le producteur et le gestionnaire du réseau est à prévoir.



Figure III-2 : composants d'un parc d'éoliennes aux réseaux électrique

III.3.1.1.2 Stockage de l'énergie électrique :

Parmi toutes les énergies renouvelables contribuant à la production électrique, l'énergie éolienne tient actuellement le rôle de vedette. Elle est la source d'électricité qui croît le plus rapidement dans le monde.

Cependant, une caractéristique importante de l'énergie éolienne est la fluctuation de la puissance produite au fil du temps. Or, la stabilité du réseau repose sur l'équilibre entre production et consommation. Pour cela, l'idée de stockage a été exploitée. En effet, ce dernier représente la clé de pénétration de l'énergie éolienne dans un système électrique car il fournit non seulement une solution technique au gestionnaire du réseau pour assurer en temps réel l'équilibre production/consommation, mais il permet également d'exploiter au maximum les ressources d'énergies renouvelables en évitant le délestage.

Il existe à l'heure actuelle plusieurs méthodes de stockage d'énergie qui peuvent être classées en deux catégories [34] :

Le stockage à court terme : Pour cette catégorie, le temps de stockage est inférieur à 10 minutes. Ce type est utilisé pour lisser les fluctuations de puissance produite par la ferme éolienne et pour régler la tension et la fréquence du réseau (réglage primaire).

Le stockage à long terme : Le temps de stockage est supérieur à 10 minutes. Ce type est utilisé pour répondre aux pics d'appels de puissance aux heures de pointe du réseau électrique et en cas d'absence du vent.

De plus, il existe différents moyens de stockage à court terme et long terme. Les plus importants sont présentés dans tableaux 1 et 2 :

Tableau 1 : Moyens de stockage à court terme [35]

Moyens de stockage	Efficacité %
Volant d'inertie	70-80
Supraconducteur	80-95
Super condensateur	70-80

Tableau 2 : Moyens de stockage à long terme [35]

Moyens de stockage	Efficacité %
Pompage hydraulique	90-70
Compresseur d'air	40-50
Batterie	60-70

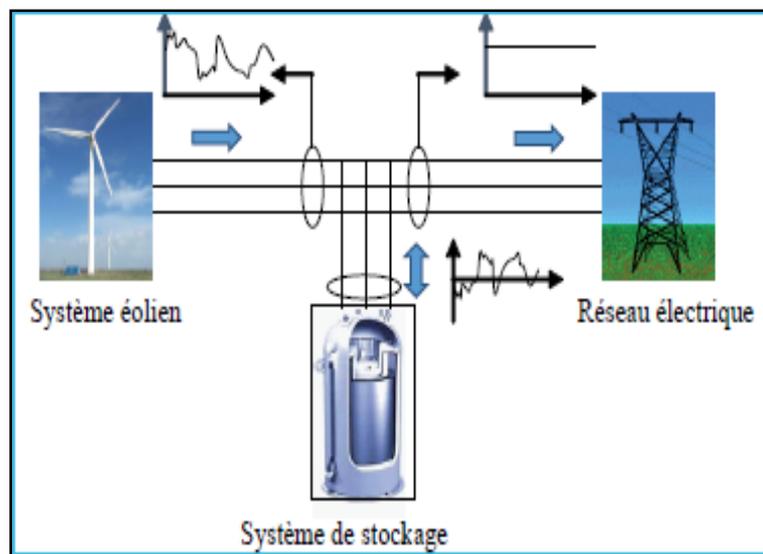


Figure III-3 : Système de stockage inertielle associé à l'énergie éolienne

III.3.1.1.2.1 Moyens de stockage à court terme :

➤ Volant d'inertie :

Les systèmes inertiels de stockage d'énergie (SISE) ont été redécouverts depuis quelques années. Un SISE comporte un volant d'inertie couplé à une machine électrique pouvant fonctionner dans deux régimes : moteur ou générateur. Les SISE ont des constantes des temps de quelques minutes jusqu'à plusieurs heures, en fonction de leur conception.

Les SISE sont trouvés une application spécifique dans le domaine d'amélioration de la qualité de l'énergie électrique, pour maintenir la fréquence et la tension du réseau dans les limites imposées par les règlements. En raison de leur dynamique élevée, de leur bon rendement et de leur longue période de vie, les SISE sont bien adaptés pour stocker l'énergie pendant des périodes courtes, ce qui suffit pour améliorer la qualité de l'énergie [34], [36].

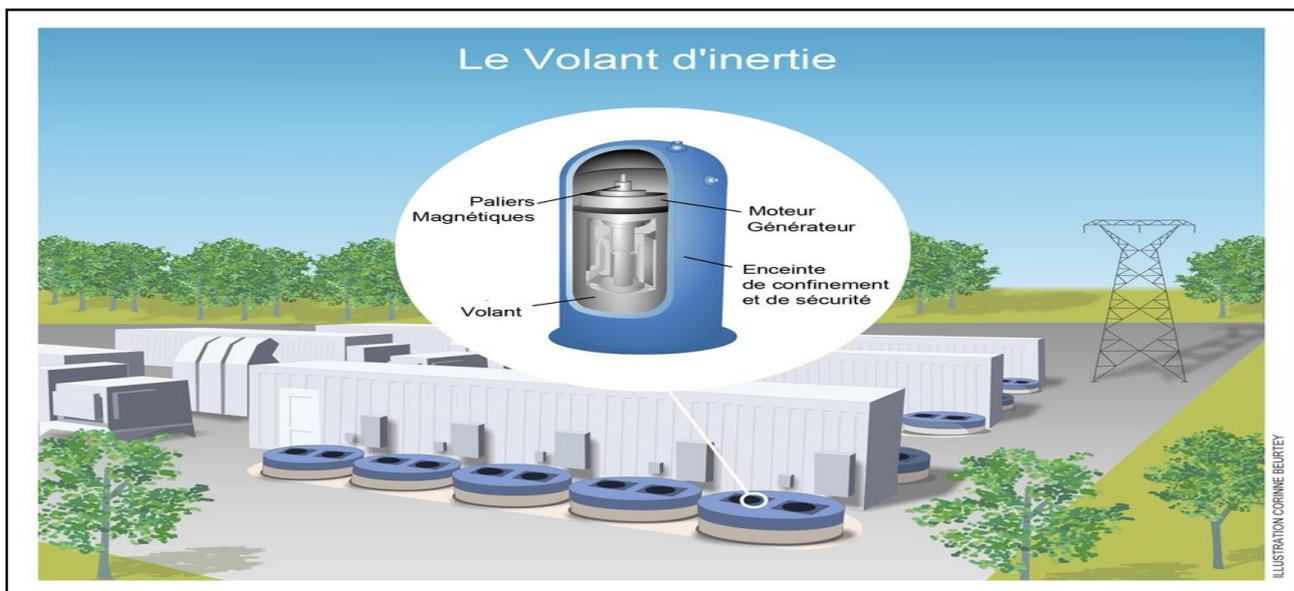


Figure III-4 : volant d'inertie

➤ Supraconducteur :

L'énergie peut être stockée sous forme d'énergie d'un champ magnétique créé par un courant circulant dans une bobine supraconductrice. Pour maintenir la bobine dans l'état supraconducteur, il faut l'introduire dans un cryostat rempli d'hélium liquide. Ces systèmes ont l'avantage d'une dynamique et d'une cyclabilité très élevées. Cependant, les coûts de fabrication et de maintenance sont très élevés et il y en a très peu des SMES en fonction.

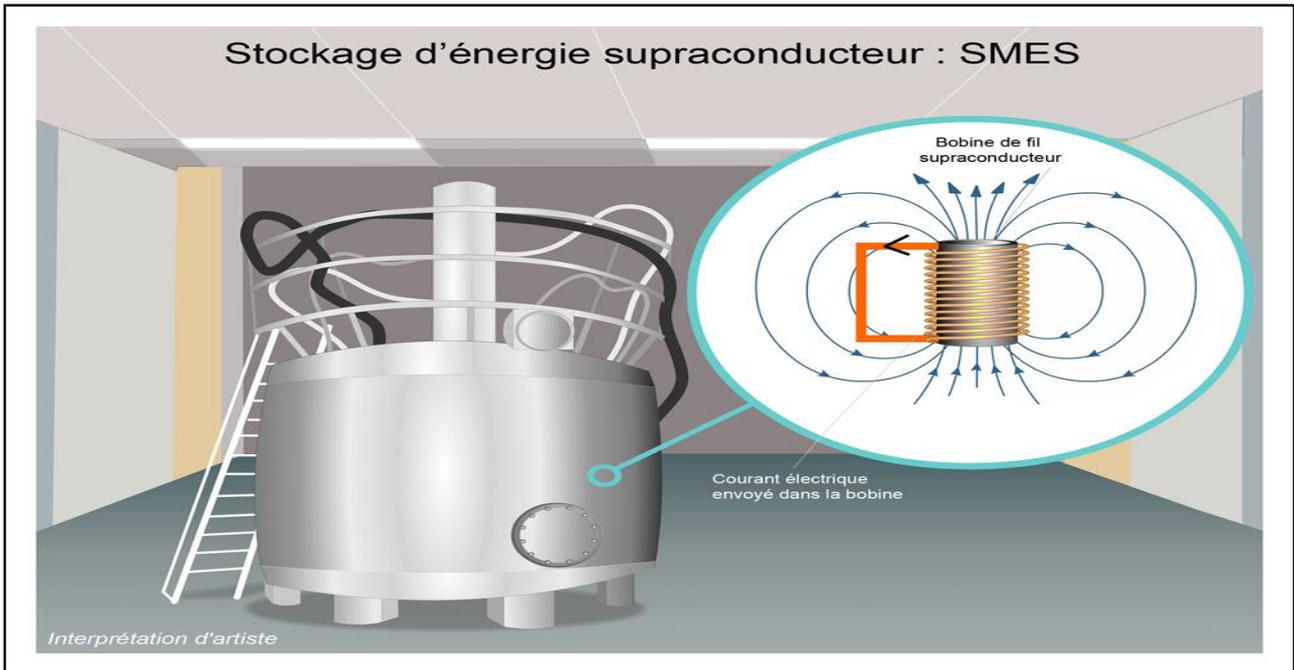


Figure III-5 : supraconducteur

➤ **Super condensateur :**

C'est la seule technologie où l'on peut parler vraiment du stockage d'électricité. Cependant, c'est une technique bien nouvelle qui se trouve encore en phase de recherche. En présent, on trouve fréquemment des super condensateurs dans les produits électroménagers, mais leurs puissances ne dépassent pas les 7-10W. Les recherches actuelles ont vu l'obtention de super condensateurs dont la puissance soit de l'ordre de dizaines ou même de centaines de KW, afin d'être utilisés dans des véhicules électriques.

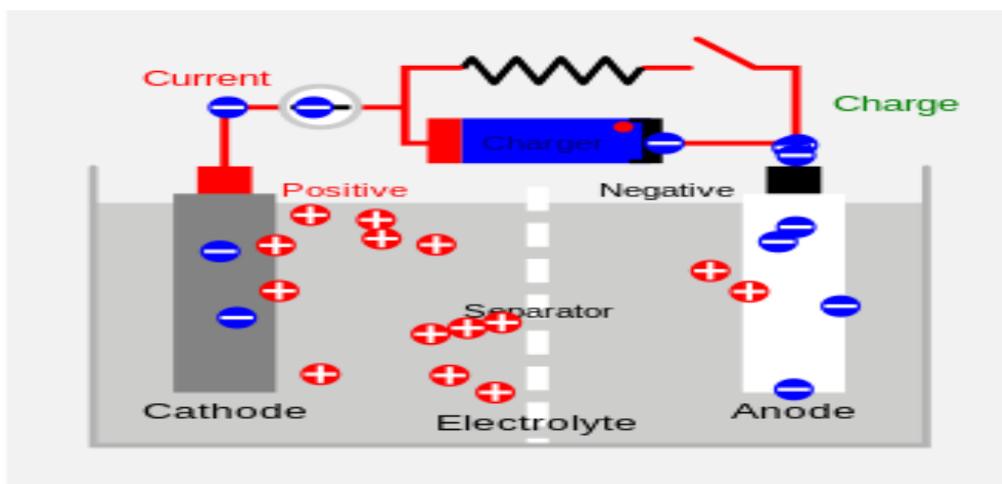


Figure III-6 : Super condensateur

III.3.1.1.2.2 Moyens de stockage à long terme :

➤ Pompage hydraulique :

Est une méthode utilisée depuis 1929, étant la plus vieille technologie de stockage d'énergie dans les centrales. En effet, jusqu'à 1970, c'était la seule option disponible sur le marché pour stocker de grandes quantités d'énergie. Un tel système comporte deux grands réservoirs situés à des hauteurs différentes. L'eau est pompée du réservoir inférieur au réservoir supérieur, ou elle est stockée. En fonction de la demande, l'eau peut revenir au réservoir inférieur, mais en traversant une ou plusieurs turbines hydrauliques transformant l'énergie potentielle de l'eau en énergie mécanique. Ensuite, des générateurs entraînés par les turbines transforment l'énergie mécanique. De tels systèmes peuvent fournir jusqu'à 1000 MW, mais ils sont conditionnés par les contraintes géographique, géologique, environnementales et le coût assez élevé de leur condition. Cependant, en France, 4200MW de stockage de ce type sont installés.

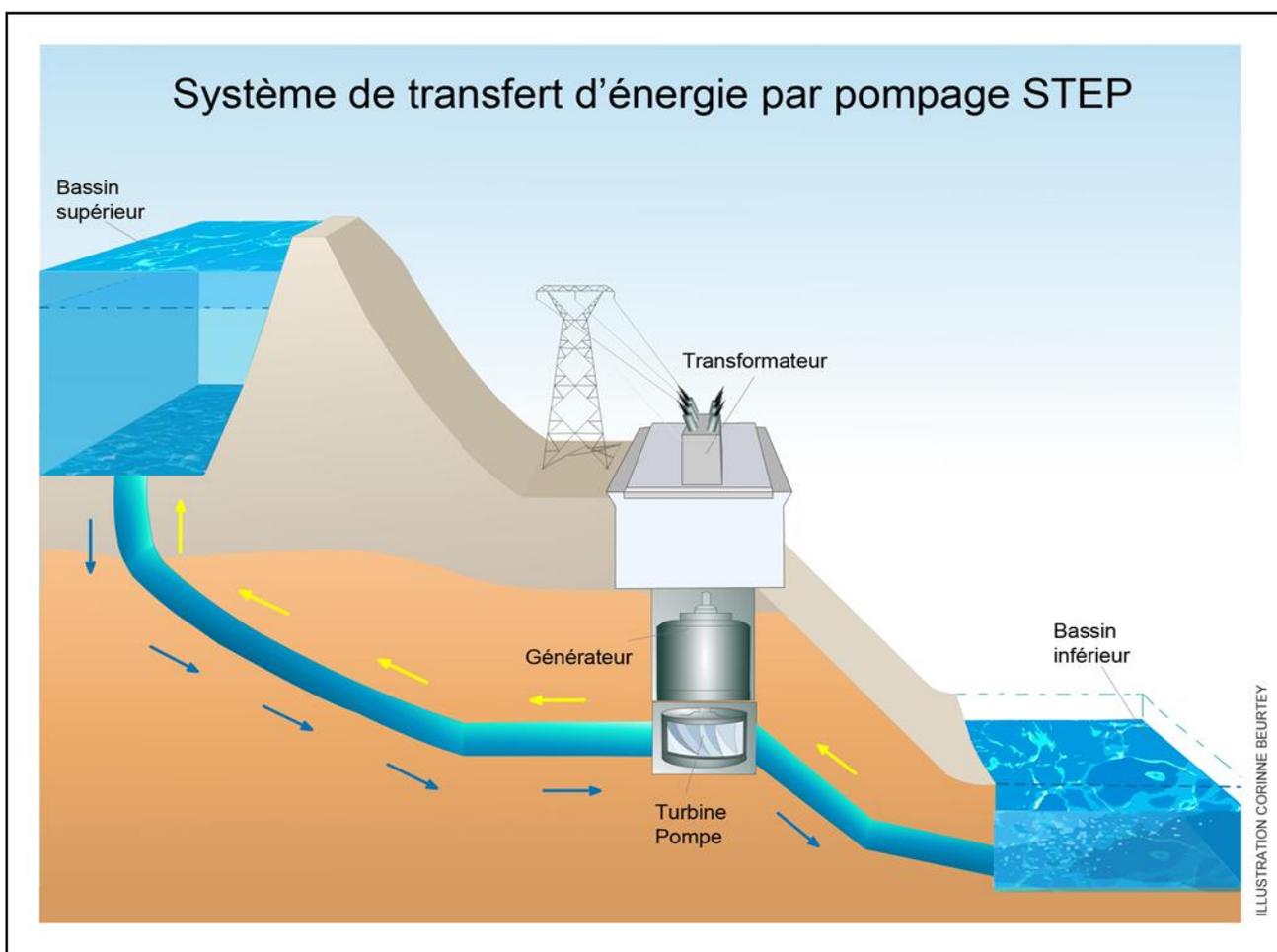


Figure III-7 : Pompage hydraulique

➤ Compresseur d'air :

Le stockage d'énergie sous forme d'énergie potentielle de l'air comprimé (CAES, d'après le nom anglais : Compressed-Air Energy Storage) constitue une autre alternative, apparue un peu plus tard. Cette technologie de stockage comporte un grand réservoir souterrain, bien étanche, où l'on peut stocker de l'air comprimé. En fonction de la demande, l'air comprimé est délivré à une turbine à gaz entraînant un générateur électrique. Ainsi, l'énergie potentielle de l'air comprimé est transformée en énergie électrique. Comme pour le stockage hydraulique, la construction des CAES est conditionnée aux contraintes géographiques et géologiques. Toutefois, il y a déjà plusieurs CAES construits en Europe et aux Etats-Unis, en utilisant d'anciennes mines de charbon ou de sel, de vieux puits de pétrole et des cavernes souterraines étanches.

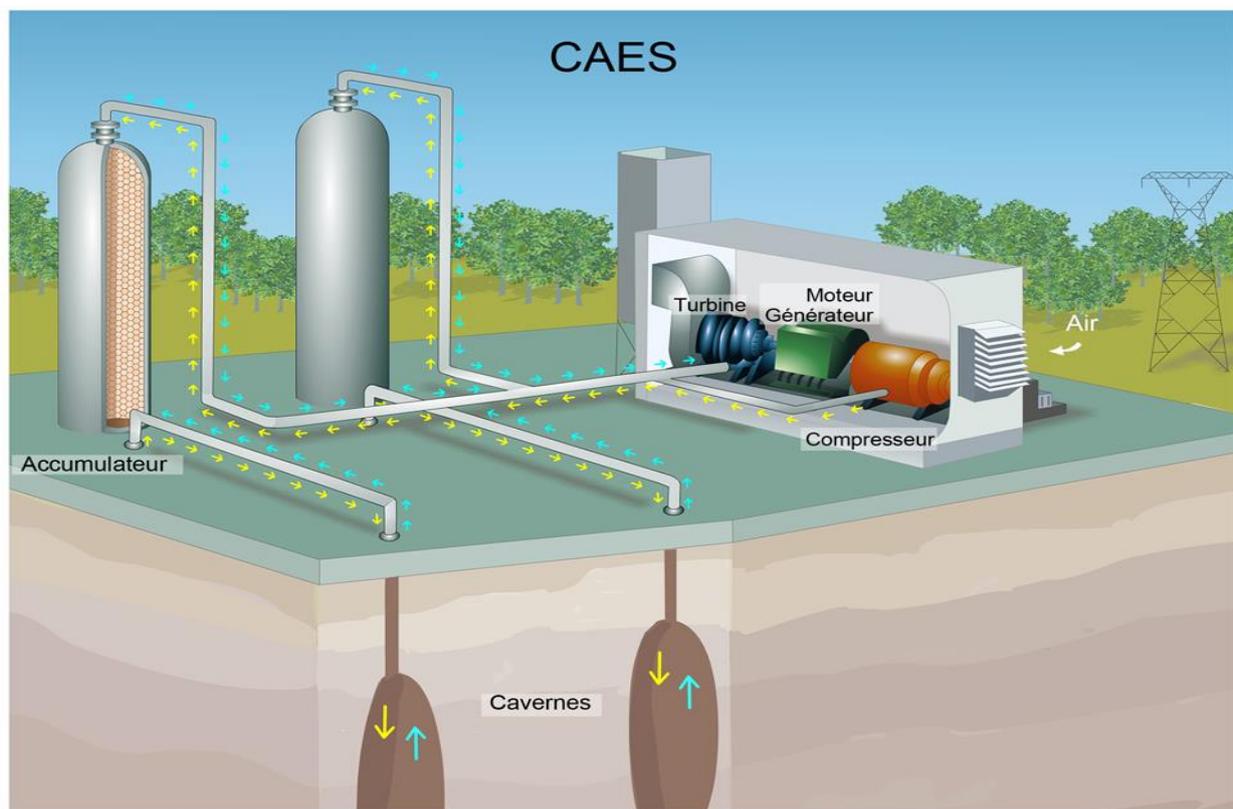


Figure III-8 : Compresseur d'air

➤ Les batteries :

Le stockage d'énergie sous forme chimique dans les batteries électrochimiques est de loin la technique la plus répandue pour le stockage de l'énergie électrique. En fonction du type de batterie, différentes réactions chimiques sont provoquées en utilisant l'énergie électrique et en la stockant sous forme d'énergie chimique. En fonction de la demande, des réactions chimiques inversées produisent de l'électricité. Le premier et le plus utilisé sur le marché a été l'accumulateur au plomb

Chapitre III : Couplage d'une centrale isolée au réseau électrique

dont plusieurs améliorations le rendent encore compétitif sur le marché. Etant disponibles sur une plage de puissance très étendue (quelque watt jusqu'aux modules de quelque MW), les batteries électrochimiques peuvent être utilisées dans une large variété d'applications. En 1994, un système d'accumulateurs chimiques capable de fournir 20MW sur 40 minutes a été installé à Puerto Rico pour améliorer le contrôle de la fréquence et de la tension du réseau électrique [38]. Un autre exemple de grande taille, constitué d'un accumulateur électrochimique pouvant fournir 40MW sur 7 minutes (ou 27 MW durant 15 minutes), a été installé en Alaska en 2003 afin de soutenir le réseau électrique [39].

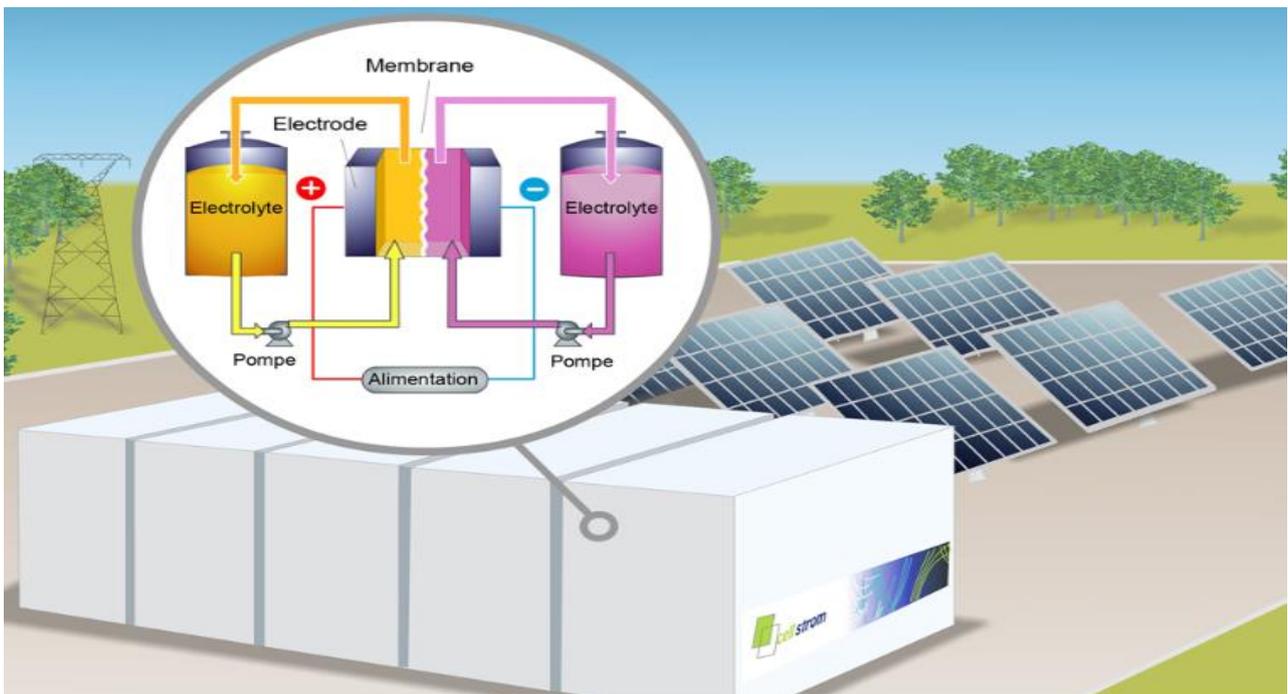


Figure III-9 : Les batteries

Il y a aussi autre moyenne de stockage :

➤ **Les piles à combustibles :**

(De 1KW a 1MW selon le type de pile à combustible), leurs technologies sont encore dans l'étape de recherche et de développement. [4]

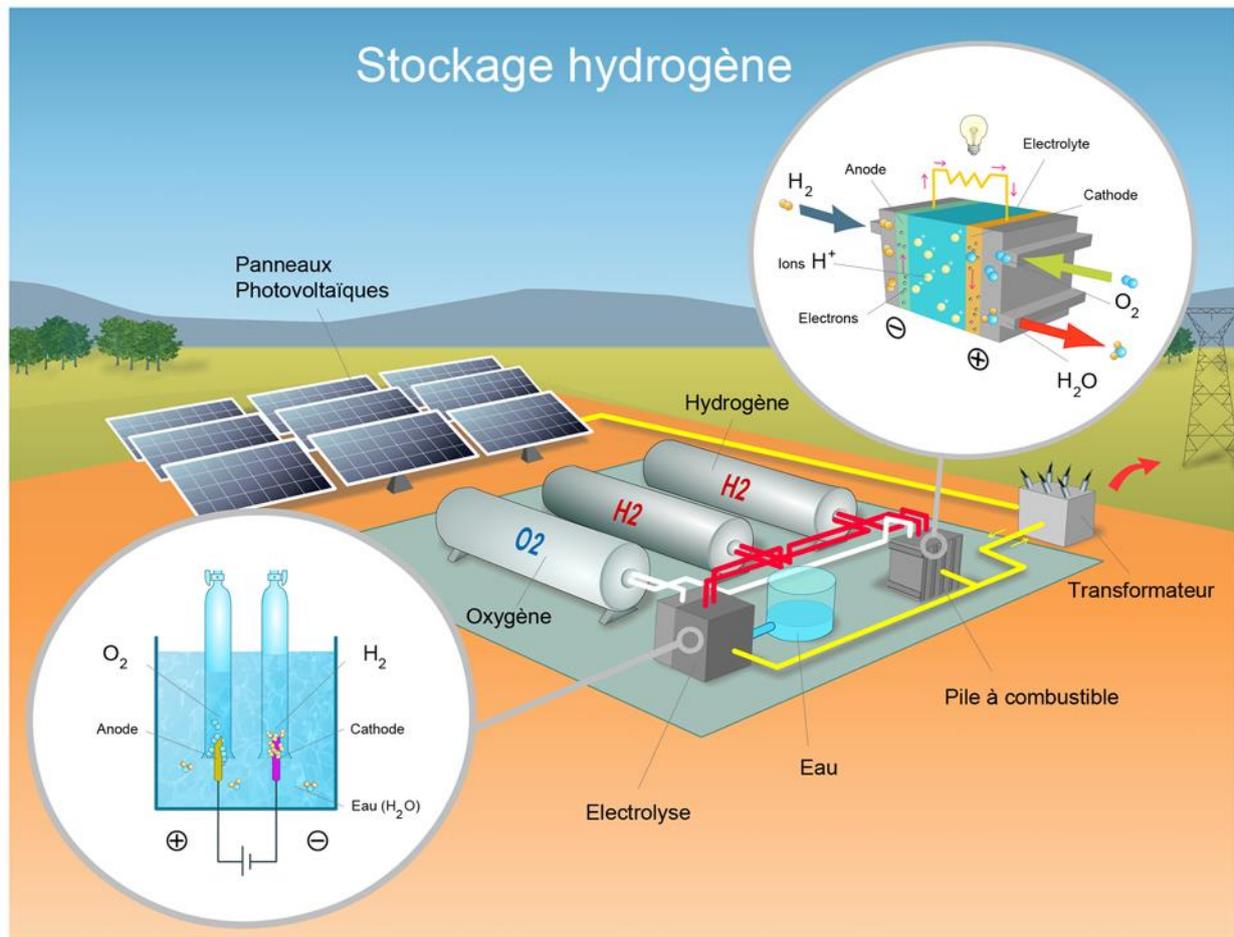


Figure III-10 : Les piles à combustibles

III.3.2 La turbine :

La turbine possède généralement trois pales. Ces pales ont un profil aérodynamique identique à celui des ailes d'avion (figure III- 4). Elle exploitation donc la différence de pression qui crée une force de portance pour mettre en rotation la turbine et ainsi extraire une partie de l'énergie cinétique du vent. [31]

La puissance disponible sur la surface balayée par le rotor S s'exprime :

$$P_{\text{dispo}} = \frac{1}{2} \cdot S \cdot \rho \cdot v^3 \quad (6)$$

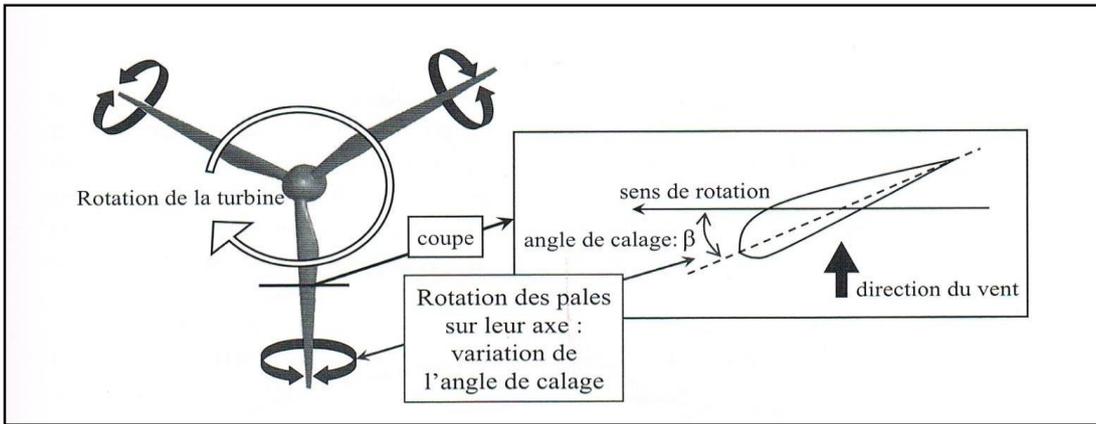


Figure III- 11 : Profil aérodynamique d'une pale

La turbine ne récupère qu'une fraction de cette puissance. Cette fraction est définie par le coefficient de puissance C_p qui est propre à chaque turbine et qui dépend à la fois de la position angulaire de l'axe de la pale, caractéristique par son angle de calage et du rapport de vitesse λ :

$$\lambda = \frac{RT \cdot \Omega T}{v} \tag{7}$$

La puissance captée par la turbine s'écrit donc :

$$P_T = S \cdot \rho \cdot v^3 \cdot C_p(\lambda, \beta) \tag{8}$$

La modélisation de la turbine passe donc par la caractérisation du coefficient de puissance.

III.3.3 Modèle de machine à double alimentation (MADA) :

Avec les génératrices synchrones, c'est actuellement l'une des deux solutions concurrentes en éolien à vitesse variable. Le stator de la génératrice est directement couplé au réseau (Figure III-5) le plus souvent par un transformateur.

A la place du rotor à cage d'écureuil, ces machines asynchrones ont un rotor bobiné dont le réglage électronique assure la variation du glissement. La chaîne rotor permet ainsi à l'ensemble de fonctionner à vitesse variable sur une plage de vitesse qui dépend du type et du dimensionnement de la chaîne rotor.

Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse.

Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant pour que de très nombreux fabricants (Vestas, Gamesa,) utilisent ce type de machines. [27]

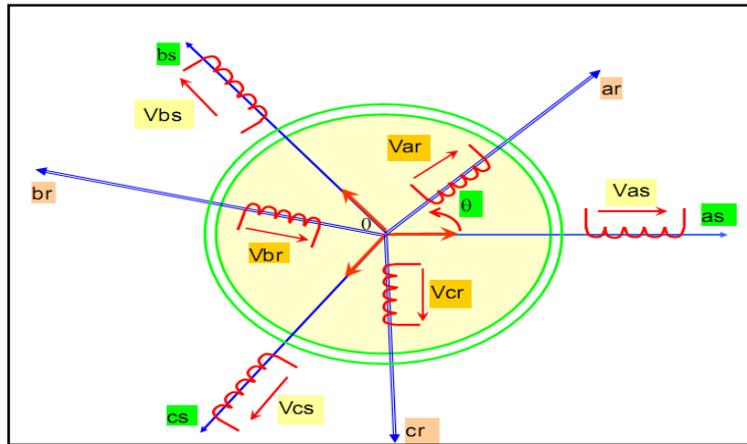


Figure III-13 : Représentation simplifiée de la MADA

Avec :

a_s, b_s, c_s : Phases du stator.

a_r, b_r, c_r : Phases du rotor.

III.3.3.1 .1 Hypothèses simplificatrices :

La machine asynchrone à double alimentation (MADA), avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie propre est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte. Afin d'établir un modèle simple, la mise en équations nous impose certaines hypothèses simplificatrices, qui sont : [29]

La machine est de constitution symétrique, par conséquent, la somme des courants et des tensions est égale à zéro.

On considère que la force magnétomotrice créée par chacune des phases statoriques et rotoriques est à répartition sinusoïdale.

On suppose que le circuit magnétique n'est pas saturé, condition nécessaire pour considérer les flux comme fonction linéaire des courants.

Le circuit magnétique est parfaitement feuilleté donc seuls les enroulements inducteur et induit sont parcourus par des courants (absence de phénomène d'hystérésis et de courants de Foucault).

La densité de courant est uniforme dans la section des conducteurs élémentaires (absence d'effet pelliculaire).

L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encochage est négligé. Les inductances propres sont constantes et les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes rotoriques et statoriques.

Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température.

III.3.3.1.2 Equation électrique et magnétique :

Dans le domaine de la modélisation des machines électriques il y a deux approches différentes une première qui est basée sur le calcul des champs et qui demande un moyen de calcul très puissant. Cette méthode s'adresse beaucoup plus au constructeur. Une deuxième approche est basée sur le modèle électromécanique où on trouve plus de simplifications. Dans notre cas nous allons basés sur cette dernière.

III.3.3.1.2.1 Equation électrique :

La loi faraday et la loi d'ohm permettent de relier les tensions des enroulements aux flux totalisés et aux courants dans les bobinages obéissent à l'équation suivante.

$$V = R i + \frac{d\Phi}{dt} \quad (9)$$

De là, on déduit celle des phases statoriques et rotoriques sous forme matricielle (simple et condensée) :

Au niveau du stator

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$[v_{sabc}] = R_s [i_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{sabc}] \quad (11)$$

Au niveau du rotor

$$\begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$[v_{rabc}] = R_r [i_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{rabc}] \quad (13)$$

Avec :

v_{sa}, v_{sb}, v_{sc} : Les tensions simples triphasées au stator.

i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} : Les courants statoriques.

$\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}$: Les flux propres au stator.

v_{ra}, v_{rb}, v_{rc} : Les tensions simples triphasées au rotor.

i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} : Les courants rotoriques.

$\Phi_{ra}, \Phi_{rb}, \Phi_{rc}$: Les flux propres au rotor.

R_s : La résistance des enroulements statoriques.

R_r : La résistance des enroulements rotoriques.

III.3.3.1.2.2 Equation magnétique :

On définit le vecteur flux par :

$$[\Phi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{Et} \quad [\Phi_{rabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Les vecteurs courants par :

$$[i_{sabc}] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{Et} \quad [i_{rabc}] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Chaque flux comporte une interaction avec les courants de toutes les phases y compris la sienne. La forme matricielle est donnée par :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sabc} \\ \Phi_{rabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{sr}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sabc} \\ i_{rabc} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}, [L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$[M_{SR}] = [M_{RS}]^t = M_{SR} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\Pi}{3}\right) & \cos\left(\Phi + \frac{4\Pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{4\Pi}{3}\right) & \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\Pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\Pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\Pi}{3}\right) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (18)$$

Avec :

L_s : L'inductance propre d'une phase statorique.

M_s : L'inductance mutuelle entre deux phases statorique.

L_r : L'inductance propre d'une phase rotoriques ;

M_r : L'inductance mutuelle entre deux phases rotoriques.

M_{sr} : L'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotoriques.

III.3.3.1.3 Application de la transformation de Park :

La transformation de Park, définie par la matrice de rotation $[P(\theta)]$, permet de ramener les variables du repère triphasé (a, b, c) sur les axes d'un repère diphasé tournant (d, q, 0). Les grandeurs Statoriques et rotoriques sont alors exprimées dans un même repère (figure III.7).

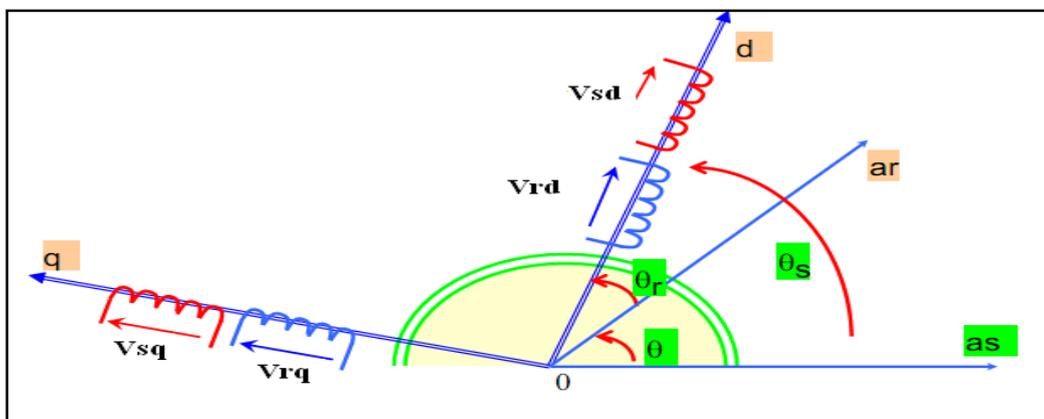


Figure III-14 : Transformation de Park

Chapitre III : Couplage d'une centrale isolée au réseau électrique

Revenons au choix de ces angles de transformation pour chaque ensemble de grandeurs (Statoriques et rotoriques). Si l'on note par θ_s (respectivement par θ_r) l'angle de la transformation de Park des grandeurs Statoriques (respectivement rotoriques). On remarque sur la figure (III.7) que θ_s et θ_r sont naturellement liés à θ par la relation rigide.

$$\theta_s - \theta_r = \theta \quad (19)$$

La matrice de changement de base $[P(\theta_s)]$ définie par :

$$[p(\theta_s)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_s & \cos\left(\theta_s - \frac{2\Pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_s + \frac{2\Pi}{3}\right) \\ -\sin \theta_s & -\sin\left(\theta_s - \frac{2\Pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s + \frac{2\Pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Et son inverse est défini par

$$[p(\theta_s)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_s & -\sin \theta_s & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta_s - \frac{2\Pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s - \frac{2\Pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta_s + \frac{2\Pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_s + \frac{2\Pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (21)$$

On a ainsi :

$$[i_{dqo}] = [P(\theta_s)][i_{abc}] \quad (22)$$

$$[V_{dqo}] = [P(\theta_s)][V_{abc}] \quad (23)$$

$$[\Phi_{dqo}] = [P(\theta_s)][\Phi_{abc}] \quad (24)$$

La matrice $[P(\theta_s)]$ représente la matrice de transformation appliquée au stator. la transformation des grandeurs rotoriques s'obtient en remplaçant l'indice (s) par l'indice (r).

III.3.3.1.4 Modélisation de la machine asynchrone dans le repère de Park :

III.3.3.1.4.1 Equation électrique :

$$[\mathbf{V}_{sabc}] = [\mathbf{R}_s][\mathbf{i}_{sabc}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{sabc}] \quad (25)$$

La transformation linéaire $[\mathbf{P}(\theta_s)]$ appliquée à l'équation (III.25)

$$[\mathbf{P}(\theta_s)]^{-1}[\mathbf{V}_{sdqo}] = [\mathbf{R}_s][\mathbf{P}(\theta_s)]^{-1}[\mathbf{i}_{sdqo}] + \frac{d}{dt}([\mathbf{P}(\theta_s)]^{-1}[\Phi_{sdqo}]) \quad (26)$$

Soit en multipliant à gauche par $[\mathbf{P}(\theta_s)]$

$$[\mathbf{V}_{sdqo}] = [\mathbf{R}_s][\mathbf{i}_{sdqo}] + \frac{d}{dt}([\Phi_{sdqo}]) + [\mathbf{P}(\theta_s)] \frac{d}{dt}([\mathbf{P}(\theta_s)]^{-1})[\Phi_{sdqo}] \quad (27)$$

On démontre que :

$$[\mathbf{P}(\theta_s)] \frac{d}{dt}([\mathbf{P}(\theta_s)]^{-1}) = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{d}{dt}(\theta_s) \quad (28)$$

On obtient les équations électriques suivantes.

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \Phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_s \Phi_{sd} \\ V_{so} = R_s i_{so} + \frac{d\Phi_{so}}{dt} \end{cases} \quad (29)$$

Où :

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} \quad (30)$$

De façon analogue, la transformation des grandeurs rotoriques conduit au système :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - \omega_r \Phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + \omega_r \Phi_{rd} \\ V_{ro} = R_r i_{ro} + \frac{d\Phi_{ro}}{dt} \end{cases} \quad (31)$$

Où :

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (32)$$

III.3.3.1.4.2 Equation magnétique :

Les transformations proposées établissent les relations entre les flux d'axes (d,q,o) et les flux d'axe (a,b,c):

$$[\Phi_{sdqo}] = [P(\theta_s)][\Phi_{sabc}] \text{ et } [\Phi_{rdqo}] = [P(\theta_r)][\Phi_{rabc}] \quad (33)$$

En développant les expressions des flux, elles deviennent au:

Au niveau du stator

$$[\Phi_{sdqo}] = [P(\theta_s)][L_s][i_{sabc}] + [M_{SR}][i_{rabc}] \quad (34)$$

Soit :

$$[\Phi_{sdqo}] = [P(\theta_s)][L_s][P(\theta_s)]^{-1}[i_{sdqo}] + [P(\theta_s)][M_{SR}][P(\theta_r)]^{-1}[i_{rdqo}] \quad (35)$$

Au niveau du rotor

$$[\Phi_{rdqo}] = [P(\theta_r)][M_{SR}][i_{sabc}] + [L_r][i_{rabc}] \quad (36)$$

Soit :

$$[\Phi_{rdqo}] = [P(\theta_r)][M_{sr}][P(\theta_s)]^{-1}[i_{sdqo}] + [P(\theta_r)][L_r][P(\theta_r)]^{-1}[i_{rdqo}] \quad (37)$$

On démontre que :

$$[P(\theta_s)][L_s][P(\theta_s)]^{-1} = \begin{bmatrix} 1_s - M_s & 0 & 0 \\ 0 & 1_s - M_s & 0 \\ 0 & 0 & 1_s - 2M_s \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$[P(\theta_s)][M_{SR}][P(\theta_r)]^{-1} = \frac{3}{2} M_{SR} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (39)$$

On définit :

Chapitre III : Couplage d'une centrale isolée au réseau électrique

$L_s = l_s - M_s$: L'inductance cyclique Statoriques.

$M = \frac{3}{2} M_{SR}$: L'inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.

$L_{so} = l_s + 2M_s$: L'inductance homopolaire Statoriques.

Ainsi l'expression des flux totalisés prend la forme suivante :

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = L_s i_{sd} + M_{sr} i_{rd} \\ \Phi_{sq} = L_s i_{sq} + M_{sr} i_{rq} \\ \Phi_{so} = L_{so} i_{so} \end{cases} \quad (40)$$

On obtient de la même manière pour le rotor :

$$\begin{cases} \Phi_{rd} = L_r i_{rd} + M_{sr} i_{sd} \\ \Phi_{rq} = L_r i_{rq} + M_{sr} i_{sq} \\ \Phi_{ro} = L_{ro} i_{ro} \end{cases} \quad (41)$$

Avec :

$L_r = l_r - M_r$: Inductance cyclique rotoriques.

$L_{ro} = l_r + 2M_r$: Inductance homopolaire rotoriques.

Quand les sommes des composantes (a, b, c) sont nulles, la troisième équation toujours vérifiée car identiquement nulle.

Les équations de Park. Statoriques et rotoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \Phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_s \Phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - \omega_r \Phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + \omega_r \Phi_{rd} \end{cases} \quad (42)$$

Les flux sont donnés dans le système :

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = L_s i_{sd} + M_{sr} i_{rd} \\ \Phi_{sq} = L_s i_{sq} + M_{sr} i_{rq} \\ \Phi_{rd} = L_r i_{rd} + M_{sr} i_{sd} \\ \Phi_{rq} = L_r i_{rq} + M_{sr} i_{sq} \end{cases} \quad (43)$$

III.3.4 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

L'énergie éolienne a des avantages propres permettant sa croissance et son évolution entre les autres sources d'énergie, ce qui va lui donner un rôle important dans l'avenir à condition d'éviter l'impact créé par ses inconvénients cités ci-après.

➤ **Avantage :**

- L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement :
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie.
- 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. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque que l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles. Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle [25].
- Bon marché : elle peut concurrencer le nucléaire, le charbon et le gaz lorsque les règles du jeu sont équitables.
- Respectueuse des territoires : les activités agricoles/industrielles peuvent se poursuivre aux alentours [26].

➤ Inconvénients :

- L'énergie éolienne possède aussi des désavantages qu'il faut citer :
- L'impact visuel, cela reste néanmoins un thème subjectif.
- Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée.
- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéroturbines.
- La qualité de la puissance électrique : 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. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suite, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques : bien qu'en terme de coût, l'éolien puissant sur les meilleurs sites, c'est à dire là où il y a le plus de vent, est entrain de concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés [25].

III.3.5 Répartition régionale de la vitesse du vent :

Pour implanter une éolienne, il faut choisir un site où la vitesse du vent fournirait l'énergie nécessaire ; nous devons donc faire des mesures de la vitesse du vent dans plusieurs sites. La Figure III-8 montre un exemple des régions ventées en Algérie d'après les données satellitaires du Laboratoire « d'Energie Eolienne » du CDER en 2011. [28]

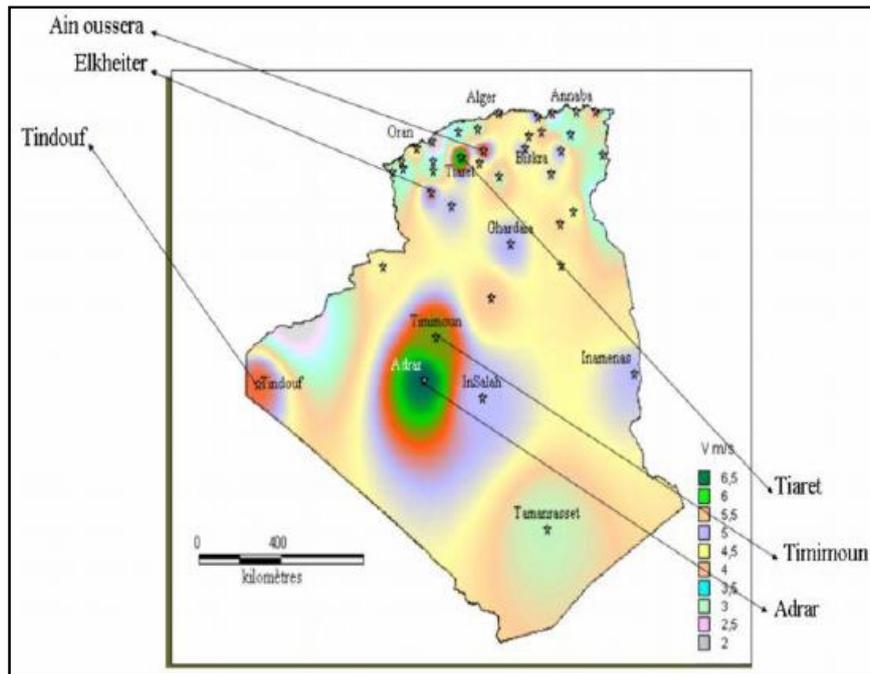


Figure III-15 : Les régions ventées en Algérie

III.4 Conclusion :

Dans cette partie, nous avons étudié, les systèmes éoliens et son principe de conversion et leurs avantages et inconvénients, ainsi la description et modélisation de modèle MADA.

Et on peut dire aussi que l'éolienne est une source de production d'énergie qui représente dans certains cas l'une des meilleures solutions adaptées. Et ne consomme aucun combustible et ne participe pas à l'effet de serre.

IV.1 Introduction :

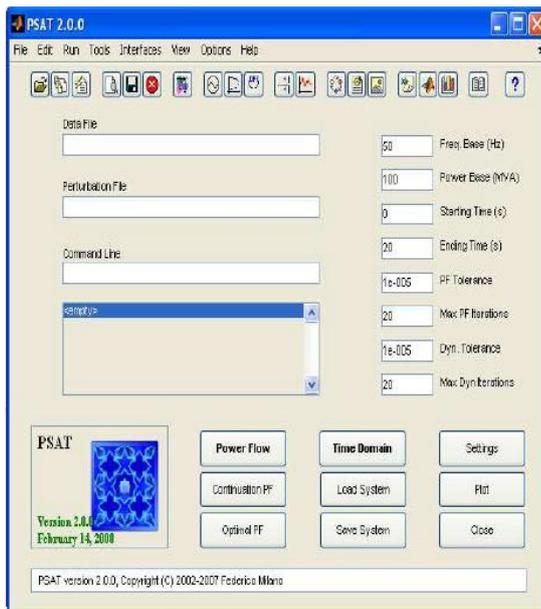
L'utilisation de cette énergie n'a aucun effet néfaste pour l'environnement. Ceci fait d'elle une énergie propre qui est une réelle alternative au problème de gestion des déchets nucléaires et aux émissions de gaz à effet de serre. Les éoliennes représentent également une chance pour plus de deux milliards de personnes isolées d'accéder enfin à l'électricité. De plus, peu coûteuses à long terme, elles sont une véritable possibilité d'économie au vue de la consommation croissante en énergie. Malheureusement leur implantation n'est pas possible dans tous les lieux, notamment dans les sites naturels protégés. Par ailleurs le bruit qu'elles émettent et leur esthétique dérangent certains riverains. Ainsi leur potentiel d'énergie d'avenir n'est pas encore exploité au maximum.

Dans ce cadre, le présent travail décrit une étude sur l'insertion de l'énergie éolienne dans le réseau trois machines neuf nœuds. Le but principal est d'améliorer le transit de puissance et diminuer les pertes actives dans ce réseau en incorporant une ferme éolienne avec l'utilisation d'un outil de simulation performant qui est le PSAT.

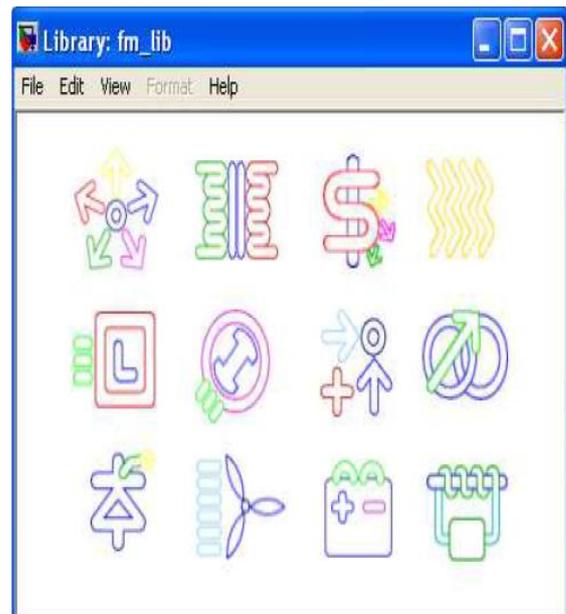
IV.2 Outils de simulation :

Plusieurs outils de simulation sont utilisés pour l'analyse des réseaux électriques tels que (Matlab, EMTP, Etap, PowerWorld, PSAT,... etc.). Ces logiciels permettent d'étudier le comportement des réseaux électriques en régime permanent aussi bien qu'en régime transitoire. Dans le présent travail, on a choisi PSAT comme outil de simulation.

Développé, en 2001, par FEDERICO MILANO, PSAT est une boîte à outils qui s'exécute sous environnement Matlab. Elle est dédiée pour l'analyse statique et dynamique et le contrôle des réseaux électriques. PSAT est actuellement dans un stade précoce de développement de ses caractéristiques, ses structures et ses formes de données, mais être partiellement ou complètement changer dans les versions futures. Le PSAT peut effectuer pas mal de tâche dans l'analyse des réseaux électrique comme le calcul du load flow et la répartition optimale des puissances en régime permanent ainsi que la stabilité angulaire, vitesse et de tension en transitoire.



(a) fenêtre principale.



(b) Bibliothèque de PSAT

Figure IV-1: Présentation PSAT

IV.2.1 Utilisation de PSAT :

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

- Ouvrir un nouveau fichier ;
- Créer le réseau électrique à étudier ;
- Lancer le modèle de la bibliothèque de simulation ;
- Introduire les données numériques des éléments (générateurs, lignes, transfos, FACTS...) ;
- Exécuter l'écoulement de puissances ;
- Exécuter la simulation dans le domaine temporel.

IV.3 Description du réseau étudié :

La figure (IV-2), représente le réseau test qui est le réseau WSCC, qui comporte trois générateurs connectés aux jeux de barres 1, 2 et 3 à travers des transformateurs de puissance contribuant à l'alimentation de trois charges A, B et C reliées respectivement aux nœuds 5, 6 et 8.

Ce réseau a été choisi à cause des différentes études qui l'ont utilisée ceci constitue bonne référence pour valider les résultats de notre étude.

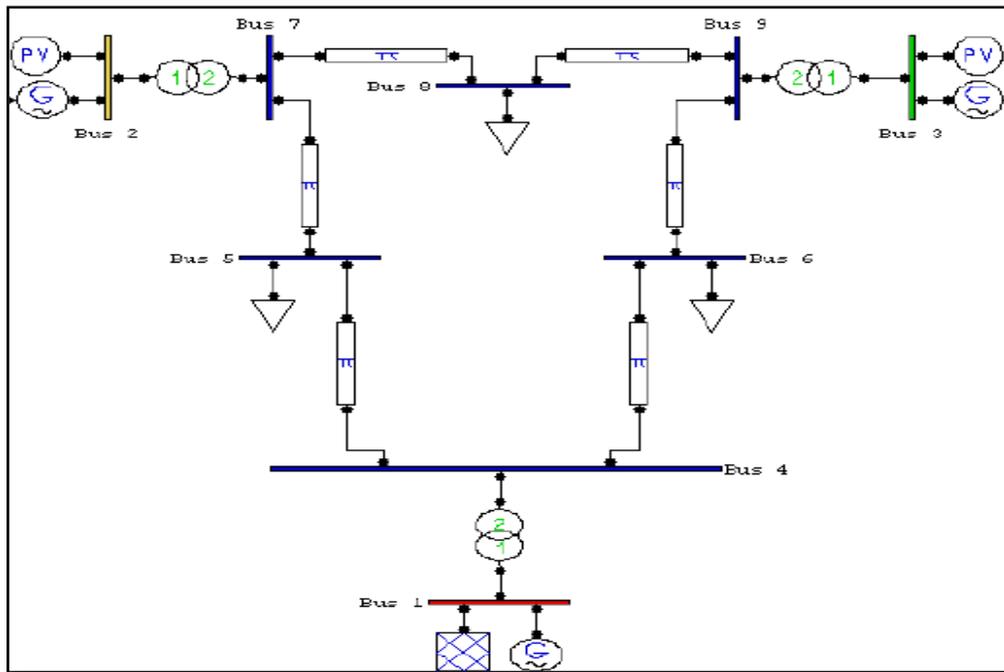


Figure IV-2 : Réseau test simulé par PSAT.

IV.3.1 Les paramètre de réseau test :

Tableau 3: Caractéristiques des noeuds

BUS no :	Voltage (KV)
1	16.5
2	18
3	13.8
4	230
5	230
6	230
7	230
8	230
9	230
10	69

Tableau 4: Caractéristiques des lignes

Line no :	Puissance (MVA)	Voltage (KV)	Resistance	Réactance	Susceptance
1	100	230	0.0119	0.1008	0.1045*2
2	100	230	0.0085	0.0720	0.0745*2
3	100	230	0.0390	0.1700	0.179*2
4	100	230	0.0320	0.1610	0.153*2
5	100	230	0.0100	0.0850	0.088*2
6	100	230	0.0170	0.0920	0.079*2
7	100	69	0.0100	0.0850	0.088*2

Tableau 5: Caractéristiques des charges

Load no :	Puissance (MVA)	Voltage (KV)	Puissance active (pu)	Puissance réactive (pu)
1	100	230	1.25	0.5
2	100	230	0.9	0.3
3	100	230	1.0	0.35

Tableau 6: caractéristiques des transformateurs

Transformateur No :	Puissance (MVA)	Primaire Voltage (KV)	Secondaire Voltage (KV)	Résistance	Réactance
In line 7	100	18	230	0	0.0625
In line 8	100	13.8	230	0	0.0586
In line 9	100	16.5	230	0	0.0576

Tableau 7: Caractéristiques des noeuds PV:

PV bus	Connecte à bus 2	Connecte à bus 3	Connecte à bus 10
Puissance de base (MVA)	100	100	60
Voltage (KV)	18	13.8	69
Puissance active	1.63	0.85	0.94
Voltage magnitude	1.025	1.025	1.025
Qmax (pu)	99	99	99
Qmin (pu)	-99	-99	-99
V max (pu)	1.1	1.1	1.1
V min (pu)	0.9	0.9	0.9

Tableau 8: Caractéristique du noeud bilan:

Slack bus connecté to bus 1	Puissance (MVA)	Voltage (KV)	Voltage magnitude (pu)	Référence phase (rad)	Qmax (pu)	Qmin (pu)	Vmax (pu)	Vmin (pu)	Puissance active guess (pu)
1	100	16.5	1.04	0	99	-99	1.1	0.9	0.8

Tableau 9: les données des machines

	bus 1	bus 2	bus 3
machine			
Power rate	100	100	100
Voltage rate	16.5	18	13.8
Ra	0	0	0
Xl	0	0	0
Xd	0.146	0.8958	1.3125
X'd	0.0608	0.1198	0.1813
X''d	0	0	0
T'do	8.96	6	5.89
T''do	0	0	0
Xq	0.0969	0.8645	1.2578
X'q	0.0969	0.1969	0.25
X''q	0	0	0
T'qo	0.310	0.5350	0.6
T''qo	0	0	0
M = 2H	2*23.64	12.80	6.02

Tableau 10 : Paramètres du modèle du vent

Nominal wind speed – Air density	15 m/s - 1.225 kg/m³
Filter time constant – sample time	4 s - 0.1 s
Weibull constant, & C K	20 - 2
Ramp constants (t_{sr}, t_{er}, A_{wr})	5 s - 15 s - 1 m/s
Gust constants (t_{sg}, t_{eg}, A_{wg})	5 s - 15 s - 0 m/s
Turbulence constants (h, Z0, df, n)	50 m - 0.01 - 0.2 Hz - 50

Tableau 11 : Paramètres de la MADA

(MVA, kV, Hz), kW_s/kVA (600, 69, 60), 3 pu

(R_s, X_s) (R_r, X_r) X_m (0.01..0.10), (0.01 0.08), 3.00 pu

K_p, T_p, K_v, T_v (10 pu, 3 s); 10 pu; 0.01 s

Pole, Gear Ratio (41 / 89)

Blade length and number (75.00 m³)

P_{max}; P_{min}; Q_{max}; Q_{min} (1.00 0.00) pu ; (0.7 - 0.7) pu

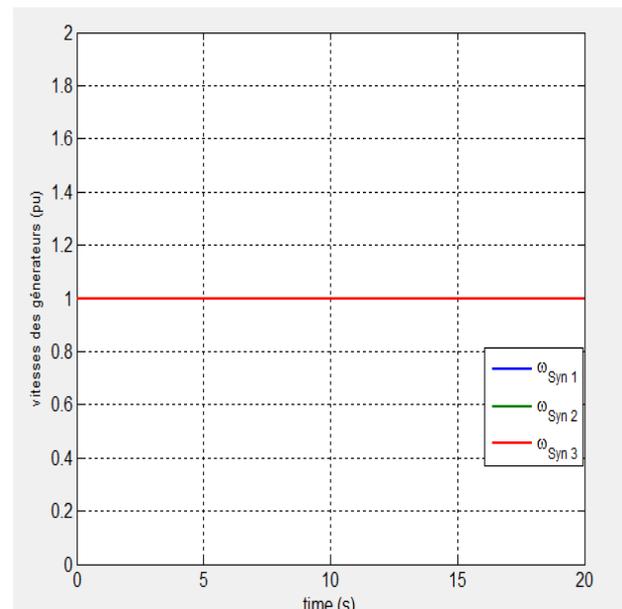
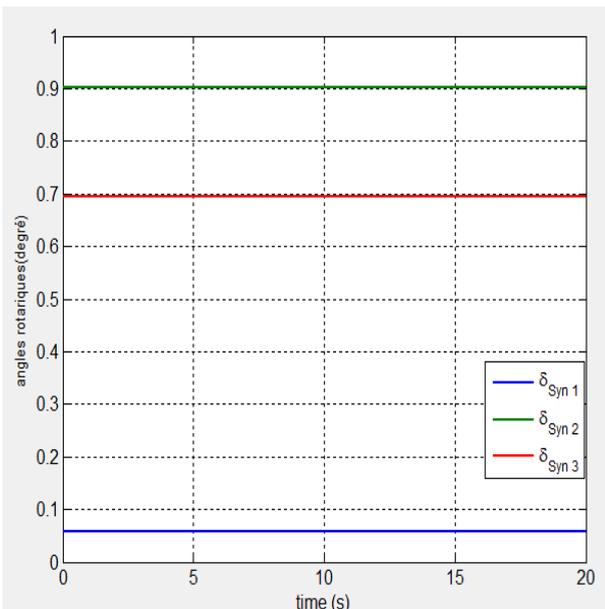
Number of generators 300 N^os

IV.4 Réseau test sans l'intégration de la ferme éolienne :

Dans cette partie, nous avons examiné le comportement du réseau test avant de connecter l'éolienne au réseau par l'évaluation des paramètres vitesse, angle de charge et circulation de puissance.

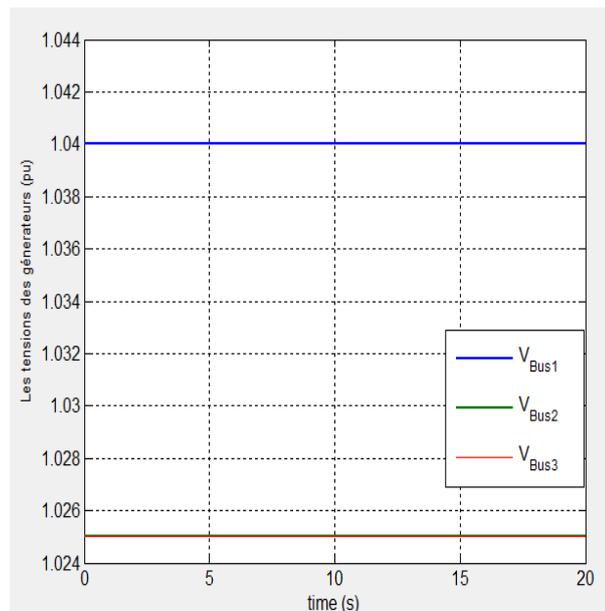
III.4.1 Simulation :

Les Figures A, B et C représente respectivement les angles de charge, les tensions des nœuds et les vitesses des 3 machines.



A) Angles rotoriques des trois machines.

B) vitesses angulaires des trois machines.



C) Les tensions des nœuds machines

Figure IV-3 : Comportement du réseau test

- **Commentaire :**

Les figures (A) et (B) montrent respectivement l'angle de charge et la vitesse des 3 machines, d'après l'équation de mouvement, les deux caractéristiques (angle de charge et vitesse) sont liées. On remarque qu'avant l'intégration de l'éolienne, la vitesse et l'angle de charge sont totalement stables.

La figure (C) montre la tension au niveau des trois machines, où le nœud 1 est pris comme nœud bilan (swing bus) avec une tension de 1.04 pu, et les nœuds 2 et 3 sont pris comme des nœuds de type PV avec une tension égale à 1.025. Sans aucune régulation insérée aux machines, on remarque que les trois tensions sont bien fixées à la valeur voulue.

Les résultats obtenus montrent la stabilité de notre réseau test. Afin de valider ces résultats nous avons effectué une comparaison de ce dernier avec celle qui se trouve dans [37], la comparaison effectuée valide les résultats obtenus et montre l'efficacité du PSAT dans la simulation des réseaux électriques.

IV.5 Réseau test avec intégration de la ferme éolienne :

Cette partie est consacrée à traiter le réseau en présence d'une éolienne connectée au réseau, l'objectif est de voir l'influence de l'éolienne sur le comportement des trois génératrices, déterminer le taux de pénétration et la position optimale pour installer l'éolienne dans ce réseau.

Nous utilisons une éolienne comprenant une machine asynchrone de type « MADA », la figure suivante montre un exemple du couplage de l'éolienne au nœud 5.

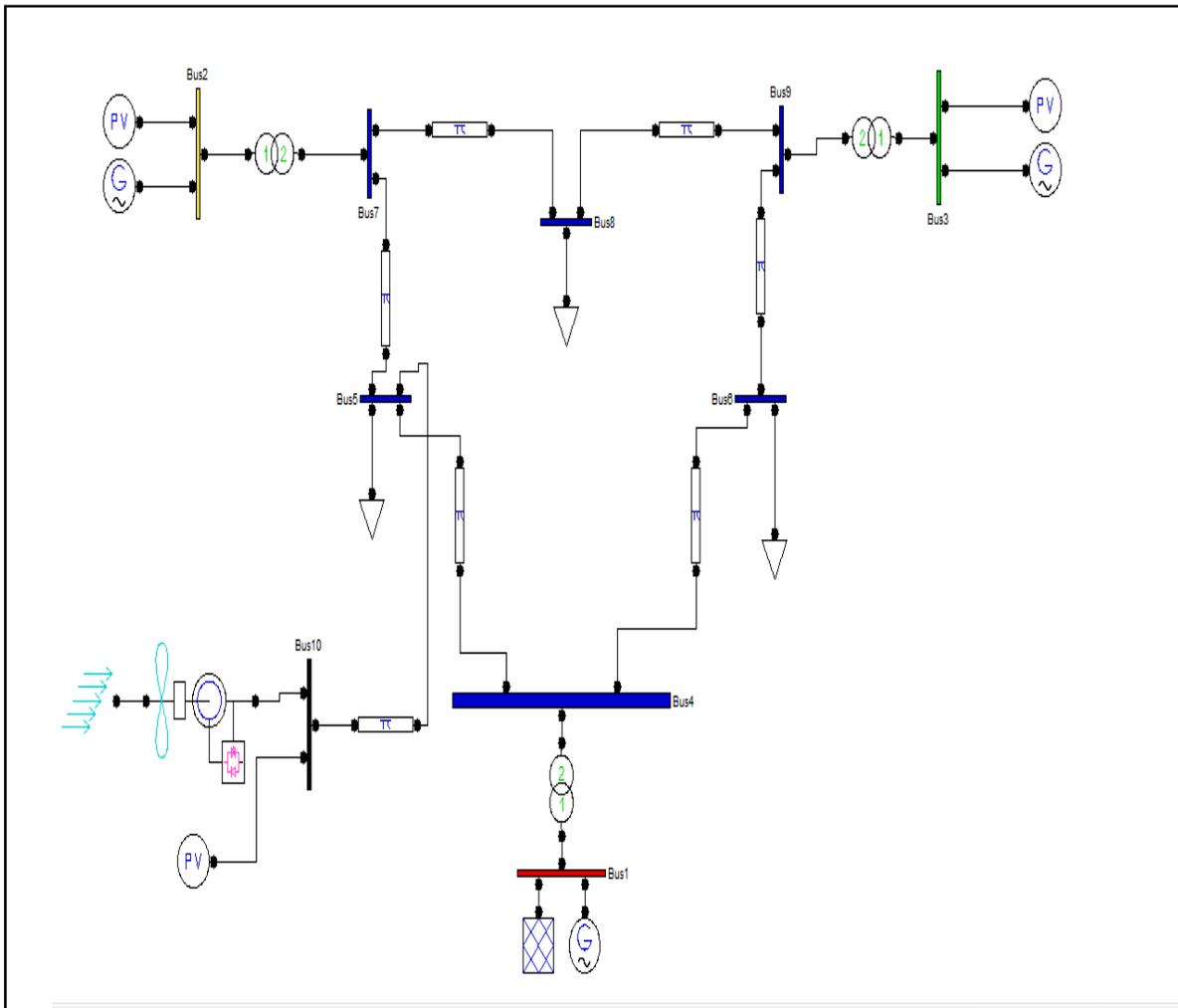


Figure IV-4 : Intégration d'un éolien nœud 5

IV.5.1 Position optimal

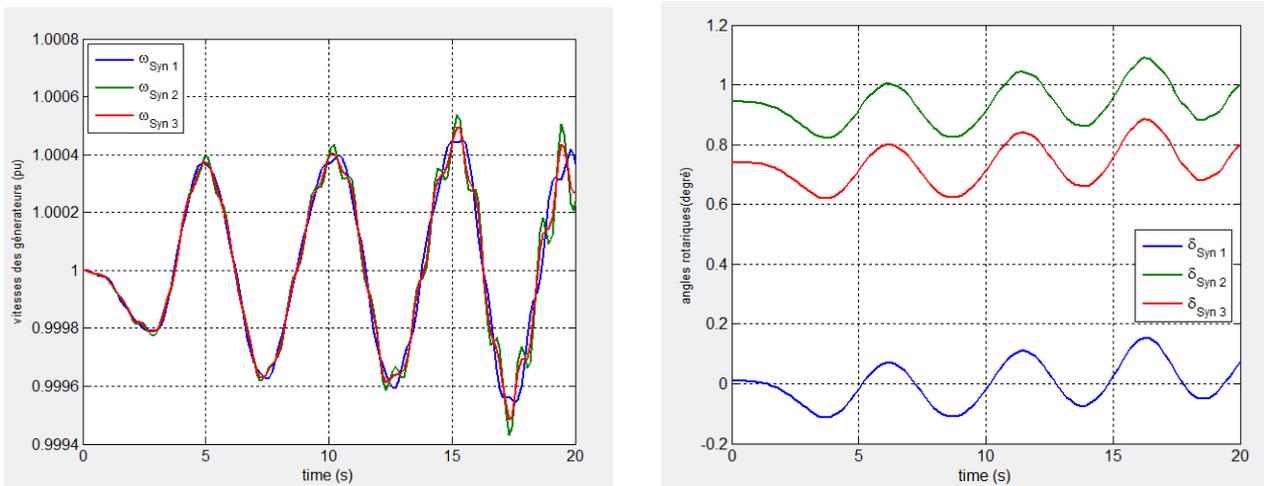
Afin de déterminer la position optimale où l'éolienne doit être installée, nous avons testé les différentes positions possibles de raccordement, cette position est évaluée par l'examen des paramètres suivant :

- Caractéristiques des machines (v , ω , δ)
- transits de puissance.
- pertes actives et réactives.

IV.5.1.1 Caractéristiques des machines

Après essais des différentes positions possibles de connexion du système décentralisé, nous avons retenu deux positions (les plus optimales). Les figures A, B et C montrent respectivement les caractéristiques des 3 machines où l'éolienne est installée dans deux positions différentes respectivement les nœuds 4 et 5.

Résultat pour le nœud 4 :



A) vitesses angulaires des trois machines.

B) Angles rotoriques des trois machines.

Figure IV-5 : Vitesse et angle de charge avec éolienne intégré au nœud 4

On remarque clairement sur les figures A et B qui représentent les réponses vitesse et angle de charge des machines, que les caractéristiques du réseau ont été affectés par le couplage de la ferme, les deux paramètres (vitesse, angle de charge) ont une réponse oscillatoire, même s'il reste toujours dans les limites de tolérance.

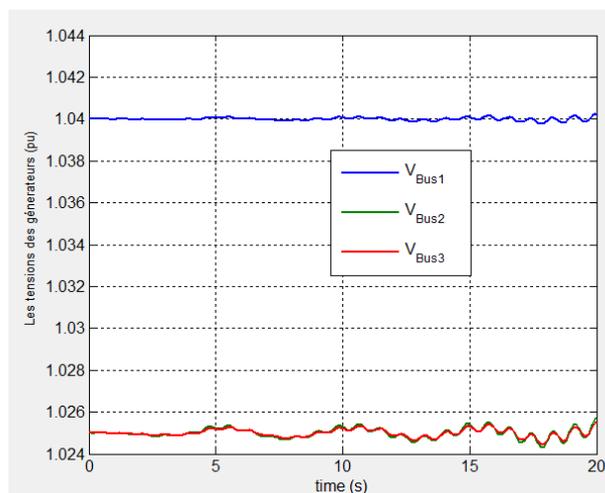
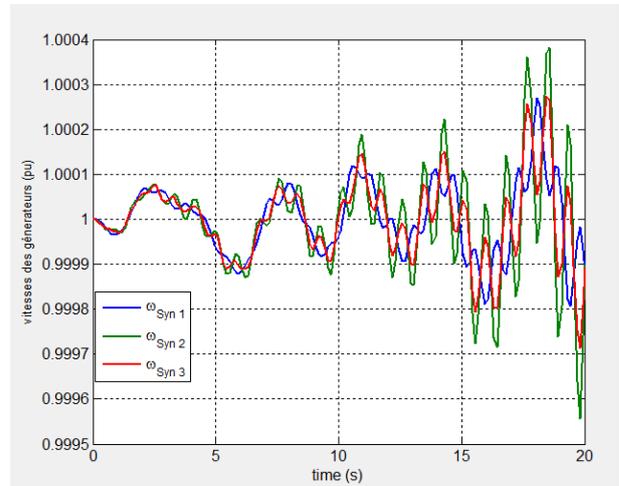
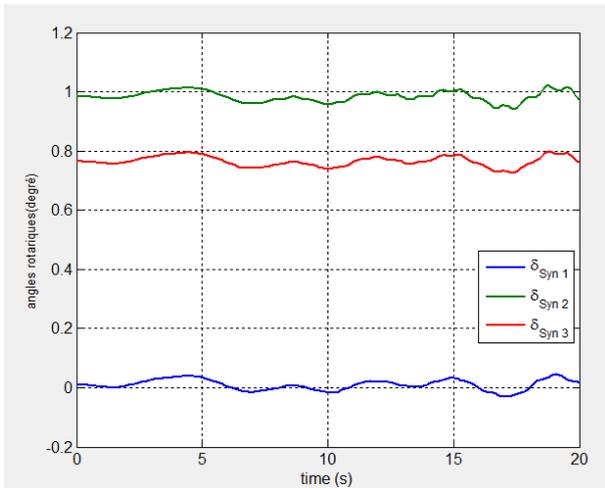


Figure IV-6 : Tension avec éolienne intégré au nœud 4

De même qu'avec les vitesses et les angles de charge, les tensions au niveau des 3 machines sont aussi perturbées, les tensions ont une réaction mais en petit variation.

Résultat pour le nœud 5 :



A) Angles rotoriques des trois machines.

B) vitesses angulaires des trois machines.

Figure IV-7 : Vitesse et angle de charge avec éolienne intégré au nœud 5

L'intégration de l'éolienne au niveau de bus 5, a perturbé de façon sévère le comportement du réseau en vitesse et angle de charge comme les figures (A) et (B) montrent. On remarque que les oscillations ont augmentés et le réseau en risque de perdu sa stabilité.

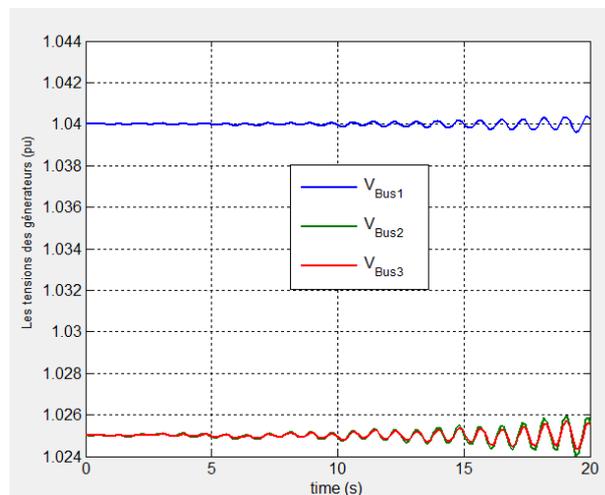


Figure IV-8 : Tension avec éolienne intégré au nœud 5

Comparons les réponses de tension montrée dans la figure (IV-6) et celle obtenu au-dessus (figure (IV-8)), l'intégration de l'éolienne au bus 5 a déstabilisé la tension au niveau des machines.

L'analyse des résultats montre l'influence de l'éolienne sur les paramètres des machines, la présence d'une éolienne dans le réseau rend ce dernier instable. La comparaison de l'influence de l'éolienne vue

son installation c'est-à-dire nœud 4 ou 5, montre que la position de l'éolienne est très importante. Contrairement au nœud 5, le branchement de l'éolienne au nœud 4 a moins perturbe le réseau.

Le fait que les trois machines du réseau test ne sont pas équipé de régulateur a accentuée les effets du couplage des deux systèmes ceci a été fait de façon délibéré pour montrer clairement l'effet qu'on veut étudier sans l'intervention des régulateurs.

IV.5.1.2 Les pertes actives et réactives

- Avant couplage :

Tableau 12 : les pertes de puissance active et réactive de réseau sans raccordement d'une éolienne.

	Perte active totale (pu)	Perte réactive totale (pu)
Réseau sans éolienne	0.0001	0.19739

- Apres couplage :

Le tableau 13 : représente les pertes de puissance active et réactive dans le réseau en présence d'une éolienne.

Position d'éolienne	Perte active totale (pu)	Perte réactive totale (pu)
Bus 4	0.0001	0.14523
Bus 5	9e-005	0.12482
Bus 6	9e-005	0.13586
Bus 7	0.00012	0.17099
Bus 8	0.00011	0.15554
Bus 9	0.00011	0.16956

De même avec les caractéristiques des machines, la position de l'éolienne a un impact sur les pertes de puissance active et réactive. D'après le tableau on distingue que la position 5 est la position optimale pour minimiser les pertes de puissance dans le réseau.

- **Comparaison**

Comparant les deux résultats, celle obtenue avant le raccordement de l'éolienne avec le réseau et après le raccordement, on remarque que l'éolienne a un impact sur les pertes totales actives et réactive du réseau. On remarque que les pertes active et réactive sont diminuée lorsque le réseau est connecte avec l'éolienne. Ceci est dû au fait que certaines lignes ont été déchargées après le couplage du système.

IV.5.1.3 Les transits de puissance

- **Avant couplage :**

La figure IV-9 montre la circulation de puissances du réseau test sans l'intégration de l'éolienne, les résultats obtenus sont les même retrouvés dans la littérature exploitée [37].

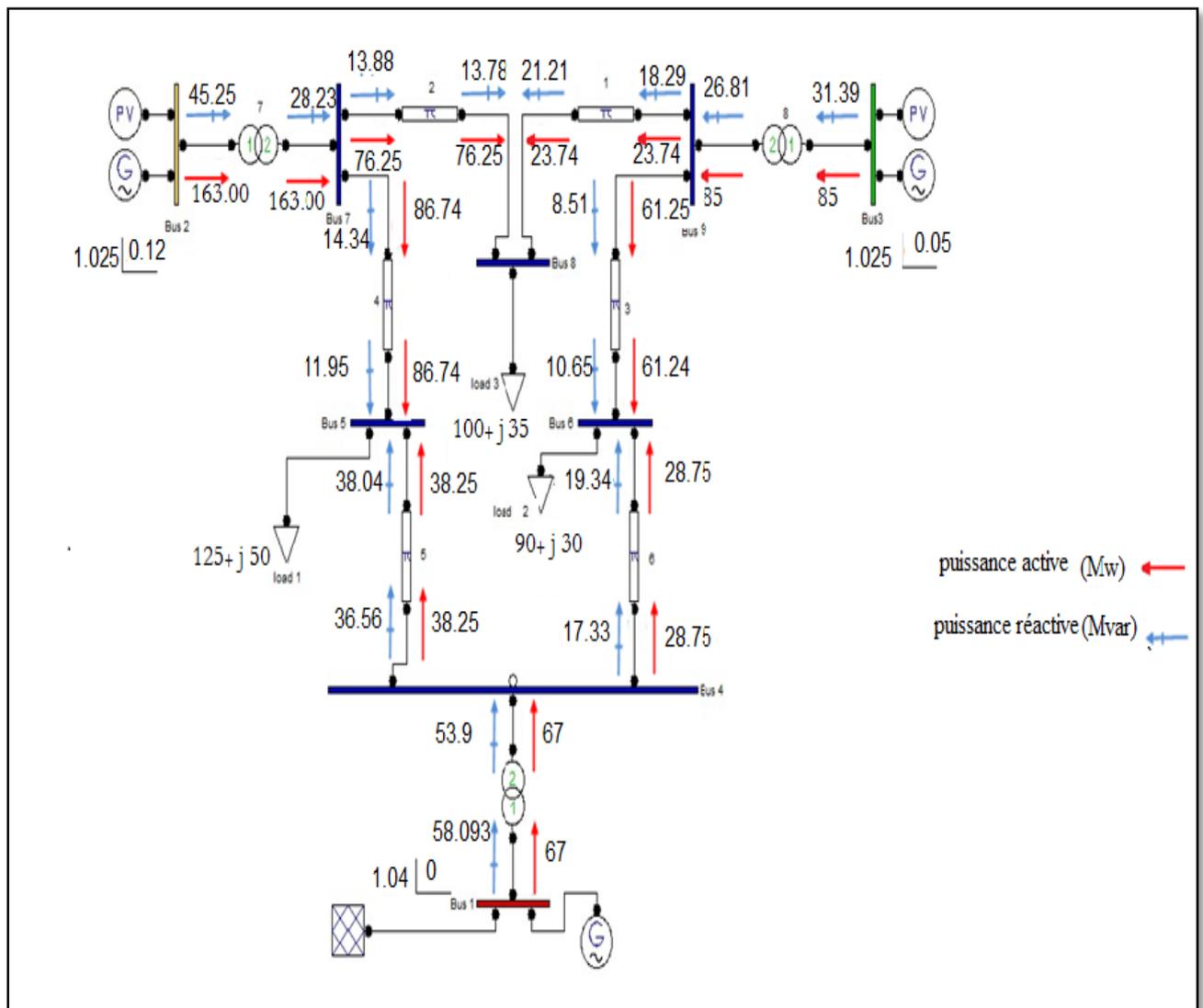


Figure IV-9: circulation de puissance du réseau test

- **Après couplage :**

La figure IV-10 montre la circulation de puissances du réseau test avec l'intégration de l'éolienne, on remarque que certaines lignes ont été déchargées (ligne (4-5), ligne (4-6)) tandis que sur d'autre ligne on remarque une augmentation du transit de puissances (ligne (6-9), ligne (5-7)), pour les tensions l'effet du couplage du système n'est pas vraiment remarquable (1.025 |0.17 et 1.025 |0.09)

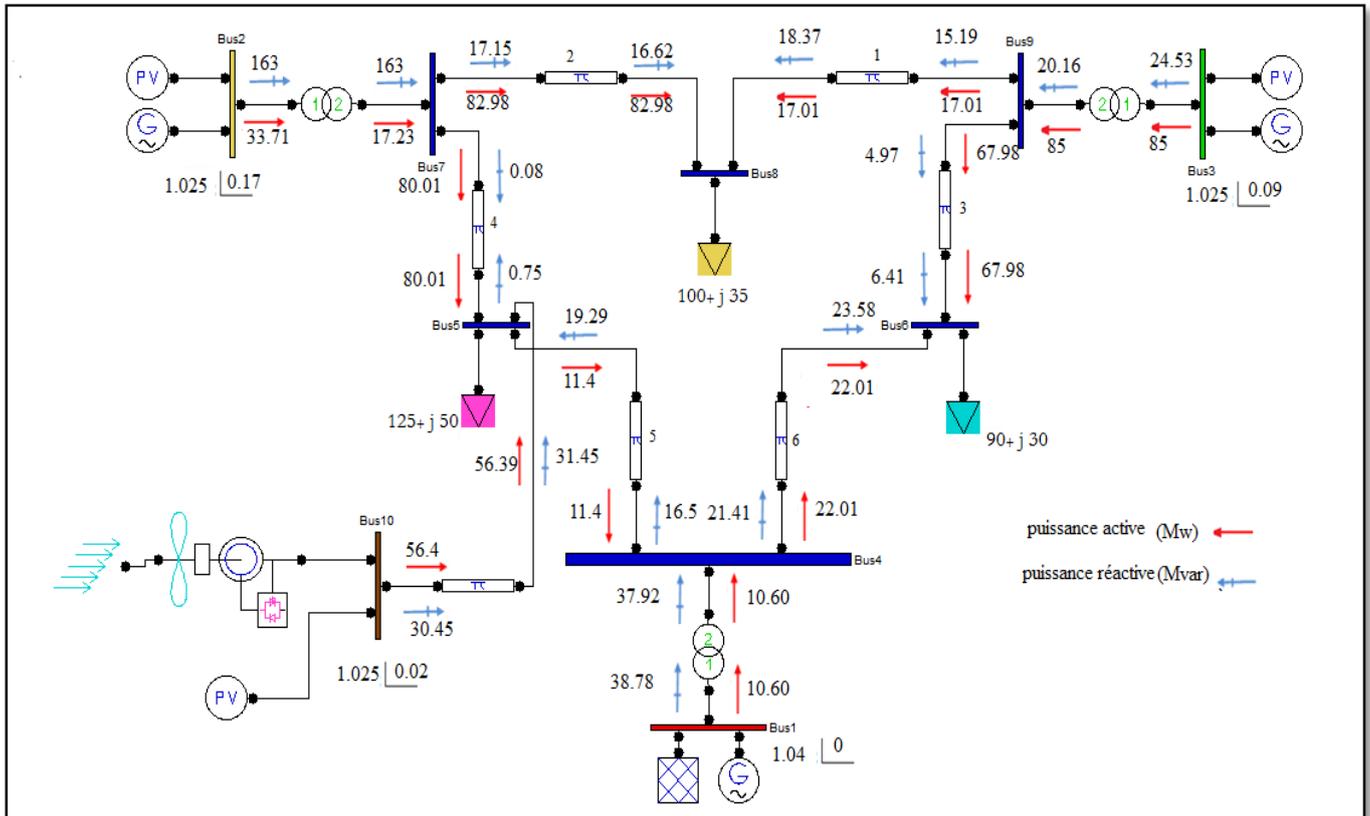


Figure IV-10 : circulation de puissance du réseau test raccorde avec éolienne.

Comparaison

Entre les deux réseaux, on remarque que l'insertion d'une éolienne au réseau peut décharger certaines lignes ceci est dû au fait que l'apport en puissance de cette éolienne change totalement la circulation de puissance du réseau, la puissance produite par l'éolienne provoque une diminution de la production dans les autres centrales et par la suite la puissance qui circule dans les lignes de ce réseau.

IV.6.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré l'impact de l'intégration d'une éolienne dans un réseau électrique à l'aide du logiciel PSAT, les résultats obtenus montrent que cette dernière a un effet bien clair sur les différents paramètres du réseau. Nous avons aussi montré l'importance de la position de raccordement de l'éolienne sur le réseau.

Conclusion Générale

La production décentralisée d'énergie n'est pas une chose nouvelle. Elle bénéficie cependant actuellement d'un essor important et trouve un écho important dans l'opinion. Elle n'est plus uniquement limitée à fournir de l'énergie dans les zones difficiles d'accès, elle permet de répondre à des besoins très divers, et couvre à ce titre une large plage de puissances. Celles-ci s'étendent de quelques kW raccordés aux réseaux de distribution HTA jusqu'à plusieurs dizaines de MW raccordés aux réseaux HTB de répartition. L'injection d'énergie sur des réseaux qui n'avaient pas été conçus pour cela peut cependant poser certains problèmes qui doivent être examinés entre producteurs et gestionnaires de réseaux.

Nous nous sommes tous particulièrement intéressé dans ce travail, à examiner les effets que peut avoir le couplage d'un système décentralisé sur le transit de puissance et les pertes actives dans ce réseau, ceci justifie le fait que le système étudié n'a pas été équipé de régulation au niveau des machines de notre réseau.

Dans le premier chapitre du mémoire, nous avons caractérisé l'architecture, l'exploitation de des réseaux électrique

Dans le deuxième chapitre une présentation de la production décentralisée avec les différentes technologies utilisées, mentionnant ainsi leurs apports et leurs impacts sur les réseaux électriques et sur les plans de protection du système.

Dans le troisième chapitre, on a procédé à l'intégration d'une GED au réseau électrique et ainsi la centrale éolienne et son principe de conversion ont été choisis.

Dans le quatrième chapitre, nous avons simulé le comportement du réseau trois machines neuf nœuds avant et après intégration de l'éolienne, et choisie la position optimale avant l'examen de la stabilité des machines et transit de puissance et les pertes active et réactive.

La conclusion que l'on peut tirer est que le domaine de la production décentralisée est très large et complexe. Toutefois et à défaut de temps, plusieurs points n'ont pas été traités et ouvrent les portes vers beaucoup d'améliorations.

Bibliographie

- [1] **P. Bornard, M. Pavard**, « Réseaux d'interconnexion et de transport : réglage et fonctionnement », Techniques de l'Ingénieur, traite Génie Electrique D 4 090, 1993.
- [2] **J.A Lopes**, « Integration of dispersed generation on distribution networks impact studies ». In IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, volume 1, pages 323-328, 2002.
- [3] **Olivier RICHARDOT** « Réglage Coordonné de Tension dans les Réseaux de Distribution à l'aide de la Production Décentralisée » Thèse de doctorat INPG, 2000.
- [4] **Guillaume RAMI** « Contrôle de tension auto adaptatif pour des productions décentralisées d'énergies connectées au réseau électrique de distribution » Thèse de doctorat INPG, 2006.
- [5] **Mr. Labed DJAMEL** « Production décentralisée et couplage au réseau » Thèse de doctorat, université mentouri Constantine ,2008.
- [6] **Rabah BENABID** « Optimisation Multi objectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des Réseaux Electriques », mémoire magister, Université Amar Telidji, Laghouat, 2007
- [7] **Alkhatib H.** « Etude de la stabilité aux petites perturbations dans les grands réseaux électriques optimisation de la régulation par une méthode met heuristique », Thèse de doctorat, université Paul Cézanne D'Aix-Marseille Faculté Des Sciences Et Techniques, 5 décembre 2008
- [8] **Brogan W.L.**, et al., Control Systems, the Electric Engineering Handbook, CRC Press LLC, Boca Raton, 2000.
- [9] **Gholipour Shahraki E**, « Apport de l'UPFC a l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques », Thèse de doctorat, Faculté des Sciences & Techniques, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2003.
- [10] **T. Thu Pham**, « Influence de la production décentralisée sur la gestion des infrastructures critiques des réseaux de puissance » thèse de doctorat, institut national polytechnique de Grenoble, 2006.
- [11] http://fr.wikipedia.org/wiki/Production_décentralisée
- [12] **Commission Ampère** « Evaluation de la production décentralisée, effets sur le réseau ». Rapport de synthèse de la commission, Bruxelles, Octobre, 2000.
- [13] **T. Thu Pham** « Influence de la production décentralisée sur la gestion des infrastructures critiques des réseaux de puissance » thèse de doctorat, institut national polytechnique de Grenoble, 2006.
- [14] **Olivier RICHARDOT** « Réglage Coordonné de Tension dans les Réseaux de Distribution à l'aide de la Production Décentralisée » thèse de doctorat, octobre 2006
- [15] **O. Frido** « Report on Renewable Energies ». Rapport ETSO, Bruxelles, Décembre 2003.

- [16] **M. Fontela, T.T. Ha Pham, C. Andrieu, Y. Besanger, S. Bacha, N. Hadjsaid**, « Distributed Generation as a means to increase system robustness ». Deliverable D1.3 of ENK5-CT-2002-00673 Projet Européen CRISP.
- [17] **R. Caire**. « Gestion et Stratégies de conduite de la Production Décentralisée », Thèse de Doctorat INP Grenoble, Avril 2004.
- [18] **J.F. Canard**. « Impact de la génération d'Énergie Dispersée dans les réseaux de distribution », Thèse de Doctorat INP Grenoble, Décembre 2000.
- [19] **S. Martino**. « Caractéristiques des moyens de production ». Notice Technique IDEA NTe/Sy2/01/001/A. Grenoble 2001.
- [20] **B. Issam**. « Identification des éléments d'une centrale électrique thermique Approche multi-modèle ». Université Badji Mokhtar, Annaba, année 2010.
- [21] **Cong Duc PHAM** « Détection et localisation de défauts dans les réseaux de distribution HTA en présence de génération d'énergie dispersée » Thèse de doctorat INPG, 2005.
- [22] **A. Gupta and D.K. Jain**, « Some Investigations on Recent Advances in Wind Energy Conversion Systems », IPCSIT, Vol. 28, pp. 47 – 52, IACSIT Coimbatore Conferences, Press, Singapore, 2012.
- [23] **Trinh Trong Chuong**, « The Impact of Wind Power Plant with Doubly Fed Induction Generator on the Power Systems », International Journal of Science and Technology Education Research, Vol. 4, N°1, pp. 1-10, 2013.
- [24] **M.J. Kadhim and D.S. Chavan**, « Improvement Fault-ride Through of DFIG Based Wind turbines by using a Series Compensation Technology with Emphasis Put on the Mitigation of Voltage Dips », International Journal of Recent Technology and Engineering, Vol. 2, N°2, pp. 212 – 216, 2013.
- [25] **HARITZA CAMBLONG** « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable » thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers Bordeaux, France, 2003.
- [26] **ARTHOUROS ZERVOS, SVEN TESKE** « Perspectives mondiales de l'énergie éolienne 2006 » Rapport sur la situation Globale, Paris, septembre 2006.
- [27] **K. Vinothkumar, M.P. Selvan**, « Novel scheme for enhancement of fault ride-through capability of doubly fed induction generator based wind farms, Energy Conversion and Management », Vol. 52, pp. 2651–2658, 2011.
- [28] **N. Kaspadji.Merzouk, M. Merzouk**, « Perspectives du pompage éolien en Algérie » Projet National de recherche, domicilié au CDER Alger 2008.

- [29] **G. DJAMEL et A. SAMIR**, « Eolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation », Mémoire d'ingénieur Université Abderrahmane Mira de Bejaia ,2007.
- [30] **N. GHEDBANE ET A. MEDJADI**, « Commande de la Machine Asynchrone à Double Alimentation à base d'un régulateur RST », Mémoire d'ingénieur université Med Boudiaf de M'silla ,2005.
- [31] **N. Hadjsaid**, « Les réseaux électriques de distribution de la production décentralisée aux Smart grids », LAVOISIER, 2010, rue Lavoisier 75008 Paris.
- [32] **UEM**, « Liste des études à mener pour le raccordement d'un utilisateur HTA aux réseaux publics de distribution » Référentiel technique HTA et BT 2005.
- [33] <http://www.retscreen.net>
- [34] **D.R. Mocanu**, « Résistance des matériaux », Editura Tehnica, Bucuresti, roumain,1980
- [35] **X. Xiaoning, Z. Xuesong**, « The study of energy storage technology application in wind power integration », Applied mechanics and materials, 2013.
- [36] **Y. Gao, S. E. Gay, M Ehsani, R.F. Thelen, R.E. Hebner**, « Flywheel Electric Drive Characterization for Hybrid Vehicles », international journal of electrical engineering in transportation, vol. 1, no. 1, 2005.
- [37] **H. Nasir Aghdam**, « Analysis of Static Synchronous Series Compensators (SSSC), on Congestion Management and Voltage Profile in Power System by PSAT Toolbox », Islamic Azad University, Ahar, Iran, June 15, 2011
- [38] **P.C. Butler**, « Battery Energy Storage for Utility Application: Phase I-Opportunities Analysis», Report SAND95-2605, Sandia National Laboratories, novembre 1995.
- [39] **Accumulateur**, « 40MW pendant 7minutes, Revue de l'électricité et de l'électronique » -REE, n°10, novembre 2003, pp .8.

Résumé :

La production décentralisée introduit des changements radicaux sur les métiers de la génération, du traitement et de la distribution de l'énergie électrique et remet en cause la planification, la conception, le fonctionnement et l'exploitation de ces réseaux. Dans le présent travail, on étudie l'intégration des productions décentralisées aux réseaux électriques et on présente également le principe de fonctionnement, la façon d'interconnexion, et l'impact sur stabilité et transit de puissance des réseaux électriques.

Mots-clés : production décentralisée, réseau électrique, éolienne, interconnexion.

ملخص

الانتاج اللامركزي يدخل تغييرات جذرية في مجال توليد ومعالجة وتوزيع الطاقة الكهربائية وي طرح التساؤلات في مجال التخطيط والابتكار، وتشغيل واستغلال هذه الشبكات. في العمل الحالي، نقدم دراسة لدمج الجيل اللامركزي إلى الشبكة، مثل طاقة الرياح وأيضاً مبدأ العمل، وكيفية ربط وتأثير ذلك على استقرار الشبكة وتدفق الطاقة الكهربائية.

الكلمات المفتاحية:

الانتاج اللامركزي، الشبكات الكهربائية، طاقة الرياح، ربط.