

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique  
Université A. Mira de Bejaïa  
Faculté de Technologie  
Département de Génie Electrique



## **Mémoire de Fin d'Etudes**

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique  
Option : Réseau électrique

### **Thème**

**Etude de la stabilité transitoire de la tension et de la  
fréquence d'un réseau de distribution face à  
l'intermittence de la production**

### **Réalisé par :**

M<sub>r</sub> GANOUN Smail

M<sub>r</sub> LALAOUI Youba

### **Devant le jury compose de :**

Pr Mejdoub. abdellah

M zidane. néelatri fatiha

### **Encadré par :**

Dr A. BOUZIDI

Promotion 2020 - 2021

## **Remercîment**

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à notre encadreur, Dr Bouzidi athmane. Je le remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé, conseillé et suivie.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions durant mes recherches.

A travers ce mémoire, j'adresse mes reconnaissances à tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation depuis la première classe du primaire jusqu'à aujourd'hui, ainsi qu'à tous la promotion 2021 de la spécialité réseaux électrique.

Enfin Je tiens à témoigner toute ma gratitude à mes parents pour leur confiance et leur support inestimable qui sans eux nous ne serions pas là aujourd'hui. Nous vous remercions pour votre éducation, votre patience et tous les moyens mis à notre disposition pour notre réussite.

## Dédicace

Je dédie ce travail à mes parents qui m'ont soutenue et encouragé durant ces années d'études, qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

A mes deux frères Salim et Didine qui m'ont beaucoup encouragé pendant mon parcours je trouve du courage quand je les regarde il me donne de la niaque pour réussir pour eux.

Je dédie aussi à mes grands-parents, mes tantes et oncles, mes cousins et cousines, le reste de la famille et tous ceux qui ont partagé avec moi tous les moments lors de la réalisation de ce travail.

A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé et à qui je souhaite plus de succès.

A tous ceux que J'aime.

## Dédicace

Je dédie ce mémoire plus particulièrement à mes parents qui m'ont soutenue et encouragé depuis le début, Je leur dédie ce travaille pour leur exprimer toute ma reconnaissance et ma gratitude et que je les aime.

A mes deux frères Zidane et Kussil, à mes grands-parents et a Ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours. A ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.

# SOMMAIRE

<b>I. STRUCTURE ET ELEMENTS DES RESEAUX ELECTRIQUES.....</b>	<b>5</b>
<b>I.1. Introduction.....</b>	<b>5</b>
<b>I.2. Définition du réseau électrique.....</b>	<b>5</b>
<b>I.3. Fonctionnement du réseau électrique .....</b>	<b>6</b>
<b>I.4. Description du réseau électrique .....</b>	<b>6</b>
I.4.1 La Production .....	7
I.4.2. Réseaux de transport .....	8
I.4.3. Réseaux de répartition .....	8
I.4.4. Réseaux de distribution .....	9
<b>I.5. Topologies des réseaux électriques.....</b>	<b>10</b>
I.5.1. Réseau maillé .....	10
I.5.2. Réseau bouclé.....	11
I.5.3. Réseau radial .....	11
I.5.4. Réseau arborescent .....	12
<b>I.6. Réseau de transport et d'interconnexion.....</b>	<b>12</b>
<b>I.7. Postes de transformation.....</b>	<b>13</b>
<b>I.8. Services Système .....</b>	<b>13</b>
I.8.1. LA RÉSERVE PRIMAIRE .....	13
I.8.2. LA RÉSERVE SECONDAIRE.....	13
<b>I.9. Niveaux de tensions dans les réseaux électriques.....</b>	<b>14</b>
<b>I.10. Protection.....</b>	<b>14</b>
I.10.1 La protection de découplage.....	14
I.10.2 Le but de la protection de découplage .....	14
<b>I.11. Marché de l'électricité .....</b>	<b>15</b>
<b>I.12. Conclusion .....</b>	<b>16</b>
<b>II. PRODUCTION D'ENERGIE ELECTRIQUE ET PERTURBATION DES RESEAUX ELECTRIQUES.....</b>	<b>18</b>
<b>II.1. Introduction .....</b>	<b>18</b>
<b>II.2. La Production .....</b>	<b>19</b>
II.2.1. Production centralisée .....	19
II.2.2. L'énergie fossile .....	19
<b>II.3. Définition des productions décentralisées .....</b>	<b>23</b>

<b>II.4. Caractéristiques de Production Décentralisée.....</b>	<b>24</b>
II.4.1. Systèmes à alternateurs classiques (machine synchrone).....	24
II.4.2. Systèmes à générateurs asynchrones.....	24
II.4.3. Systèmes à interface avec convertisseur électronique.....	24
<b>II.5. Les différentes ressources renouvelables .....</b>	<b>25</b>
II.5.1. L'énergie hydroélectrique .....	25
II.5.2. L'énergie photovoltaïque .....	25
II.5.3. La biomasse .....	26
II.5.4. L'énergie éolienne.....	26
II.5.5. Energie des courants de marée.....	27
II.5.6. Géothermie.....	27
<b>II.6. Intégration des énergies renouvelables au réseau de distribution.....</b>	<b>28</b>
<b>II.7. Impact de l'intégration des producteurs décentralisés au réseau HTA.....</b>	<b>29</b>
II.7.1. LES INTERETS DE LA DG .....	29
II.7.2. Impact sur le plan de protection .....	29
II.7.3. Impact sur profil de tension.....	30
<b>II.8. Impact sur le sens du transit de puissance.....</b>	<b>32</b>
<b>II.9. Impact sur la stabilité du système.....</b>	<b>33</b>
II.9.1. Impact sur la qualité de service .....	33
II.9.2. Impact sur l'observabilité et la contrôlabilité du système .....	33
II.9.3. Impact sur la continuité de service .....	33
II.9.4. Impacts sur le plan de protection.....	33
<b>II.10. Effet sur la fréquence du réseau .....</b>	<b>34</b>
II.10.1. Contraintes de raccordement des éoliennes.....	34
II.10.2. Réglage de la fréquence .....	35
II.10.3. Couplage et perturbations .....	35
<b>II.11. Conclusion.....</b>	<b>36</b>
<b>III. REGLAGE DE LA FREQUENCE ET REGLAGE DE LA TENSION ...</b>	<b>38</b>
<b>III.1. Introduction .....</b>	<b>38</b>
<b>III.2. La consommation.....</b>	<b>38</b>
<b>III.3. Paramètres influençant la consommation d'électricité.....</b>	<b>39</b>
III.3.1. Météorologie.....	39
III.3.2. Activité économique .....	39
III.3.3. Horaire légal .....	40
III.3.4. Evénements exceptionnels .....	40
III.3.5. Effet ramadhan.....	40
<b>III.4. Adaptations de la consommation à la production .....</b>	<b>40</b>
<b>III.5. Définition de la fréquence .....</b>	<b>41</b>
<b>III.6. Stabilité de la fréquence .....</b>	<b>41</b>

<b>III.7. Valeur de la fréquence .....</b>	<b>41</b>
<b>III.8. Types de variation de la fréquence .....</b>	<b>42</b>
<b>III.9. Ecrroulement de fréquence .....</b>	<b>44</b>
<b>III.10. Régulation de la fréquence d'un réseau électrique.....</b>	<b>46</b>
III.10.1. Réglage primaire.....	46
III.10.2. Réglage secondaire .....	49
III.10.3. Réglage tertiaire .....	50
III.10.4. Calcule de la déviation de la fréquence du logiciel PSAT .....	51
<b>III.11. Réglage de la tension .....</b>	<b>54</b>
III.11.1. Réglage primaire de tension .....	55
III.11.2. Réglage secondaire de tension .....	55
III.11.3. Réglage tertiaire de tension.....	55
<b>III.11. Conclusion .....</b>	<b>56</b>
 <b>IV. REGLAGE DE LA TENSION ET DE LA FREQUENCE SUR UN RESEAU ET RESULTATS .....</b>	 <b>58</b>
<b>IV.1. introduction .....</b>	<b>58</b>
<b>IV.2. PSAT comme outil de simulation .....</b>	<b>59</b>
IV.2.1. Fenêtre de PSAT.....	60
IV.2.2. Editeur de PSAT et Bibliothèque de SIMULINK .....	60
IV.2.3. Utilisation de PSAT.....	61
<b>IV.3. Méthodologie .....</b>	<b>62</b>
IV.3.1. Placement du DG (Génération d'énergie dispersée (Distrbuted generation)).....	62
IV.3.2. Mesure de la fréquence sur PSAT .....	62
<b>IV.4. Simulation.....</b>	<b>64</b>
IV.4.1. Présentation des réseaux et ses caractéristiques .....	64
<b>IV.5. Simulation, résultats et interprétation .....</b>	<b>66</b>
IV.5.1. Réseau de 33 JDB IEEE standard sans aucun DG .....	66
IV.5.2. Intégration au JDB 18 du réseau d'une DG soumise à une intermittence de 25%,50% et 75%. .....	67
IV.5.3. Amélioration de stabilité de la fréquence du réseau de 33JDB IEE avec diminution et augmentation de puissance.....	76
<b>IV.6. Conclusion .....</b>	<b>85</b>
 <b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	 <b>86</b>

# Liste des figures

Figure I.1. Structure générale d'un réseau électrique.[1].....	5
Figure I.2. Vue globale du réseau électrique. [2].....	6
Figure I.3. Conversion d'énergie [3] .....	8
Figure I.4. Différentes topologies des réseaux électriques [5].....	10
Figure I.5. Schéma simplifiée d'un réseau maillé. [6].....	11
Figure I.6. Schéma réseau radial. [6].....	12
Figure II.1. Centrale thermique [15].....	20
Figure II.2. Centrale électrique à gaz [14].....	21
Figure II.3. Centrale nucléaire [15] .....	21
Figure II.4. Centrale à cycles combinés. [15].....	22
Figure II.5. Centrale diesel [14] .....	22
Figure II.6. Schéma en coupe d'un barrage hydroélectrique [19] .....	25
Figure II.7. Énergie éolienne [22] .....	26
Figure II.8. Principe de fonctionnement des courants de marée [16] .....	27
Figure II.9. Influence de la production décentralisée sur la sélectivité de la protection des réseaux de distribution. [22].....	30
Figure II.10. Aveuglement de la protection du départ en défaut [22].....	30
Figure II.11. Sens de transit de puissance dans e réseau de distribution avant et après l'insertion des DG. [28].....	33
Figure III.1. Fluctuation de la consommation en « J » et « J-1 » en franc le 18/08/10 [32].....	39
Figure III.2. Maintien de la fréquence [34] .....	42
Figure III.3. Variations normales de fréquence. [34].....	43
Figure III.4. Variations globales de fréquence.[34].....	43
Figure III.5. Les fortes variations de fréquence.[34] .....	44
Figure III.6. Evolution de la fréquence en fonction du niveau de production / consommation.[35].....	46
Figure III.7. Statisme de la puissance active et de la fréquence. [36] .....	52
Figure IV.1. Fenêtre de PSAT [41].....	60
Figure IV.2. L'éditeur de PSAT [42].....	60
Figure IV.3. Bibliothèque de simulink [42].....	61
Figure IV.4. Organigramme du placement de la DG.....	62
Figure IV.5. Bloc de mesure de fréquence [41].....	63
Figure IV.6. Représentation simplifiée du réseau radial de distribution IEEE 33 accès.....	65
Figure IV.7. Représentation du réseau radial IEEE 33 accès radial. ....	66
Figure IV.8. Profil de tension des jeux de barre pour le réseau radial sans DG.....	67
Figure IV.9. Courbe de variation $f-\lambda$ de la fréquence et courbes de charge (P-V) sans DG. ....	67
Figure IV.10. Profil des tensions des JDB dans les conditions climatiques normales sans intermittence de la DG. ....	68
Figure IV.11. Profil de la tension sans et avec l'intermittence de la DG (25%,35% et 50%).....	69
Figure IV.12. Régime transitoire de la déviation de la fréquence $\Delta f$ dû à l'intermittence de la production de la DG (diminution de 25% ,50%et75%).....	70
Figure IV.13. Régime transitoire des tensions des JDB dû à l'intermittence de la production de la DG (diminution de 25%,50%et 75%).....	70
Figure IV.14. Profil de la tension sans et avec l'intermittence de la DG (25%,50% et 75%).....	71
Figure IV.15. Régime transitoire de la déviation de la fréquence $\Delta f$ dû à l'intermittence de la production de la DG (augmentation de 25% ,50%et75%).....	73
Figure IV.16. Régime transitoire des tensions des JDB dû à un a l'intermittence de la DG (augmentation de 25%,50%et75%) ...	74
Figure IV.17. Profil des tensions des JDB dans les conditions climatiques normales sans intermittence de la DG .....	77
Figure IV.18. Profil de la tension sans et avec l'intermittence de la DG (25%,50% et 75%).....	77
Figure IV.19. Régime transitoire de la déviation de la fréquence $\Delta f$ dû à l'intermittence de la production de la DG (diminution de 25% ,50%et75%).....	78
Figure IV.20. Régime transitoire des tensions des JDB dû à l'intermittence de la production de la DG (diminution de 25%,50%et 75%).....	79
Figure IV.21. Profil de la tension sans et avec l'intermittence de la DG (25%,50% et 75%).....	80
Figure IV.22. Régime transitoire de la déviation de la fréquence $\Delta f$ dû à l'intermittence de la production de la DG (augmentation de 25% ,50%et75%).....	81
Figure IV.23. Régime transitoire des tensions des JDB dû à un a l'intermittence de la DG (augmentation de 25%,50%et75%) ...	82



## Liste des tableaux

Tableau III.1. Limites de fonctionnement du réseau de distribution. ....	54
Tableau IV.1. Tensions de chaque JDB avant et après la diminution et de l'augmentation de la DG (25%,50%et75%).....	74
Tableau IV.2. Tensions de chaque JDB avant et après la diminution et de l'augmentation de la DG (25%,50%et75%).....	83

## Liste des abréviations

- $j$ : Inertie de l'arbre de la turbine [kg.m<sup>2</sup>] ;
- $\Omega_t$ : Vitesse angulaire de la turbine [rad.s<sup>-1</sup>] ;
- $T_m$ : Couple moteur [Nm] ;
- $T_e$ : Couple résistant [Nm] ;
- $P_m$ : Puissance produite [MW] ;
- $P_C$ : Puissance consommée [MW] ;
- $P_j$ : Puissance réelle fournie par l'entité de réserve  $j$  en mode quasi stationnaire [MW] ;
- $P_{c j}$ : Puissance de consigne de l'entité de réserve  $j$  à la fréquence de référence  $f_0$  [MW] .
- $f$ : Fréquence déduite de la mesure de vitesse d'une unité de production  $j$  synchrone ou fréquence mesurée localement sur le réseau [Hz] ;
- $f_0$ : Fréquence de consigne, généralement égale à la fréquence de référence (50 Hz);
- $K_j$ : Energie réglant de l'entité de réserve  $j$  [MW/Hz] ;
- $\sum K_j$ : Energie réglant totale du système européen synchrone [MW/Hz] ;
- $P(t)$ : La puissance active produite à l'instant  $t$  ;
- $\Delta f(t)$ : L'écart de fréquence au même instant ;
- $N(t)$ : La valeur du niveau ;
- $P_0$ : Le programme de marche de l'installation ;
- $K$ : Gain primaire ;
- $P_r$ : Engagement de participation au réglage secondaire ;
- $m_p$ : Le coefficient de chute ;
- $PL_0$ : La puissance active nominale ;
- $V$  et  $V_0$ : respectivement la tension réelle et de référence ;
- $f_0$ : La fréquence nominale ;
- $K_p L$ : Le coefficient de dépendance de la fréquence de la charge ;
- $\alpha$ : Le coefficient de dépendance de la tension de la puissance active ;

$G_{ij}$  et  $B_{ij}$  : Respectivement les parties réelle et imaginaire du  $(i, j)$  ème élément de la matrice d'admittance ;

$P_{\text{ploss}}$  : Les pertes réelles ;

$P_{\text{is}}$  : La puissance injecté ;

$K_i$  : Facteur de participation ;

DG : génération d'énergie distribuée ;

### Introduction générale :

Le rôle de l'énergie électrique dans le développement économique des nations n'est plus à démontrer. Depuis la révolution industrielle de 1780, basée sur l'utilisation de nouvelles sources d'énergie dont l'énergie électrique, cette dernière est considérée comme la deuxième révolution qui a changé toutes les habitudes de l'activité humaine.

Les réseaux électriques autonomes situés en régions éloignées produisent principalement l'électricité à partir de combustibles fossiles. Or ces derniers sont coûteux en plus de leur impact très négatif sur l'environnement. L'intégration de sources d'énergie renouvelable tels que le solaire et l'éolien constituent une solution écologique aux besoins énergétiques des communautés et des sites industriels isolés. Idéalement, l'énergie requise devrait être entièrement produite à partir de sources d'énergie renouvelable. Toutefois, l'intégration d'une grande quantité d'énergies renouvelables pose certains défis à l'exploitation du réseau électrique.

L'intégration des énergies renouvelables constitue l'un des enjeux les plus structurants pour l'évolution du système électrique dans les années à venir. Ainsi, il est indispensable de faire évoluer les modes d'exploitation des réseaux électriques les rendant toujours plus intelligents et de renforcer la coordination entre les réseaux électriques à l'échelle des continents. En outre il convient de développer un réseau de transport adapté et interconnecté de façons à tirer parti des complémentarités énergétiques existantes au sein des zones géographiques distinctes.

La stabilité de la fréquence d'un système de puissance se définit par la capacité du système à maintenir sa fréquence proche de sa valeur nominale suite à une perturbation menant par conséquent à un déséquilibre entre les puissances produites et consommées. Le maintien de la fréquence à sa valeur nominale dans un système de puissance est lié à l'équilibre global entre les puissances actives produites et consommées (y compris les pertes).

La stabilité de la tension quant à elle est un problème local, elle est définie par la capacité du système de puissance à maintenir les niveaux de tensions des JDB des différentes zones du réseau électriques dans les limites fixées ( $V_{min}$  et  $V_{max}$ ). Le problème de la stabilité de la tension peut-être dû à une surcharge du réseau, au transport excessif du courant réactif ou à une perturbation dans le réseau telle que les défauts ou la perte d'un élément.

Les énergies renouvelables (éolienne et solaire) malgré leur contribution en apport d'énergie et leur participation à l'équilibre production-consommation présentent un double inconvénient :

- Elles sont aléatoires, car elles dépendent des phénomènes naturels hors du contrôle de l'homme ;
- La densité de production est faible, c'est-à-dire que les fermes solaires ou éoliennes sont dispersées sur le territoire national.

Une première nécessité, déjà largement perçue, est de disposer de capacités de réserve de type "centrales thermiques" ou d'énergie stockée de types batteries ou bassins d'eau qui puissent être démarrées ou stoppées dans de très brefs délais.

Mais il y'a une autre conséquence moins évidente sur les adaptations que les fluctuations de production induisent sur le réseau en perturbant la stabilité. Cette dernière se contrôle par le maintien de la fréquence du réseau autour de 50 Hz +- 0.5 (ou 60 Hz dans certains pays anglo-saxons). Elle est affectée par les variations dans la puissance raccordée qui doit à tout instant être égale à la puissance appelée par les utilisateurs. Pour la tension, elle consiste à maintenir la tension des JDB de toutes les zones dans une marge +- 5 % entre  $V_{min}$  et  $V_{max}$ .

Notre travail consiste en l'étude de l'impact de l'intermittence de la production distribuée (DG) sur le profil de la tension et de la stabilité de la fréquence du réseau électrique.

Nous commençons notre travail par une introduction générale, le premier chapitre consiste en la présentation, la description et le fonctionnement du réseau électrique, suivi par la présentation de ces topologies, de ces composants et de sa protection, nous terminons le chapitre par la définition du marché de l'électricité et ces acteurs.

Le chapitre 2 présente les productions centralisés et décentralisés et leurs caractéristiques suivi par les différentes ressources renouvelables, leur intégration au réseau de distribution et leur impact sur le sens du transit, sur la stabilité du système et leurs effets sur la fréquence du réseau.

Le chapitre 3 est réservé à l'équilibre production-consommation, nous avons commencé par introduire les paramètres influençant la consommation et son adaptation par rapport à la production. On présentera enfin les différents réglages de la fréquence et de la tension.

Dans le dernier chapitre, on a présenté une simulation du réseau radial IEE-33 JDB sans et avec production distribuer. En augmentant et en diminuant la production intégrée, nous allons simuler l'intermittence de la DG et nous allons étudier son impact sur la déviation de fréquence et de la tension. Une amélioration de la fréquence et des profils de tensions des JDB a été

proposée. Toutes les simulations sont effectuées sur MATLAB avec l'outil d'analyses des réseaux électriques (PSAT).

Nous terminons notre travail par une conclusion générale et des perspectives.

# **Chapitre I**

## **Structure et éléments des réseaux électriques**

## **I. Structure et éléments des réseaux électriques**

### **I.1. Introduction**

L'énergie électrique est très présente dans la vie quotidienne de pratiquement tous les habitants de la planète. Les pays fortement industrialisés, en particulier, consomment une partie importante de leur énergie sous forme électrique pour sa facilité de transport, son rendement fort et son prix abordable.

Le réseau électrique est un ensemble d'infrastructures qui relie l'énergie électrique à partir de centres de production vers les consommateurs d'électricité.

Il est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles par des postes électriques. Ces derniers permettent de répartir l'électricité et de la faire passer d'une tension à l'autre grâce aux transformateurs.

Dans ce chapitre nous allons définir un réseau électrique et donner son historique à travers le temps et à la fin nous présentons les différentes structures et architectures du réseau électrique.

### **I.2. Définition du réseau électrique**

Un réseau électrique englobe les lignes et les postes électriques, ainsi que les transformateurs. Il s'agit d'un ensemble d'équipements qui transporte l'énergie du lieu de production aux consommateurs. [1]

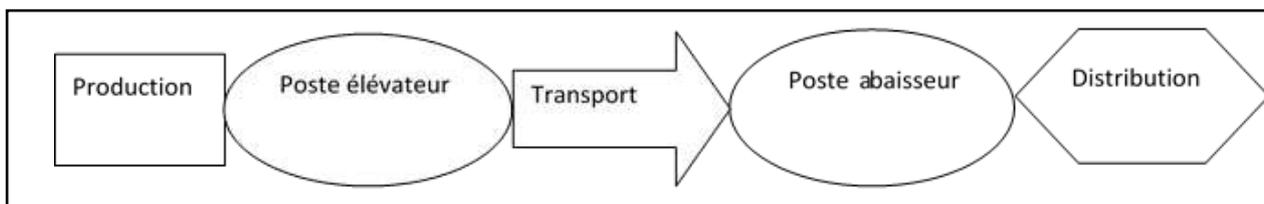


Figure I.1. Structure générale d'un réseau électrique.[1]

L'organisation entre chacun de ces blocs est décrite sur la figure ci-dessus :

- ❖ Le bloc production électrique, regroupant l'ensemble des éléments des unités de production, tels que les alternateurs, les moteurs, les turbines etc...
- ❖ Les blocs poste élévateur abaisseur regroupant l'ensemble des éléments pouvant transformer l'énergie par changement de niveau de tension.
- ❖ Les blocs transport et distribution regroupant l'ensemble des éléments d'acheminement d'énergie électrique vers les consommateurs.

Pour satisfaire les consommateurs, on suggère qu'il est nécessaire d'investir dans un système électrique pour minimiser les défaillances ou les interruptions dans le but d'améliorer la fiabilité du système. Dans une perspective à long terme, il est important que les investissements soient choisis afin de minimiser les coûts de l'atteinte de la fiabilité.

### **I.3. Fonctionnement du réseau électrique**

L'électricité produite par les centrales est d'abord acheminée sur de longues distances dans des lignes à haute tension (HTB) gérées par la RTE (Réseau de Transport d'Électricité). Elle est ensuite transformée en électricité à la HTA pour pouvoir être acheminée par le réseau de distribution. Cette transformation intervient dans les postes sources. Une fois sur le réseau de distribution, la HTA alimentera directement les clients industriels. Pour les autres clients (particuliers, commerçants, artisans...), elle est convertie en basse tension (BT) par des postes de transformation avant d'être livrée. Au final, la qualité de l'alimentation en électricité des utilisateurs du réseau est donc le résultat de la qualité de tout ce parcours. [2]

### **I.4. Description du réseau électrique**

Le réseau électrique est un « système » très complexe. Il comprend des milliers de composants générateurs, transformateurs, lignes, contrôleurs, systèmes de protection, etc. [2]

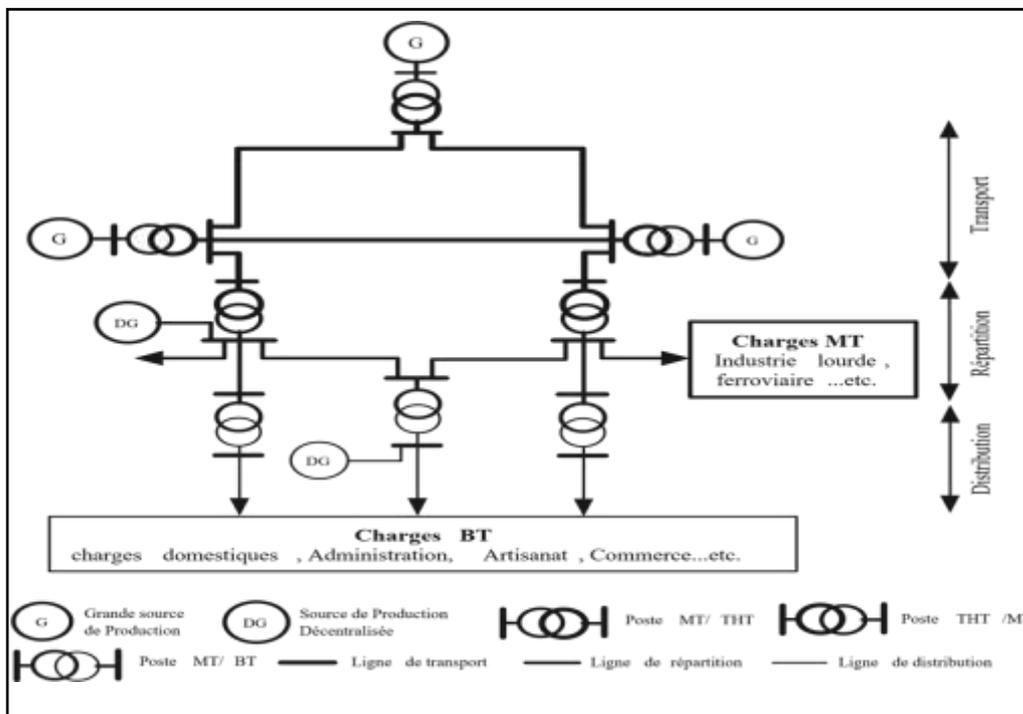


Figure I.2. Vue globale du réseau électrique. [2]

Le réseau électrique est constitué de :

- ❖ Centrales électriques ou station de production
- ❖ Réseaux de transport et d'interconnexion
- ❖ Réseaux de répartitions
- ❖ Réseaux de distribution.

### **I.4.1 La Production**

Elle constitue entre 35 et 50% du coût total de l'électricité fournie aux consommateurs, elle fait appel à différents types de principes (figure.I.3).

Le principe de conversion où la centrale de production de l'électricité convertit une source d'énergie primaire en énergie électrique. Les moyens de production d'énergie électrique sont très divers chaque type de moyen de production a des caractéristiques techniques et économiques propres.

La source d'énergie primaire est un élément déterminant qui permet de distinguer entre les différentes centrales de production. Ces principes varient aussi selon leurs structures de coût, leurs économies d'échelle et leurs capacités à réaliser leurs fonctions. Une centrale peut regrouper sur un même site plusieurs unités ou tranches de production souvent de même technologie et de même puissance. Chaque unité de production est composée d'une turbine ou moteur et d'un alternateur pour produire de l'énergie électrique. Les turbines ou moteurs peuvent être entraînés à l'aide de différentes sources d'énergie primaire.

Il est à noter que l'énergie électrique n'est pas stockable. Nous distinguons les centrales nucléaires, les centrales thermiques, les centrales hydrauliques, les centrales éoliennes et les centrales solaires. [3]

#### **I.4.1.1 Les différents types de moyen de production**

Une source d'énergie primaire est issue de la nature avant d'être transformé. En cas de non-utilisation de la source primaire dans son état initial, elle est exploitée afin de la transformer en une source d'énergie secondaire utilisable et transportable. [3]

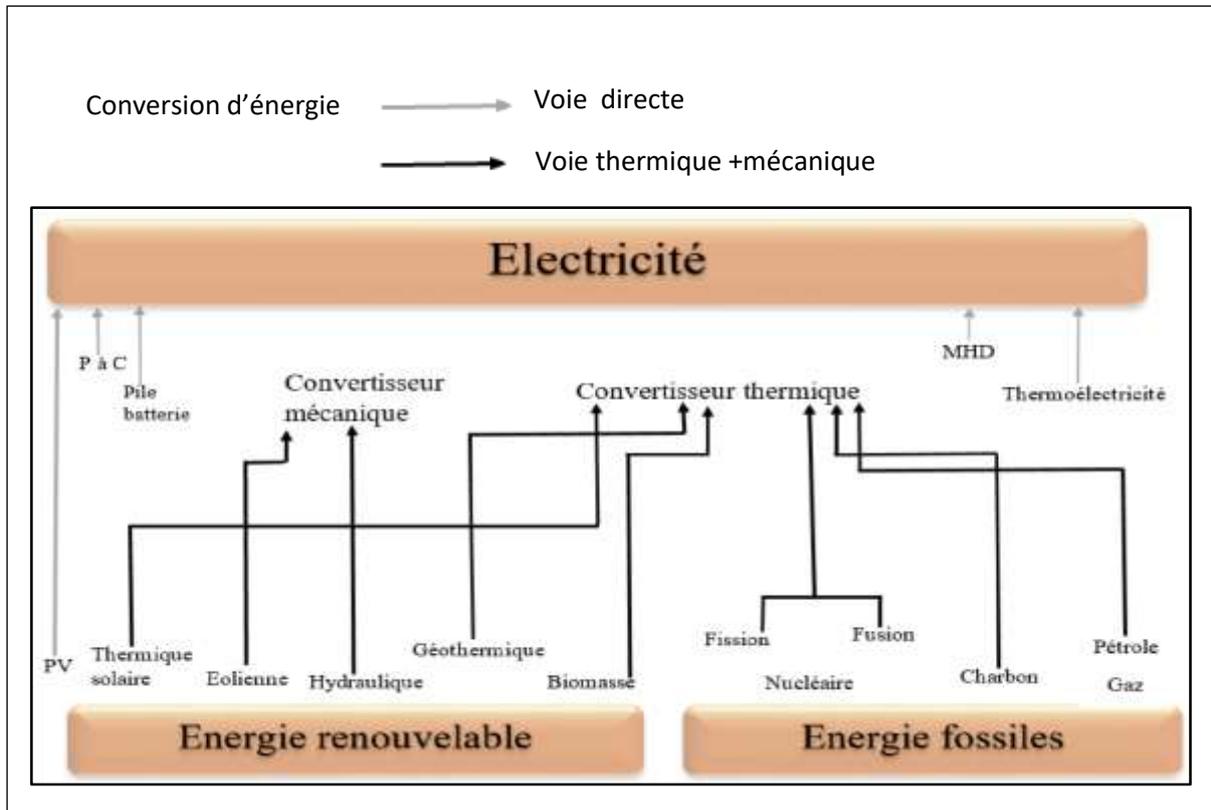


Figure I.3. Conversion d'énergie [3]

### I.4.2. Réseaux de transport

Les réseaux de transport sont à très haute tension (de 150 kV à 800 kV) et ont pour but de transporter l'énergie des grands centres de production vers les régions consommatrices d'électricité. Les grandes puissances transitées imposent des lignes électriques de forte capacité de transit, ainsi qu'une structure maillée (ou interconnectée). Les réseaux maillés garantissent une très bonne sécurité d'alimentation, car la perte de n'importe quel élément (ligne électrique, transformateur ou groupe de production) n'entraîne aucune coupure d'électricité si l'exploitant du réseau de transport respecte la règle dite du "N-1" (possibilité de perdre n'importe quel élément du réseau sans conséquences inacceptables pour les consommateurs). [4]

### I.4.3. Réseaux de répartition

Les réseaux de répartition sont à haute tension (de l'ordre de 30 à 150 kV) et ont pour but d'assurer à l'échelle régionale la fourniture d'électricité. L'énergie y est injectée essentiellement par le réseau de transport via des transformateurs, mais également par des centrales électriques de moyennes puissances (inférieures à environ 100 MW). Les réseaux de répartition sont distribués de manière assez homogène sur le territoire d'une région.

Ils ont une structure à la fois maillée et bouclée suivant les régions considérées. Contrairement aux réseaux de transport qui sont toujours bouclés (afin de pouvoir assurer un

secours immédiat en N-1), les réseaux de répartition peuvent être exploités bouclés ou débouclés selon les transits sur le réseau (débouclé signifie qu'un disjoncteur est ouvert sur l'artère, limitant ainsi les capacités de secours en N-1). Les problèmes de report de charge se posent également pour le réseau de répartition, sa conduite est donc assurée en coordination avec celle du réseau de transport et nécessite également des moyens de simulation en temps réel. [4]

### **I.4.4. Réseaux de distribution**

Les réseaux de distribution ont pour but d'alimenter l'ensemble des consommateurs. Il existe deux sous niveaux de tension :

#### **I.4.4.1. Réseaux à moyenne tension MT (de 3 à 33 kV)**

Les réseaux à basse tension (de 110 à 600 V), sur lesquels sont raccordés les utilisateurs domestiques. Contrairement aux réseaux de transport et de répartition, les réseaux de distribution présentent une grande diversité de solutions techniques à la fois selon les pays concernés, ainsi que selon la densité de population.

Les réseaux à moyenne tension (MT) ont de façon très majoritaire une structure arborescente, qui autorise des protections simples et peu coûteuses : à partir d'un poste source (lui-même alimenté par le réseau de répartition), l'électricité parcourt une artère (ou ossature) sur laquelle sont reliées directement des branches de dérivation au bout desquelles se trouvent les postes MT/BT de distribution publique, qui alimentent les réseaux basse tension (BT) sur lesquels sont raccordés les plus petits consommateurs. La structure arborescente de ces réseaux implique qu'un défaut sur une ligne électrique MT entraînera forcément la coupure des clients alimentés par cette ligne, même si des possibilités de secours plus ou moins rapides existent.

Les ossatures des réseaux à moyenne tension (MT) européens ne sont constituées que des 3 phases, alors qu'en Amérique du Nord le fil de neutre est également distribué (3 phases + 1 neutre). Les dérivations MT quant à elles peuvent être constituées de 1 fil (cas de l'Australie où le retour de courant s'effectue par la terre) à 4 fils (cas des États-Unis), ou encore systématiquement 3 fils (les 3 phases) comme le réseau français.

Les réseaux MT aériens sont majoritaires en zone rurale, où la structure arborescente prédomine largement. Par contre en zone urbaine les contraintes d'encombrement, d'esthétique et de sécurité conduisent à une utilisation massive des câbles souterrains. Les réseaux souterrains étant soumis potentiellement à de longues indisponibilités en cas d'avarie (plusieurs dizaines

d'heures), il est fait appel à des structures en double dérivation ou à des structures radiales débouclées munies d'appareils automatiques de réalimentation, permettant une meilleure sécurité d'alimentation. [4]

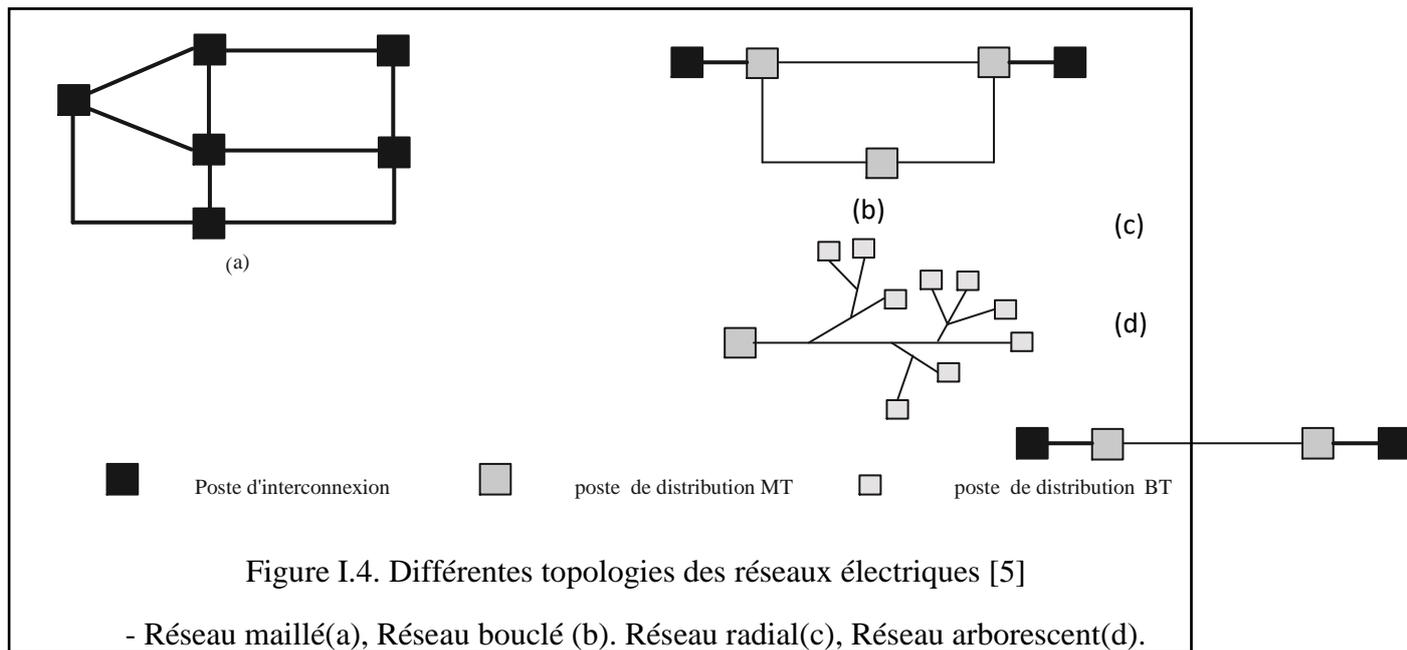
#### **I.4.4.2. Les réseaux BT résultent de la structure des réseaux MT**

En Amérique du Nord les réseaux monophasés sont courants (1 neutre + 1 phase), tandis qu'en Europe la distribution triphasée avec fil de neutre est très majoritaire (1 neutre + 3 phases). La structure arborescente est là aussi de loin la plus répandue, car elle est à la fois simple, bon marché, et permet une exploitation facile. [4]

### **I.5. Topologies des réseaux électriques**

Les topologies diffèrent d'un type de réseau à un autre. Cette topologie est dictée par : le niveau fiabilité recherché, la flexibilité et la maintenance, ainsi que les coûts d'investissement et d'exploitation. [5]

Les différentes topologies qu'on trouve usuellement sont illustrées sur la Figure I.4.



#### **I.5.1. Réseau maillé**

Cette topologie est presque la norme pour les réseaux de transport. Tous les centres de production sont liés entre eux par des lignes THT au niveau des postes d'interconnexion, ce qui forme un maillage. Cette structure permet une meilleure fiabilité mais nécessite une surveillance

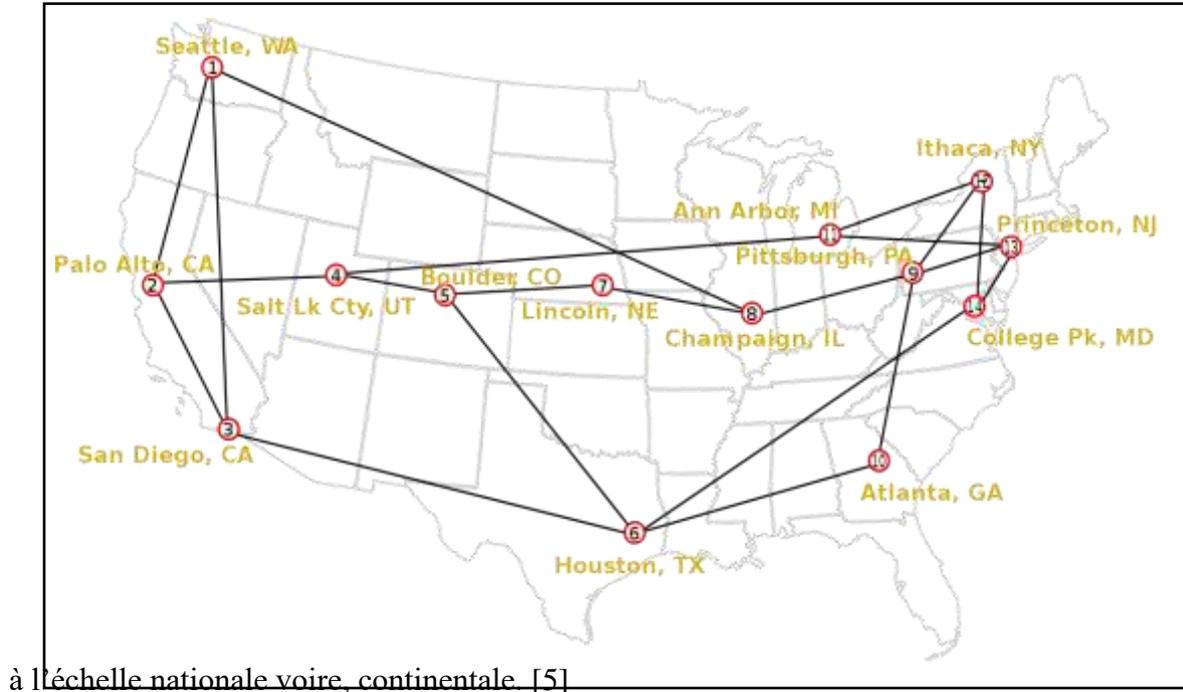


Figure I.5. Schéma simplifiée d'un réseau maillé. [6]

### I.5.2. Réseau bouclé

Cette topologie est surtout utilisée dans les réseaux de répartition et distribution MT. Les postes de répartition HT ou MT alimentés à partir du réseau THT sont reliés entre eux pour former des boucles, ceci dans le but d'augmenter la disponibilité. Cependant, il faut noter que les réseaux MT ne sont pas forcément bouclés. [5]

### I.5.3. Réseau radial

C'est une topologie simple qu'on trouve usuellement dans la distribution MT et BT. Elle est composée d'une ligne alimentée par des postes de distribution MT ou BT alimentés au départ par un poste source HT ou MT. En moyenne tension cette structure est souvent alimentée des deux côtés afin d'assurer la disponibilité. [6]

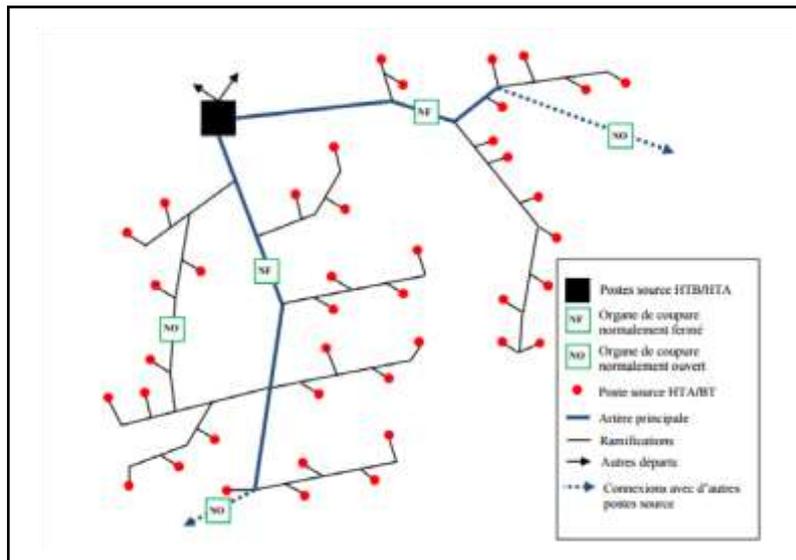


Figure I.6. Schéma réseau radial. [6]

### I.5.4. Réseau arborescent

Cette structure est très utilisée en milieu rural et quelque fois en milieu urbain où la charge n'est pas très sensible aux interruptions. Elle est constituée d'un poste de répartition qui alimente plusieurs postes de distribution (BT) grâce à des piquages à différents niveaux des lignes alimentant les postes MT/BT. [5]

### I.6. Réseau de transport et d'interconnexion

C'est le réseau utilisé pour les centrales ainsi que les lignes et les postes de transformation. Il est capable de transporter l'énergie électrique sur de grandes distances. [7]

Il assure :

- ❖ L'acheminement de l'électricité des centrales de production aux grandes zones de Consommation ;
- ❖ L'interconnexion nationale qui gère les centres de production en orientant la Production en fonction de l'évolution de la demande selon sa répartition géographique et temporelle ;
- ❖ L'interconnexion internationale permettant de gérer des flux d'énergie entre les pays en fonction de la demande de puissance et des pics de consommation de chaque pays ;
- ❖ L'interconnexion du réseau présente principalement trois avantages (La stabilité ; La continuité de service ; Economie)

## **I.7. Postes de transformation**

Un poste électrique est un élément du réseau électrique servant à la fois à la transmission et à la distribution d'électricité. Il permet d'élever la tension électrique pour sa transmission, puis de la redescendre en vue de sa consommation par les utilisateurs (particuliers ou industriels). Les postes électriques se trouvent donc aux extrémités des lignes de transmission ou de distribution.[8]

Ils existent plusieurs types de postes sont :

- ❖ Postes d'interconnexion.
- ❖ Postes en antenne.
- ❖ Postes de distribution.

Niveau de tension des postes :

- ❖ 10 – 60 kv.
- ❖ 400- 220 – 60 kv.
- ❖ 220-150-60-30 kv.
- ❖ 220 –60-30 kv.
- ❖ 60 – 30 kv.

## **I.8. Services Système**

Les services système permettent au gestionnaire du réseau de transport de maintenir en temps réel l'équilibre entre production et consommation du système électrique. Ils sont basés sur deux types de réserves électriques, la réserve primaire et la réserve secondaire [9]

### **I.8.1. LA RÉSERVE PRIMAIRE**

C'est la première réserve à être appelée et elle est activée afin d'arrêter la dérive de la fréquence en reconstituant la puissance manquante. Elle est composée par tous les producteurs d'électricité qui sont connectés au réseau de transport. Elle peut agir à la hausse comme à la baisse. Cette réserve met entre 15 et 30 secondes pour s'activer lors d'un déséquilibre du réseau et est activée de manière automatique. Les producteurs d'électricité doivent garder une partie de leur puissance disponible, au moins 40 MW, pour cette réserve. [9]

### **I.8.2. LA RÉSERVE SECONDAIRE**

La réserve secondaire prend le relais de la réserve primaire et est activée de manière automatique également. Elle est activée pour résoudre la dérive de la fréquence à 50 Hz. La

réserve secondaire est comprise entre 500 et 1 000 MW. Elle peut agir à la hausse comme à la baisse. Cette réserve met entre 30 secondes et 15 minutes pour s'activer lors d'un déséquilibre du réseau. Elle est composée uniquement par les producteurs d'électricité. [9]

### **I.9. Niveaux de tensions dans les réseaux électriques**

Les réseaux électriques sont hiérarchisés. La plupart des pays mettent en œuvre (selon CEI) [10]

- ❖ Un réseau de transport THT 220 ..... 800 kv.
- ❖ Un réseau de répartition HT 60 ..... 170 kv.
- ❖ Un réseau de distribution MT 5 ..... 36 kv.
- ❖ Un réseau de livraison de l'abonné BT 400/230 V.

La nouvelle norme en vigueur UTE C 18-510 définit les niveaux de tension alternative suivant : [11]

- ❖ TBT : pour une tension composée inférieure ou égale à 50 V.
- ❖ BTA : pour une tension composée comprise entre 50 V et 500 V.
- ❖ BTB : pour une tension composée comprise entre 500 V et 1 kv.
- ❖ HTA : pour une tension composée comprise entre 1 kv et 50 kv.
- ❖ HTB : pour une tension composée supérieure à 50 kv.

### **I.10. Protection**

#### **I.10.1 La protection de découplage**

Tout producteur d'électricité, quel que soit l'origine, a le droit d'injecter l'énergie électrique au réseau, à condition qu'il n'en résulte aucune entrave au bon fonctionnement de la distribution.

Il est en outre requis une protection particulière dite « protection de découplage », dont le but est d'interrompre le fonctionnement de l'unité de production lors d'un défaut sur le réseau.

Toute installation photovoltaïque raccordée au réseau HTA, doit en complément de la protection générale (selon la NF C13-100 ou la NF C 14-100), être équipée d'une fonction protection de découplage destinée à la séparer du réseau public de distribution en cas de défaut sur ce réseau. [12]

#### **I.10.2 Le but de la protection de découplage**

Cette protection a pour objet, en cas de défaut sur le réseau de : [12]

- ❖ Eviter d'alimenter un défaut ou de laisser sous tension un ouvrage en défaut,
- ❖ Ne pas alimenter les autres installations raccordées à une tension ou à une fréquence anormale,
- ❖ Permettre les ré enclenchements automatiques des ouvrages du réseau.
- ❖ Arrêter l'injection d'électricité dans le réseau lors des travaux de maintenance du réseau.

### **I.11. Marché de l'électricité**

L'expression « marché de l'électricité » désigne, de façon générale, les différentes formes d'organisation du secteur de la production et de la commercialisation de l'électricité apparus, principalement dans les années 1990, dans la plupart des pays industrialisés, dans le cadre des processus de déréglementation.

Il existe plusieurs acteurs dans le marché de l'électricité de la production à la distribution. L'électricité est négociée et achetée par les fournisseurs aux producteurs avant d'être commercialisée sur le marché de détail puis distribué à travers le réseau de distribution.

Le distributeur est l'exploitant du réseau électrique sur lequel la plupart des clients finaux sont connectés physiquement, en basse ou en moyenne tension. La construction raisonnée des réseaux est du ressort des maîtres d'ouvrages ; il en existe de trois types en France : le concédant et son concessionnaire et des entreprises locales de distribution (régies).

Le développement d'un marché concurrentiel de l'énergie électrique ne passe évidemment pas par la création de multiples réseaux électriques indépendants. Ce serait économiquement et techniquement irréalisable. Pour permettre aux consommateurs de librement choisir leurs fournisseurs d'électricité, il est donc nécessaire de passer d'un système verticalement intégré à un système où les fonctions sont séparées. Producteurs et consommateurs sont donc maintenant des entités différentes. [13]

## **I.12. Conclusion**

Le but de ce chapitre est de faire connaître les différentes topologies des réseaux électriques et le transport de l'énergie électrique acheminée depuis son centre de production jusqu'à son arrivée au consommateur. En effet, ce travail est assuré par le système électrique dont on a présenté dans ce chapitre les différentes manières et structure utilisées pour le réaliser et les grandeurs le définissant.

## **Chapitre II**

# **Production d'énergie électrique et perturbation des réseaux électriques**

## **II. Production d'énergie électrique et perturbation des réseaux électriques**

### **II.1. Introduction**

Les énergies renouvelables (EnR) sont des sources d'énergie dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain. Elles proviennent de phénomènes naturels cycliques ou constants induits par les astres.

Les sources d'énergie utilisables par l'homme sont nombreuses : elles lui fournissent chaleur, lumière et force. L'énergie, essentielle à l'existence humaine, a continuellement transformé la société. Ce document détaille les découvertes liées aux sources d'énergie, depuis l'antiquité jusqu'au 19e siècle.

Alors que les énergies non renouvelables, constituées de substances qui mettent des millions d'années à se reconstituer (par exemple : charbon, gaz, pétrole...), seront probablement épuisées dans quelques dizaines d'années, les énergies renouvelables dont les sources sont presque inépuisables, comme le vent, l'eau et le soleil, sont utilisées depuis des milliers d'années.

La production décentralisée est un domaine nouveau, qui est en plein développement remarquable. Le marché mondial de l'énergie électrique s'élargit grâce aux nouvelles technologies développées, principalement les énergies renouvelables : Elles donnent tant de solutions écologiques et garantissent un rendement satisfaisant. Ces énergies restent tout de même en plein développement pour arriver à des résultats meilleurs.

La production distribuée est utile pour renforcer les réseaux électriques, elle est plus simple, plus pratique et beaucoup moins coûteuse que la production centralisée. Actuellement on dispose de plusieurs technologies qui peuvent fournir une puissance qui peut aller jusqu'à 100MW, reliée généralement au réseau de distribution, et souvent produite pas loin de la consommation, pour lui éviter d'être transportée sur de longs trajets.

Dans ce chapitre, nous allons discuter sur les différentes productions utilisées de nos jours dans le monde, et les différents impacts qu'on rencontre lors de l'intégration des nouvelles énergies dites renouvelables aux réseaux.

### **II.2. La Production**

La production de l'énergie pour des raisons de développement est un processus qui nécessite la mise au point d'une stratégie visant à accroître la qualité des services favorables à booster l'essor économique d'un Etat ou d'une collectivité, mais aussi faciliter les conditions de vie des populations tout en améliorant les conditions de vie sociale élémentaire. Particulier sera porté nous portons un regard sur le système de production de l'énergie électrique à travers le processus de production décentralisé ou centralisé devant conduire à la croissance économique locale. [14]

#### **II.2.1. Production centralisée**

L'énergie électrique est produite par des usines spéciales connues sous le nom de centrales électriques. Une centrale électrique utilise essentiellement un moteur primaire couplé à un alternateur pour la production d'énergie électrique.

L'énergie disponible sous diverses formes à partir de différentes sources naturelles telles que la pression de l'eau, l'énergie chimique des combustibles, l'énergie nucléaire des substances radioactives, etc. peut être converti en énergie électrique par l'utilisation d'arrangements appropriés. Ça consiste essentiellement en un alternateur couplé à un moteur primaire, celui-ci est entraîné par l'énergie obtenue à partir de différentes sources telles que la combustion du carburant, la pression de l'eau, la force du vent, etc. De même, d'autres formes d'énergie peuvent être converties en énergie électrique en employant des machines et des équipements appropriés.

L'énergie électrique produite par la centrale est transmise et distribuée avec l'aide de conducteurs à divers consommateurs. On peut souligner ici qu'en plus d'une combinaison moteur alternateur, une centrale moderne emploie plusieurs équipements et instruments auxiliaires pour assurer un service bon marché, fiable et continu. [15]

#### **II.2.2. L'énergie fossile**

Les combustibles fossiles, à l'aide desquels on obtient l'énergie fossile, sont produits à partir de roches qui se sont formées par le biais de la fossilisation de végétaux vivants sous forme de pétrole, de charbon (houille) et de gaz naturel. Ces sources énergies sont non renouvelables parce qu'elles sont consommées à un rythme excessivement rapide mais qu'elles ont initialement mis des millions d'années à se former Leur particularité, c'est qu'elles brûlent très bien ce sont d'excellents carburants. On les appelle "hydrocarbures". Is ont aussi l'avantage de pouvoir être facilement stockés et transportés, ce qui en fait la source d'énergie la plus pratique à utiliser.

## II. Production d'énergie électrique et perturbation des réseaux électriques.

Mais ils présentent deux très gros inconvénients: le premier, c'est qu'en brûlant, ils dégagent beaucoup de particules qui polluent l'atmosphère. Le second, c'est que leur quantité sur Terre est limitée. Au rythme où l'Humanité les utilise, ce stock finira par s'épuiser. [15]

### II.2.2.1. Centrale thermique

Une centrale thermique dite 'à flamme' est une unité de production électrique qui tire son énergie d'une source de chaleur. Qu'elle soit obtenue de l'atome, des énergies fossiles, du soleil ou de la chaleur de la terre, la dite source de combustion dégagée dans une chaudière permet de générer de la vapeur sous pression qui, en circulant dans une turbine reliée à un alternateur, produit de l'électricité. En sortie, un condenseur retransforme la vapeur en eau pour un prochain tour. Puisée dans la mer ou un fleuve, le fluide de refroidissement qui traverse le condenseur est soit restitué à son milieu naturel soit réutilisé à l'identique. [14]

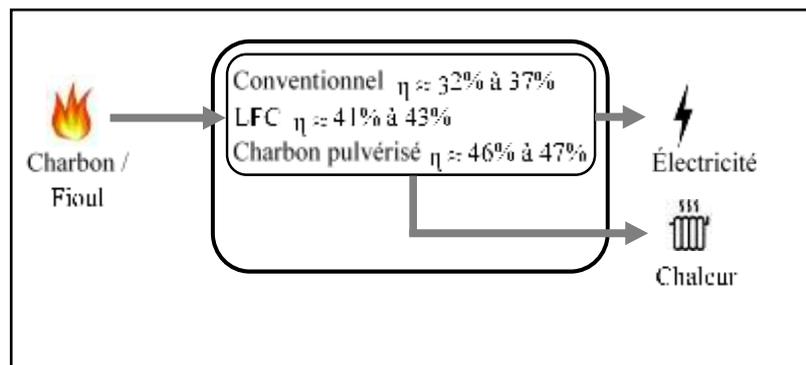


Figure II.1. Centrale thermique [15]

### II.2.2.2. Centrale électrique à gaz

Dans une centrale à turbine à gaz, de l'air est utilisé comme fluide de travail. L'air est comprimé par le compresseur et conduit à la chambre de combustion où la chaleur est ajoutée à l'air, ce qui augmente sa température. L'air chaud et à haute pression venant de la chambre de combustion est ensuite amené à la turbine à gaz où il se dilate et effectue le travail mécanique. La turbine à gaz entraîne l'alternateur qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. [14]

## II. Production d'énergie électrique et perturbation des réseaux électriques.

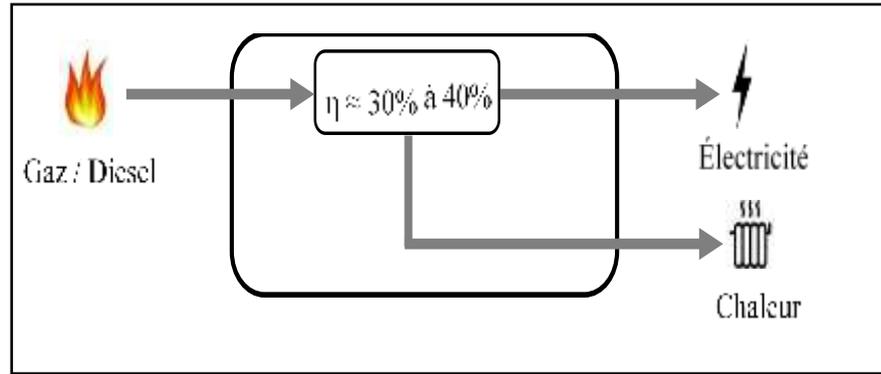


Figure II.2. Centrale électrique à gaz [14]

### II.2.2.3. Centrale nucléaire

La caractéristique la plus importante de la centrale nucléaire est que l'énorme quantité d'énergie électrique peut être produite à partir d'une quantité relativement faible de combustible nucléaire par rapport à d'autres types de centrales conventionnelles.

Il a été constaté que la fission complète de 1 kg d'uranium ( $U235$ ) peut produire autant d'énergie que peut produire par la combustion de 4 500 tonnes de charbon de haute qualité (Figure II.1). [15]

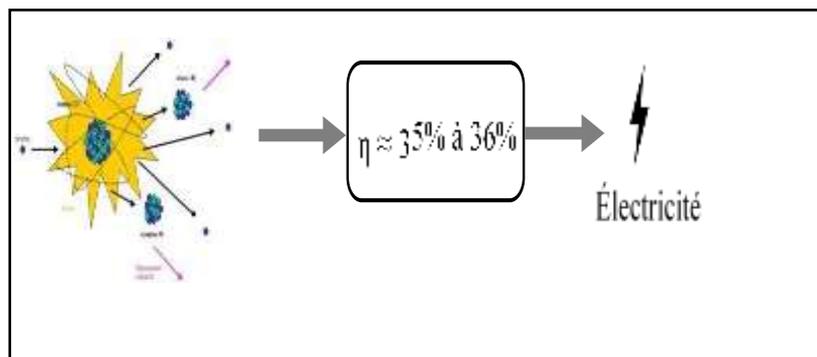


Figure II.3. Centrale nucléaire [15]

### II.2.2.4. Centrales à cycles combinés

Un cycle combiné consiste à produire de l'électricité sur 2 cycles successifs. Dans ce procédé, le gaz, généralement le gaz naturel, est brûlé à une température avoisinant les 1000°C afin d'entraîner une turbine adaptée à cette température et le gaz chaud sortant est récupéré pour produire de la vapeur d'eau qui va vers une turbine à vapeur analogue à celle des centrales

## II. Production d'énergie électrique et perturbation des réseaux électriques.

thermiques classiques. Figure II.2 Les deux turbines entraînent deux générateurs distincts reliés au réseau. En augmentant la température de combustion, les rendements de 50% peuvent être facilement atteints, et on espère même atteindre les 60% pour la prochaine génération de ce type de centrale. [14]

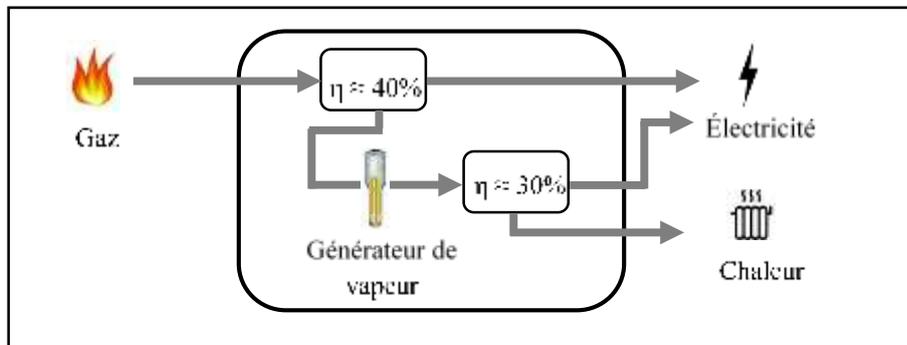


Figure II.4. Centrale à cycles combinés. [15]

### II.2.2.5. Centrale diesel

Les centrales électriques diesel (nommées également groupes électrogènes) sont équipées d'un Moteur diesel et d'un alternateur. Opérant en compagnie en tant qu'unités de production d'électricité, elles constituent un choix idéal sur les sites de production éloignés ou pour assurer l'alimentation de secours de grandes banques, d'hôpitaux, d'aéroports ou de villes entières. Certains pays et états insulaires produisent la majorité de leur électricité avec des centrales électriques diesel. [14]

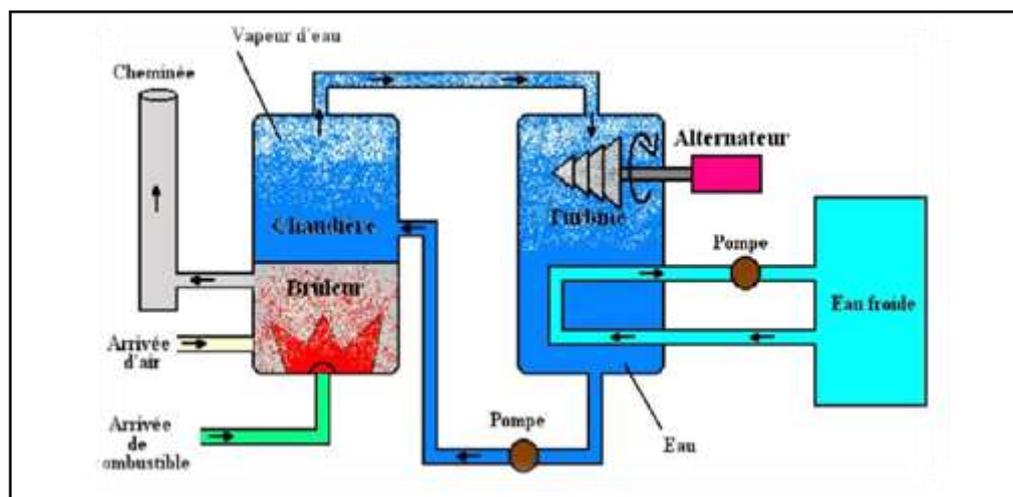


Figure II.5. Centrale diesel [14]

### II.3. Définition des productions décentralisées

Le terme production décentralisée DG désigne l'ensemble des générateurs d'électricité de faible puissance, connectés aux réseaux de distribution. Ce terme est construit par opposition au terme production centralisée désignant les grandes centrales de production connectées au réseau de transport. Le nombre de DG connectées aux réseaux de distribution est actuellement en forte augmentation.

Différents facteurs expliquent ce fort accroissement. Le premier est l'ouverture progressive du marché de l'énergie. En effet, désormais, les producteurs d'énergie indépendants peuvent vendre leur production d'électricité au plus offrant à travers des bourses de l'énergie. Le second facteur, certainement le plus important, responsable de l'augmentation de la production décentralisée, est les incitations gouvernementales au développement des énergies renouvelables propres. On assiste en effet ces dernières années à une volonté politique de la part des états d'une part, d'augmenter l'indépendance énergétique et d'autre part, de diminuer les émissions de gaz à effet de serre. [16]

De nombreuses raisons, techniques et économiques, justifient le développement de ce type de production, parmi lesquelles nous relevons les suivantes :

- ❖ la technologie disponible actuellement offre les garanties de fiabilité pour des unités de 100 kW à 150 MW ;
- ❖ les sites pour une production de puissance réduite sont plus faciles à trouver ;
- ❖ la production est réalisée à proximité de son utilisation, de manière à réduire les frais de transport ;
- ❖ le gaz naturel, vecteur énergétique souvent utilisé en production décentralisée, est supposé être facilement disponible dans la plupart des centres de consommation et conserver un prix stable ;
- ❖ les systèmes basés sur le gaz sont construits en beaucoup moins de temps et représentent des investissements nettement moins importants en comparaison avec les grosses centrales classiques utilisant un autre vecteur d'énergie primaire ;
- ❖ les rendements énergétiques supérieurs des systèmes de cogénération ou à cycle combiné (gaz et vapeur) permettent une réduction des frais de fonctionnement ;
- ❖ les politiques des états pour promouvoir des technologies propres afin de réduire les émissions de CO<sub>2</sub>, et promouvoir les énergies renouvelables par des subsides et des

## **II. Production d'énergie électrique et perturbation des réseaux électriques.**

interventions dans les tarifs, qui conduisent à des conditions économiques intéressantes. [17]

### **II.4. Caractéristiques de Production Décentralisée**

Les systèmes de production décentralisée peuvent se caractériser par le type de générateur ou d'interface utilisé. On distingue ainsi les catégories suivantes et leurs domaines d'applications actuels, avec quelques empiétements entre catégories. [18]

#### **II.4.1. Systèmes à alternateurs classiques (machine synchrone)**

Ces systèmes sont dits classiques en raison de l'utilisation de générateurs synchrones comme dans les centrales thermiques à combustible fossile ou nucléaire, et dans les centrales hydrauliques. [18]

- ❖ Biomasse
- ❖ Energie géothermique
- ❖ Diesel
- ❖ Solaire à bac parabolique et tour
- ❖ Turbine à gaz à cycle simple
- ❖ Turbine à gaz à cycle combiné
- ❖ Vent

#### **II.4.2. Systèmes à générateurs asynchrones**

- ❖ Solaire réflecteur-moteur (à miroirs paraboliques et moteurs à cycle Stirling et Brayton)
- ❖ Vent
- ❖ Houle

#### **II.4.3. Systèmes à interface avec convertisseur électronique**

- ❖ Vent (avec générateur synchrone ou asynchrone)
- ❖ Photovoltaïque
- ❖ Stockage par batterie
- ❖ Stockage par bobine supraconductrice et Piles à combustible

### II.5. Les différentes ressources renouvelables

#### II.5.1. L'énergie hydroélectrique

Les centrales hydrauliques transforment l'énergie cinétique d'un flux d'eau en énergie électrique par l'intermédiaire d'une ou plusieurs turbines hydrauliques, couplées à des générateurs électriques. La puissance maximale dépend de la hauteur de chute, du débit d'eau et des caractéristiques mécaniques de la turbine. Il y a trois types principaux de centrales hydroélectriques: En Algérie, on peut citer le cas de la centrale hydroélectrique de Darguina qui au jour d'aujourd'hui produit 71.5 MW. L'orientation de la société vers cette énergie contribuera à sa remise à niveau et à son développement en construisant d'autres centrales dans le pays. [19]

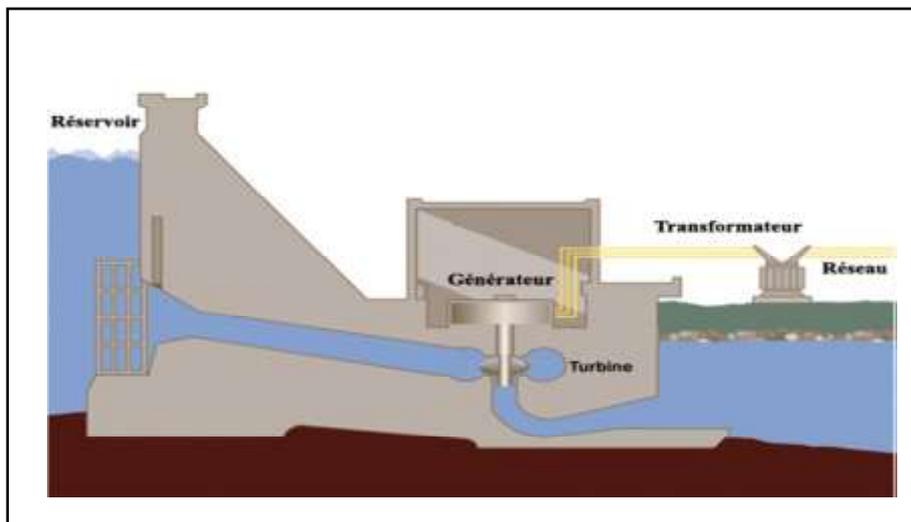


Figure II.6. Schéma en coupe d'un barrage hydroélectrique [19]

#### II.5.2. L'énergie photovoltaïque

Le principe de l'obtention du courant par les cellules photovoltaïques (PV) s'appelle l'effet photoélectrique. Ces cellules produisent du courant continu à partir de l'irradiation solaire. La majorité des installations PV sont connectées aux réseaux de distribution (basse tension).

Il existe aussi des grands parcs PV, jusqu'à quelques dizaines ou centaines de MW, connectées au réseau de transmission [20].

L'énergie du rayonnement solaire peut être aussi convertie en chaleur ou indirectement en électricité par la production de vapeur qui entraîne un générateur électrique. Dans ce cas, on parle de solaire thermique. Deux principes de base sont utilisés pour faire cela :

## II. Production d'énergie électrique et perturbation des réseaux électriques.

- ❖ Capturer l'énergie des rayons solaires grâce à un corps noir,
- ❖ Concentrer le rayonnement solaire dans un point : four solaire, miroirs paraboliques, concentrateurs.

### II.5.3. La biomasse

La biomasse est la fraction biodégradable des produits, des déchets et des résidus d'origine biologique provenant de l'agriculture et de l'élevage des animaux, de la pêche et l'aquaculture, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et municipaux. La biomasse peut être utilisée principalement de deux manières :

- ❖ Lors de la fermentation des déchets, le gaz méthane peut être capté et utilisé comme source d'énergie,
- ❖ La biomasse elle-même peut être incinérée. [21].

### II.5.4. L'énergie éolienne

Une éolienne est une machine permettant de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique de type éolienne. Cette énergie mécanique éolienne a été utilisée au cours des âges pour pomper l'eau ou moudre le grain. Son principe de fonctionnement de l'énergie éolienne est relativement simple : le vent fait tourner des pales qui font-elles même tourner le générateur de l'éolienne. A son tour le générateur transforme l'énergie mécanique du vent en énergie électrique de type éolienne. Les machines actuelles sont utilisées pour produire de l'électricité de type éolienne qui est consommée localement (sites isolés), ou injectée sur le



réseau électrique (éoliennes connectées au réseau). [22]

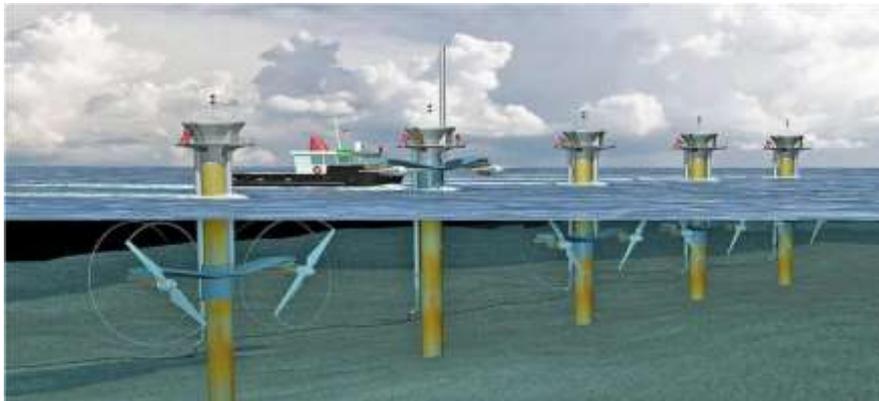
Figure II.7. Énergie éolienne [22]

## II. Production d'énergie électrique et perturbation des réseaux électriques.

### II.5.5. Energie des courants de marée

La production directe de l'électricité à partir des courants dus aux marées est un concept relativement récent. Il part d'une autre approche que celle des usines marémotrices et il est intéressant, car il ne fait pas appel à des investissements massifs pour l'infrastructure.

La technique utilisée pour extraire l'énergie de ces courants est extrêmement simple : une turbine est placée dans le courant de manière judicieuse, et cette turbine entraîne un générateur à travers une boîte de vitesse comme indiqué à la figure II.8. C'est assimilable un champ éolien « immergé » où le vent serait remplacé par des courants quoique l'eau de mer ait une forte densité, et que à vitesse égale, l'énergie des courants de marée soit bien plus grande que celle du vent.



[16]

Figure II.8. Principe de fonctionnement des courants de marée [16]

### II.5.6. Géothermie

La géothermie est l'exploitation de la chaleur stockée dans le sous-sol. L'utilisation des ressources géothermales se décompose en deux grandes familles : la production d'électricité et la production de chaleur. En fonction de la ressource, de la technique utilisée et des besoins, les applications sont multiples. Le critère qui sert de guide pour bien cerner la filière est la température. Ainsi, la géothermie est qualifiée de « haute énergie » (plus de 150°C), « moyenne énergie » (90 à 150°C), « basse énergie » (30 à 90°C) et « très basse énergie » (moins de 30°C).[23]

### **II.6. Intégration des énergies renouvelables au réseau de distribution**

Afin de lutter contre le changement climatique et de préserver les ressources naturelles, de nombreux pays ont mis en place des politiques plus ou moins ambitieuses de développement des énergies renouvelables électriques à court et moyen terme, tandis que, en parallèle, des scénarios de prospective à long terme envisagent un approvisionnement électrique majoritairement d'origine renouvelable. Certaines de ces énergies sont intermittentes et non contrôlables et, du fait des faibles économies d'échelle dont elles bénéficient, elles peuvent être développées de manière décentralisée, intégrées au bâtiment et raccordées au réseau de distribution, à l'opposé des moyens de production actuels. Concomitamment, les pointes de consommation augmentent à un rythme soutenu et obligent les gestionnaires de réseaux et les producteurs/fournisseurs à toujours plus d'investissements dans des moyens de production et de transport qui ne seront utilisés que pendant un faible nombre d'heures par an. Les changements décrits ci-dessus vont avoir un impact sur les trois grands objectifs de la planification et de la gestion du système électrique : minimiser le coût global, assurer la sûreté de l'approvisionnement et garantir la qualité de la fourniture. Si on analyse le fonctionnement actuel du système, les transformations à venir et les possibilités offertes par l'intégration de solutions de contrôle et de gestion (compteurs électriques communicants, transformateurs régulateur en charge, onduleurs PV avec gestion de réactif, stockages, etc.) au réseau de distribution, il est possible de mettre en évidence trois grands domaines d'application et donc de valorisation pour celles-ci. Il s'agit du déplacement temporel d'énergie, de la fourniture de services auxiliaires (régulation et suivi de charge, réserve ou gestion de tension, par exemple) et de l'optimisation de la planification et de la gestion du réseau (éviter et/ou retarder les investissements). Cependant, l'ensemble des procédures et méthodes de planification et d'opération actuelle est basé sur l'hypothèse d'une production centralisée et d'un réseau de distribution passif. Dans ce contexte, de nombreux travaux contribuent au développement de méthodes de simulation d'un réseau de distribution actif.

les projections de croissance du taux pénétration d'intégration de production décentraliser au réseau électrique, caractériser l'impact des fluctuations de la production, a diverses échelles que les différents acteurs doivent prendre en considération pour trouver des solutions aux problèmes . [24]

- ❖ la régulation de la tension du réseau.
- ❖ la problématique de la fréquence.

## **II. Production d'énergie électrique et perturbation des réseaux électriques.**

- ❖ la qualité de l'énergie.
- ❖ impact de l'éolien sur le cout du maintien de l'équilibre production consommation.

### **II.7. Impact de l'intégration des producteurs décentralisés au réseau HTA**

#### **II.7.1. LES INTERETS DE LA DG**

Les installations de la génération d'énergie distribuée peuvent réduire les pertes, la congestion du réseau, les coûts et les émissions et d'améliorer le profil de tension, la qualité d'énergie et la fiabilité du système. Toutefois, les avantages de la DG sont fortement liés à la technologie utilisée et la capacité d'accueil du réseau de distribution [25-26].

#### **II.7.2. Impact sur le plan de protection**

##### **II.7.2.1. Modification des valeurs des courants de court-circuit**

La connexion d'un nouveau générateur (asynchrone ou synchrone) au réseau provoque, en cas de défaut, une modification des courants. L'ensemble des générateurs d'un réseau participe au courant de défaut. Cette modification des courants peut affecter la sélectivité entre les appareils de protection.

La participation de chaque générateur dépend de la distance électrique qui le sépare du défaut. Dans tous les cas, le courant de défaut est une somme algébrique du courant provenant du réseau amont par l'intermédiaire du poste source et du courant injecté par la DG. La variation des courants de court-circuit n'est que de quelques pour cents lorsque la DG n'est constituée que d'un générateur synchrone de 1 MW. Cependant, cette variation peut devenir beaucoup plus importante si le nombre de générateurs augmente et/ou si la puissance de la DG augmente. La modification de la répartition et des valeurs de courant de court-circuit n'est pas sans impact sur le plan de protection. Cette injection de courant peut altérer la sélectivité et la sensibilité des protections existantes de deux manières [22]

- ❖ déclenchement intempestif d'un départ sain, il faut s'assurer que les courants de court-circuit dans le départ sain restent inférieurs au réglage des protections Figure II.9.
- ❖ aveuglement de la protection du départ en défaut lorsque la DG est loin du HT/MT et qu'un défaut apparait sur une déviation proche de la DG, l'impédance entre le poste et le

## II. Production d'énergie électrique et perturbation des réseaux électriques.

point peut devenir très importantes ce qui réduit le courant de défaut et la protection ne se déclenche pas. Figure II.10. [22]

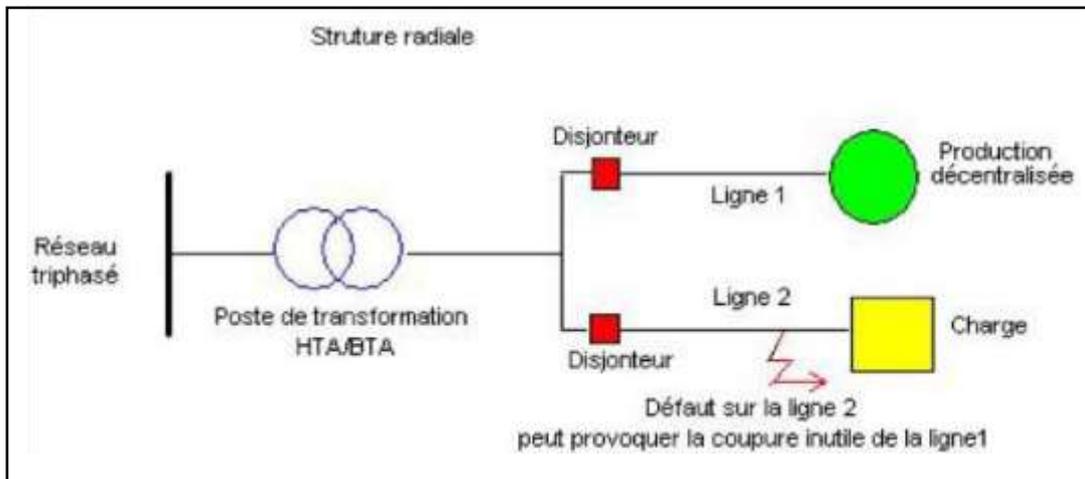


Figure II.9. Influence de la production décentralisée sur la sélectivité de la protection des réseaux de distribution. [22]

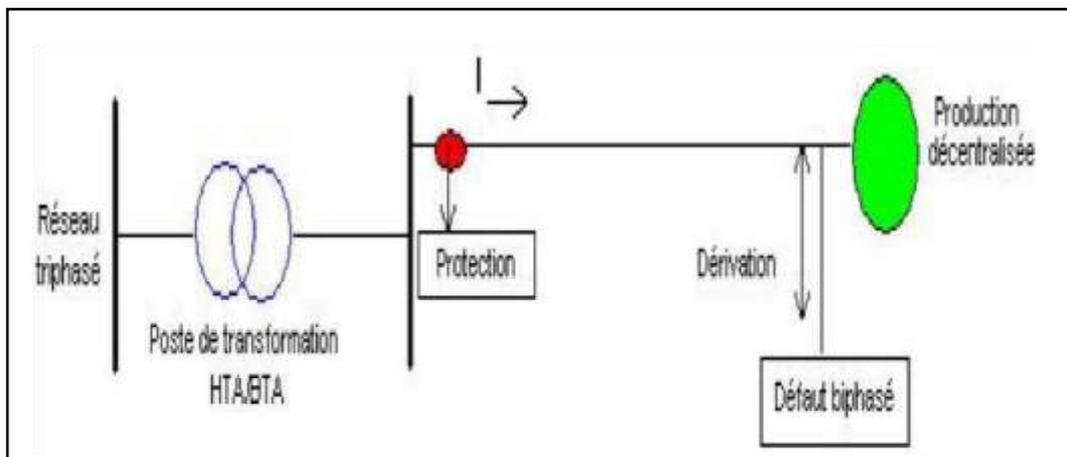


Figure II.10. Aveuglement de la protection du départ en défaut [22]

### II.7.3. Impact sur profil de tension

De par la nature d'énergie fournie par les productions décentralisées et des technologies utilisées, notamment les éoliennes sont particulièrement susceptibles d'affecter la qualité de tension sur les réseaux qui les accueillent. La production décentralisée peut affecter la qualité de la tension d'alimentation de plusieurs façons [27]

## **II. Production d'énergie électrique et perturbation des réseaux électriques.**

### **II.7.3.1. Les creux et l'élévation de la tension**

En connectant la DG à une ligne de distribution légèrement chargée, le flux de puissance peut être inversé et la tension au point de connexion augmente et la tension d'alimentation des clients connectés à proximité des unités DG commence à augmenter aussi.

Une variation rapide du courant d'une unité DG cause une augmentation ou diminution soudaine du courant de la ligne et conduit donc un effet sur la tension de cette dernière. La variation rapide de la sortie de la DG change le flux de la puissance dans la ligne et peut occasionner un régime transitoire de la tension, et peut conduire également à une variation brusque de la puissance qui peut dépasser les limites supérieures, dans ce cas une DG peut se déconnecter afin de se protéger contre les surcharges et les forces mécaniques fortes. Cette déconnexion peut aussi provoquer une augmentation du courant et par conséquent une chute de la tension d'alimentation. [28]

### **II.7.3.2. Variation lentes de tension**

La puissance produite par la DG est variable selon les conditions météorologiques. La puissance produite par une centrale éolienne ou photovoltaïque par exemple est fonction de la vitesse du vent respectivement de l'ensoleillement et varie donc avec elle entraînant des variations « lentes » de la tension au point de raccordement. Suivant les capacités de réglage, ces variations peuvent être atténuées, voire filtrées. [27]

### **II.7.3.3. A-coups de tension**

Des à-coups ou des variations rapides de la tension peuvent survenir lors du couplage ou découplage des productions décentralisées (et de leurs transformateurs) au réseau, lors du changement du mode de connexion (étoile-triangle) de certaines génératrices, etc.

### **II.7.3.4. Flicker**

Le terme flicker désigne les variations de tension de courte durée apparaissant dans le réseau électrique et risquant de provoquer le scintillement des ampoules électriques à incandescence. Dans le cas des éoliennes, ces variations sont dues aux fluctuations de la vitesse du vent, aux limites mécaniques de l'éolienne (par exemple du pitch control) et à l'effet d'ombre causé par le passage des pales devant le mât. Ce sont les éoliennes à vitesse fixe qui sont les plus défavorables du point de vue de ces phénomènes.[28]

## II. Production d'énergie électrique et perturbation des réseaux électriques.

### II.7.3.5. Harmoniques

Les dispositifs d'électronique de puissance utilisés pour optimiser la puissance extraite des unités de production d'énergie renouvelable (éoliennes à vitesse variables et panneaux photovoltaïques) présentent l'inconvénient d'être des sources d'harmoniques. L'utilisation de plus en plus fréquente de convertisseurs à commutation forcée comme les IGBT (Insulate Gate Bipolar Transistor), et des méthodes de modulation par largeur d'impulsion (MLI) ne genèrent pratiquement pas d'harmoniques de premiers ordres. Les fréquences générées sont de l'ordre de quelques kHz (fréquence de fonctionnement des convertisseurs). Ce qui n'est pas le cas de technologies plus anciennes à base de thyristors. [27]

### II.7.3.6. Perturbations des signaux transmis sur le réseau

Des signaux peuvent être transmis sur les réseaux dans un but d'information et/ou de télécommande. Le raccordement de production décentralisée peut modifier les «impédances» du réseau et est ainsi susceptible de perturber la transmission de ces signaux. Pour garantir le bon fonctionnement des applications qui en dépendent, il est nécessaire de vérifier l'impact du raccordement.

## II.8. Impact sur le sens du transit de puissance

Les réseaux sont dimensionnés pour recevoir les flux d'énergie du réseau de transport vers la distribution. L'insertion des DG 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 ver le transport. Les équipements, notamment les protections doivent alors être bidirectionnelles.

Ainsi, sachant que les réseaux aux niveaux de tension inférieure sont normalement surdimensionnés afin de faire face à l'accroissement de consommation, à plus long terme, lorsque le taux de pénétration de DG augmentera, la modification du sens de transit de puissance pourra éventuellement provoquer des congestions locales. Figure II.11. [28]

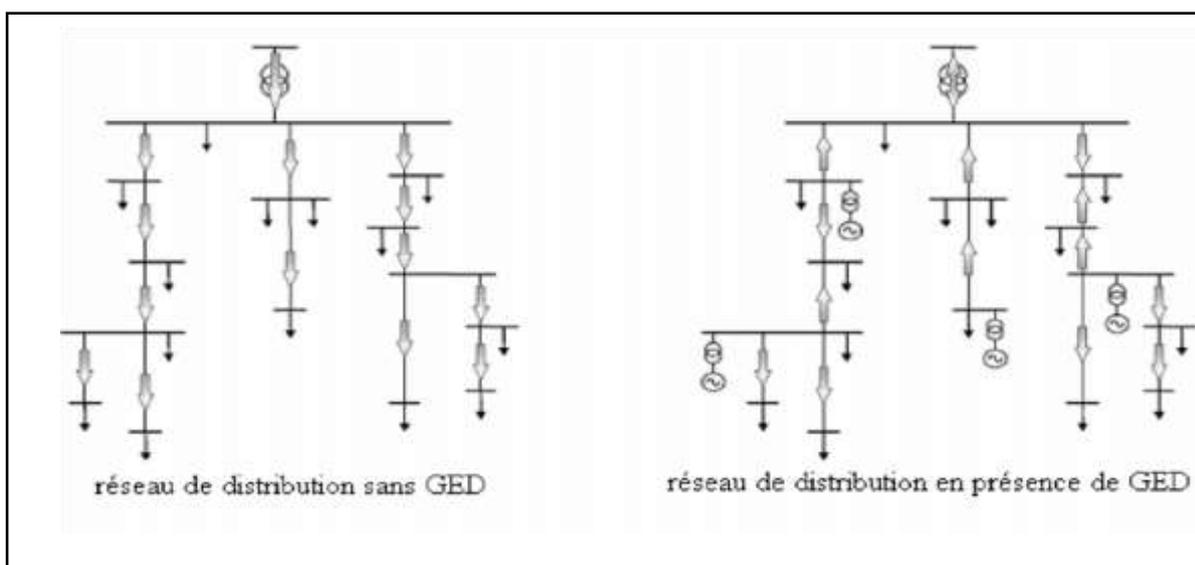


Figure II.11. Sens de transit de puissance dans le réseau de distribution avant et après l'insertion des DG. [28]

### **II.9. Impact sur la stabilité du système**

Pour garantir la stabilité des réseaux électriques, un ensemble de moyens est mis en œuvre afin de maintenir les grandeurs, fréquence, tension, proches de leurs valeurs nominales sur l'ensemble du réseau. Une instabilité généralisée du réseau peut conduire à des dégâts matériels et ou à la mise hors tension d'une partie ou de l'ensemble du réseau.[29]

#### **II.9.1. Impact sur la qualité de service**

Les DG 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. [28]

#### **II.9.2. Impact sur l'observabilité et la contrôlabilité du système**

Les DG, 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. [29]

#### **II.9.3. Impact sur la continuité de service**

Pour la même raison concernant la caractéristique d'intermittence, l'indisponibilité des DG lors que le système les sollicite peut occasionner la rupture d'électricité par manque de puissance. [29]

#### **II.9.4. Impacts sur le plan de protection**

La présence d'une installation de production ne doit pas perturber le fonctionnement du plan de protection du distributeur en sensibilité et en sélectivité lors d'un défaut sur le départ auquel elle est raccordée, l'installation de production doit se découpler pour ne pas maintenir sous tension le défaut : c'est le rôle de la protection de découplage Cette protection "de découplage" devant supprimer la parallèle entre générateurs et réseau de distribution, lors d'un défaut ou d'une autre anomalie sur celui-ci. Le découplage doit répondre à des conditions strictes

## **II. Production d'énergie électrique et perturbation des réseaux électriques.**

lorsqu'il est effectué des ré-enclenchements automatiques rapides, ce qui est le cas le plus général des réseaux MT aériens. [28]

### **II.10. Effet sur la fréquence du réseau**

Un déséquilibre entre la production et la consommation qui peut-être dû à l'intermittence de la DG qui induit une variation de fréquence due à la variation de la vitesse des groupes' alternateurs classiques. Le réglage primaire de fréquence est réalisé automatiquement au niveau des groupes de production. Le régulateur assure une correction rapide en quelques secondes. Avec un réglage qui suit une relation linéaire entre la fréquence imposée par la vitesse des groupes tournants et la puissance. Le réglage secondaire est sollicité après le réglage secondaire en quelques minutes jusqu'à 15 minutes, il a pour rôle de ramener la fréquence à sa valeur nominale et de ramener les échanges entre partenaires à leurs valeurs contractuelles. Cependant, tant que le taux de pénétration de l'éolien reste faible, cette influence peut être considérée comme négligeable. [30]

#### **II.10.1. Contraintes de raccordement des éoliennes**

En fonction de leur type, de leur puissance et de leur tension de raccordement, les installations de production doivent être conçues pour pouvoir contribuer, pour des durées limitées, au soutien du système électrique lorsqu'il est en régime exceptionnel ou en situation de défaut d'isolement.

En fonction de leur type, de leur puissance et de leur tension de raccordement, les installations de production doivent avoir des capacités constructives de fourniture de services auxiliaires nécessaires pour que le fonctionnement du système électrique soit sûr. Ces services comprennent les réglages primaire et secondaire de la tension; les réglages primaire et secondaire de la fréquence; le fonctionnement en réseau séparé ; le renvoi de tension et la participation à la reconstitution du réseau.

Les installations de production doivent être équipées d'un dispositif qui permet de les coupler au réseau public de transport. Les installations doivent en outre être conçues pour que la stabilité de leur fonctionnement soit assurée compte tenu des caractéristiques de leur raccordement au réseau et doivent être équipées des régulations de tension et de fréquence (c'est-à-dire de la vitesse pour les groupes tournants) qui sont nécessaires pour atteindre cet objectif des pertes de stabilité ne doivent pas être à l'origine d'une dégradation de la qualité de l'électricité sur le réseau public de transport ou de la perturbation des conditions de son exploitation .

## **II. Production d'énergie électrique et perturbation des réseaux électriques.**

Les installations de production doivent être capables de recevoir et d'exécuter dans les délais appropriés précisés dans la convention d'exploitation les ordres de conduite et de sauvegarde en provenance du gâtionnant du réseau de transport. [24]

### **II.10.2. Réglage de la fréquence**

La participation au réglage de la fréquence n'est pas exigée pour des installations de production mettant en œuvre de l'énergie fatale telles que les fermes éoliennes ou photovoltaïque. Il est néanmoins intéressant de noter les contraintes imposées aux autres installations :

- ❖ Les installations d'une puissance supérieure ou égale à 40MW doivent participer au réglage primaire de fréquence.
- ❖ Les installations d'une puissance supérieure ou égale à 120MW doivent participer au réglage secondaire de fréquence.

Le fait de ne pas participer au réglage de fréquence limitera à terme le taux de pénétration de l'éolien et du photovoltaïque, car ce réglage est reporté sur les groupes traditionnels. En cas de forte pénétration de l'éolien. Les exigences en terme de participation au réglage de fréquence de l'éolien et photovoltaïque pourraient donc évoluer. Le problème étant évidemment l'existence d'une réserve primaire associé à l'éolien et au photovoltaïque.

Il en est de même pour le fonctionnement en réseau séparé et pour la participation à la reconstitution du réseau qui ne sont actuellement pas exigées pour les fermes éoliennes et photovoltaïque. [31]

### **II.10.3. 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, le flicker, les déséquilibres et les harmoniques

Un système de communication entre le producteur et le gestionnaire du réseau est à prévoir afin d'assurer la sécurité du réseau, le gestionnaire de ce réseau doit veiller à éviter la surcharge thermique des lignes et la rupture de synchronisme et à assurer la stabilité de la fréquence c'est-à-dire assurer l'équilibre production consommation et la stabilité de la tension.[31]

### **II.11. Conclusion**

Les énergies renouvelables sont des énergies qui respectent l'environnement pour leur aspect naturel et inépuisable mais à cause de certains facteurs comme leurs couts, elles ne sont pas rentables à court-terme par rapport à des centrales classiques.

L'intégration des productions décentralisées impacte autant la production, que la planification d'un réseau électrique classique. Des mesures ont été mises en place pour gérer le raccordement de ces productions afin d'assurer l'équilibre et la stabilité du réseau et avoir un fonctionnement normal. Ces normes et ces mesures sont différentes d'un pays a un autre et d'une région a une autre.

Les énergies éoliennes et photovoltaïques sont considérées comme des énergies qui influent sur la stabilité de la tension et de la fréquence. Cela est dû à leur intermittence ; l'énergie n'est pas produite à la demande mais selon les conditions météorologiques et climatiques, elle nécessite donc des installations de production ou de stockage en remplacement pendant ses périodes d'indisponibilité.

Dans ce chapitre nous avons rappelé les productions classiques de l'énergie électrique et notamment les centrales thermiques, a gaz, nucléaires, à cycle combiné, diesel. Ensuite nous avons rappelé les productions décentralisés ainsi pour les différents types d'énergies renouvelables. Nous sommes passés après à l'impact des productions décentralisés et des énergies renouvelables sur le réseau électrique.

## **Chapitre III**

### **Réglage de la fréquence et réglage de la tension**

## III. Réglage de la fréquence et réglage de la tension

### III.1. Introduction

Pour assurer un bon fonctionnement du système électrique, le maintien d'un équilibre entre l'offre et la demande est indispensable. Les centres de conduite du réseau assurent 24/24 et 7/7 cet équilibre, ils sont les gestionnaires garants de la sûreté du système électrique. Ces derniers réalisent à l'aide du réglage de la fréquence et de la tension qui est effectué par les producteurs qui mettent à disposition les capacités de régulation de leurs installations de production commandées par les centres de conduite.

La stabilité de la fréquence d'un système de puissance se définit par la capacité de ce dernier à maintenir sa fréquence proche de la valeur nominale suite à une perturbation sévère due à un important déséquilibre, entre les puissances produite et consommée.

La fréquence et les différents niveaux de tension dans un système électrique doivent être maintenus à l'intérieur des marges contractualisées ( $f_{min}$  et  $f_{max}$ ) et ( $V_{min}$  et  $V_{max}$ ) respectivement afin d'assurer la stabilité du système dans son intégralité. Pour cela, les producteurs raccordés au réseau doivent participer au réglage de tension et de fréquence.

Les différents réglages de la fréquence nécessitent une adaptation de la production à la consommation, ce qui nécessite des réserves de puissance ou un stockage d'énergie.

Dans ce chapitre on va voir l'équilibre de la production, les cycles de consommation, les paramètres influençant la consommation, le réglage de la fréquence et le réglage de la tension.

### III.2. La consommation

La consommation électrique correspond à la demande de puissance sur le réseau pendant une période de temps défini. Le fonctionnement du système électrique nécessite une prévision des consommations. De manière générale, la courbe de consommation d'une région présente des caractéristiques relativement bonnes, les creux et crêtes de consommation d'une journée sont illustrés à la figure III.1 [32]

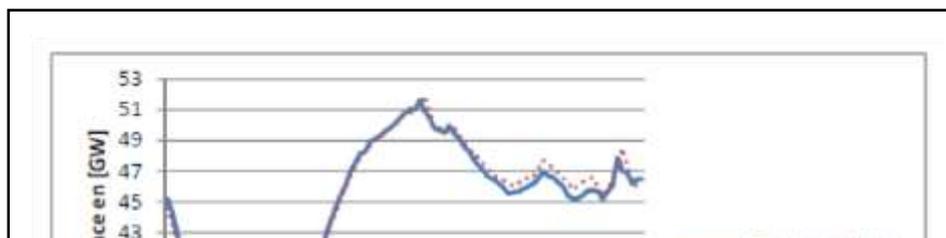


Figure III.1. Fluctuation de la consommation en « J » et « J-1 » en franc le 18/08/10 [32]

Pour suivre les fluctuations de la consommation, la production doit être maîtrisable pour suivre la consommation.

La consommation électrique varie tout au long de l'année, mais aussi tout au long de la journée. Les pics de consommation d'électricité dépendent des habitudes de consommation des différents pays ou régions et peuvent être résumées comme suit : on distingue la pointe quotidienne et la pointe saisonnière.

### **III.3. Paramètres influençant la consommation d'électricité**

Les paramètres influençant la consommation d'électricité sont présentés ci-dessous par ordre d'importance :[32]

#### **III.3.1. Météorologie**

Les données météorologiques sont le principal facteur affectant la consommation d'énergie. Par conséquent, les changements des conditions météorologiques tout au long de l'année sont la principale raison des changements cycliques annuels de la consommation. Afin de construire des prévisions, chaque entreprise de production d'électricité doit utiliser deux quantités spéciales, fournies par la prévision météorologique : La température mesurée par le capteur et la nébulosité mesurée en octal (de 0 à 8). La nébulosité affecte l'utilisation de l'éclairage et affecte également le chauffage en modifiant l'effet du rayonnement solaire dans les habitations.

#### **III.3.2. Activité économique**

La consommation est beaucoup influencée par l'activité économique des entreprises. On remarque ces effets sur les courbes de consommation annuelle (pics de consommation au

moment des vacances d'été), hebdomadaire (consommation basse le weekend), et aussi les jours fériés qui influence fortement la consommation pendant leur temps.

### **III.3.3. Horaire légal**

Il y'a beaucoup de pays pratique cette grandeur de changement horaire (horaire d'été ou horaire d'hiver). On déplaçant la journée par rapport à l'heure solaire la consommation d'électricité est impactée.

Les piques de consommation journalière sont le matin de 9 :00h à 13 :00h mais en hiver le pique de consommation est à 19 :00h. Les pointes de consommation sont effacées par horaire d'été. Cette variations de consommation est appelée rupture.

### **III.3.4. Evénements exceptionnels**

Le profil de consommation est perturbé par certains évènement exceptionnels comme :

- ❖ lors de la pause entre mi-temps de la coupe du monde il y a une forte consommation. (Mise en route de moteurs : réfrigérateurs, pompes à eau...).
- ❖ lors d'une éclipse on remarque une chute de consommation de quelques minutes.
- ❖ les tempêtes provoquent de grandes coupures de clientèle et chamboule pour plusieurs jours la consommation d'électricité.

### **III.3.5. Effet ramadhan**

Les évènements religieux impactent et influencent sur les affaires économiques de tous les pays auprès de chaque secteur d'activité étudiée, ces évènements provoquent une augmentation ou une chute de l'activité du secteur.

## **III.4. Adaptations de la consommation à la production**

L'adaptation de la consommation à la production se fait pour des raisons économiques techniques, elle se fait dans les cas suivants :

- ❖ Exceptionnellement, Quand les accidents se produisent provoquent la perte de contrôle de production ou à un fractionnement du réseau.
- ❖ De manière permanente, ou tout au moins durable, pour arriver à un meilleur maximum économique global, en déplaçant dans le temps une partie de la consommation (lissage de la courbe de charge), ou si l'évolution de la charge est très supérieure aux moyens de production disponibles.

Vue les deux cas, maintenir la consommation à une valeur égale à la production et la fréquence à une valeur correcte c'est toujours agir sur la charge et la puissance apparente.

### III.5. Définition de la fréquence

La fréquence se mesure en hertz (Hz) et correspond au nombre de fois où le courant alternatif change de sens en une seconde. Pour le système électrique européen, c'est un indicateur essentiel de pilotage.

Ils sont partagés par de larges portions de réseaux électriques interconnectés à courant alternatif, chaque fréquence est celle du courant électrique qui est transporté de l'unité de production jusqu'à l'utilisateur final. Dans la plus grande partie du monde, la fréquence est de 50 Hz (Europe, Asie, Afrique), contre 60 Hz en Amérique du Nord.

Sauf mention explicite du constructeur, la majeure partie des appareils fonctionnent en 50 Hz ou 60 Hz. Contrairement aux idées reçues, le changement de fréquence n'est pas destructif.

Les moteurs synchrones tournent un peu plus vite en 60 Hz et certaines alimentations à découpage d'ancienne génération se mettent en sécurité (pas de démarrage). [33]

### III.6. Stabilité de la fréquence

Stabilité de la fréquence d'un système de puissance se définit par la capacité du système de maintenir sa fréquence proche de la valeur nominale suite à une perturbation sévère menant par conséquent à un important déséquilibre. Pour les grands réseaux électriques nationaux, des dispositifs automatisés permettent via des délestages, des déclenchements de lignes ou des manœuvres, d'assurer le maintien de la fréquence dans une zone acceptable ( $\pm 0,5$  Hz autour de 50 Hz ou 60 Hz selon le pays). Des réserves de puissance peuvent être mobilisées. Pour des petits réseaux électriques, il n'est pas envisageable d'assurer une telle précision.

Dans un grand système de puissance et suite à un incident sévère et, par la suite, à l'action de protections (par exemple, un déclenchement de plusieurs lignes de transmission), l'instabilité de la fréquence est généralement associée à l'îlotage où un scénario typique peut avoir lieu. Un ou plusieurs sous-réseaux se retrouvent isolés du reste du système. Les générateurs de chaque sous-réseau résultant essaient de garder le synchronisme entre eux, mais la réserve tournante est nettement insuffisante pour faire face à la charge connectée au sous-réseau. La fréquence décroît ainsi rapidement et l'instabilité produite est donc à court terme. [33]

### III.7. Valeur de la fréquence

Le choix de la fréquence a été fait il y a plus de 100 ans. Cette fréquence correspond à un optimum technico-économique. Une fréquence plus élevée conduirait à des coûts de transport

supérieurs et une fréquence trop faible risquerait d'être visible sur les ampoules, que l'œil humain verrait scintiller.

La fréquence doit être maintenue autour de la valeur nominale, quelles que soient les variations de consommation ou de production. Elle est mesurée et contrôlée en temps réel avec précision afin de la maintenir dans une zone acceptable ( $\pm 0,5$  Hz autour de 50 Hz ou 60 Hz selon le pays).

En Effet, d'une part, une fréquence évoluant sans cesse rendrait l'électricité inutilisable pour de multiples usages, d'autre part, la plupart des composants du système électrique sont conçus pour fonctionner dans une plage de fréquence donnée, en dehors de laquelle des dysfonctionnements graves de matériels peuvent apparaître. [34]

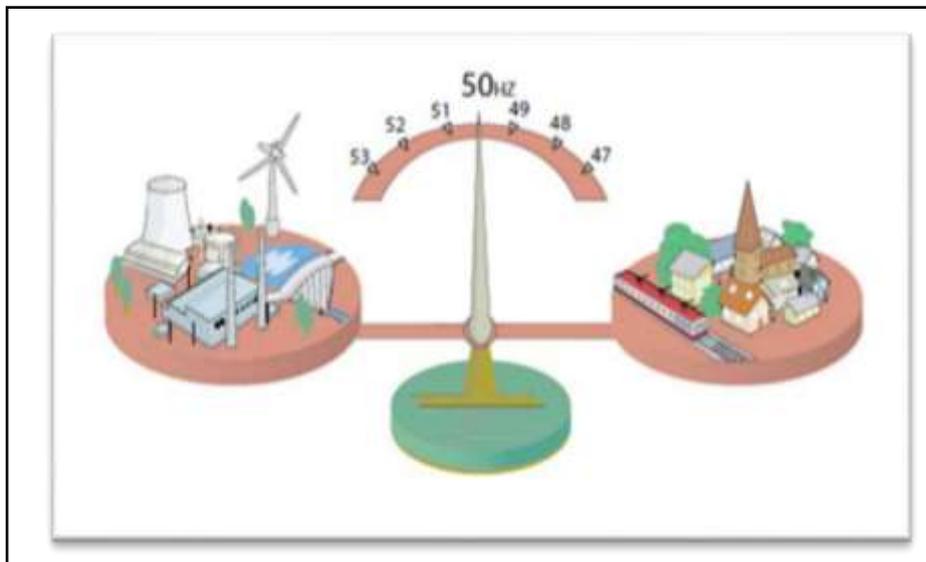


Figure III.2. Maintien de la fréquence [34]

### III.8. Types de variation de la fréquence

La fréquence varie en permanence très légèrement en fonction de la consommation d'électricité et des événements affectant la production. Les écarts de fréquence sont mesurés en millièmes d'Hertz. Les systèmes de régulation des centrales corrigent ces variations de fréquence. Les différents types de variations de fréquence : [34]

1. les petites variations globales et aléatoires autour de 50Hz dues aux évolutions continues de la consommation.

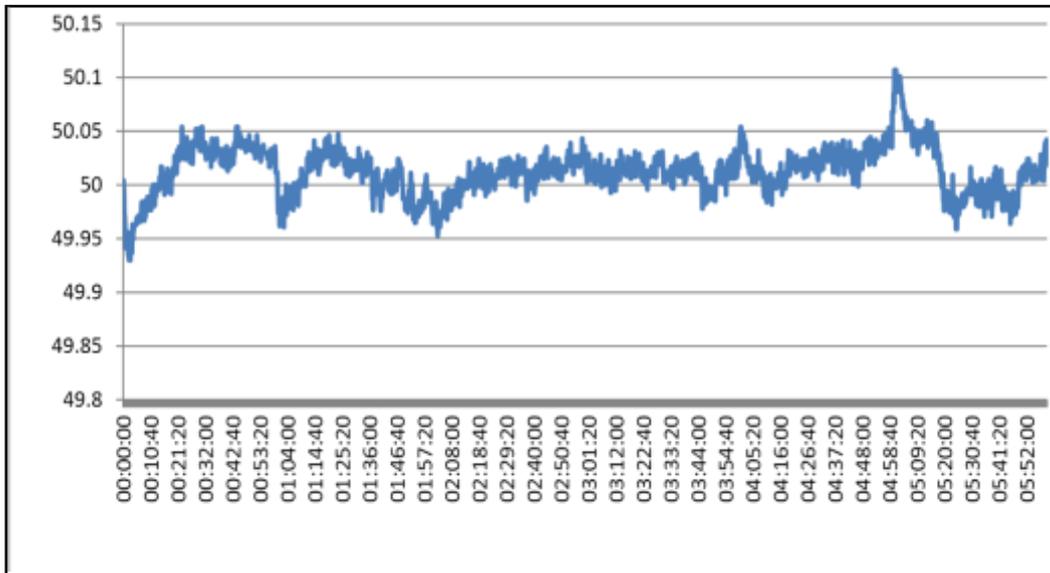


Figure III.3. Variations normales de fréquence. [34]

2. Les variations globales de fréquence, qui peuvent être provoquées par des variations brutes de production (arrêt inopiné d'une centrale ou avarie sur la ligne de raccordement d'une groupe).

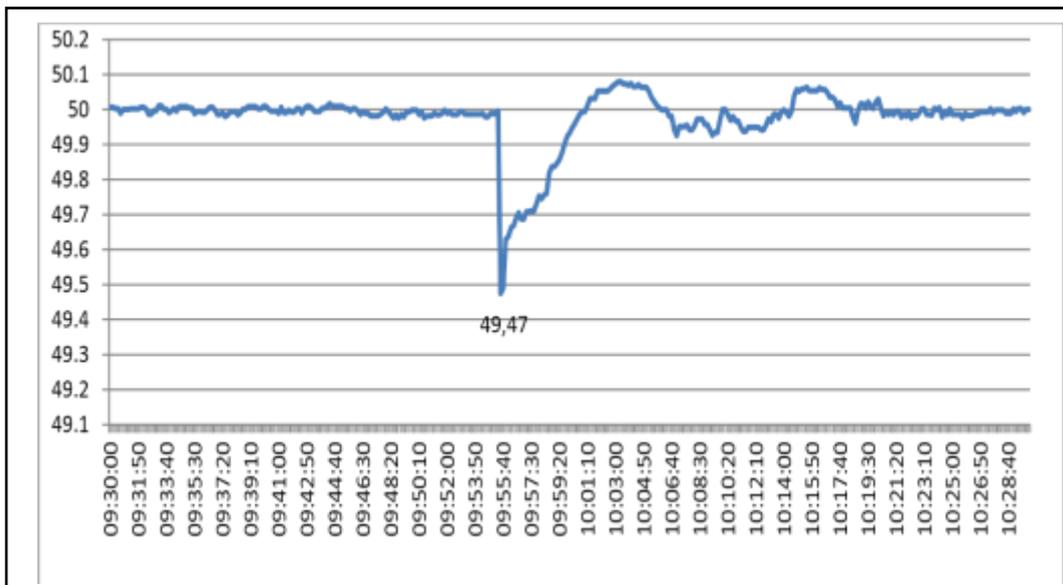


Figure III.4. Variations globales de fréquence.[34]

3. les fortes variations locales de fréquence qui surviennent lors d'incidents de type court-circuit.

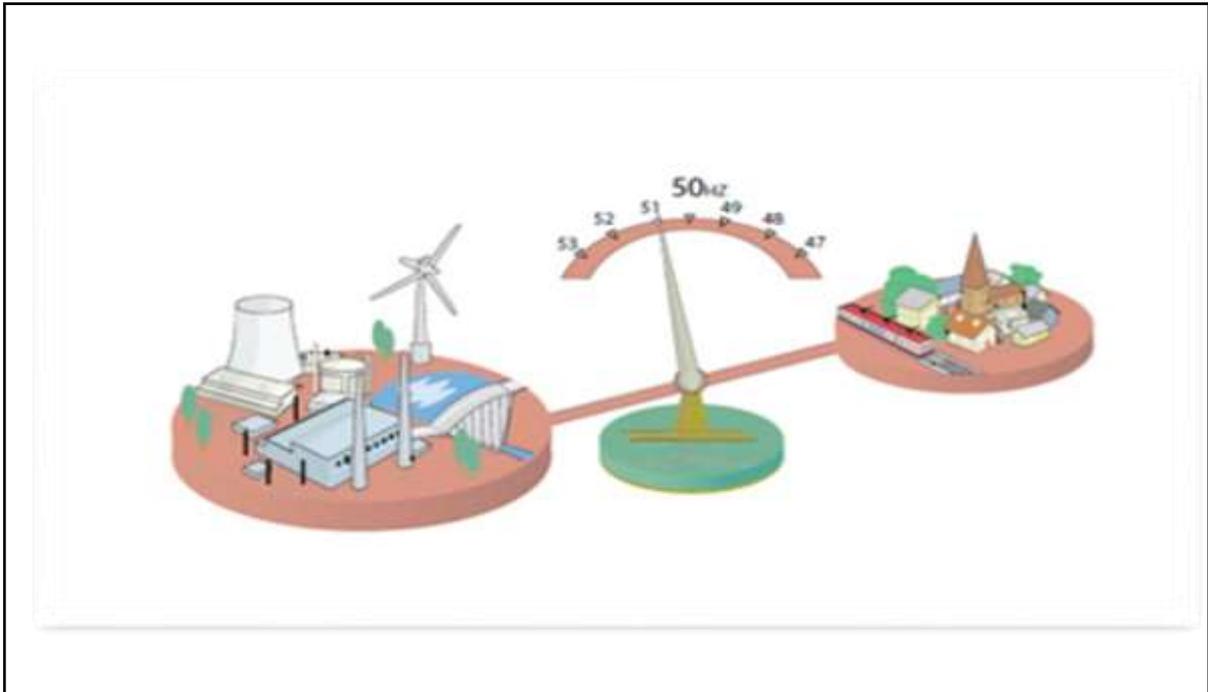


Figure III.5. Les fortes variations de fréquence.[34]

### III.9. Ecrroulement de fréquence

Lorsqu'un réseau est dans une situation tendue pour l'équilibre production /consommation, parce que la consommation atteint un niveau exceptionnel, ou à cause d'un parc de production en partie indisponible, une baisse de fréquence peut se produire. En dessous d'un certain seuil de fréquence, les groupes de production se séparent du réseau pour éviter d'être endommagés. La fréquence chute alors un peu plus, et de nouveaux groupes se séparent du réseau, accélérant le déséquilibre entre production et consommation, donc la chute de fréquence, c'est l'écrroulement de fréquence. Ce phénomène est rapide, on constate une baisse de plusieurs Hertz par seconde. L'ensemble du réseau interconnecté se trouve alors dans une situation très critique.[34]

La variation de fréquence peut résulter :

- ❖ d'un court-circuit proche d'une source.
- ❖ d'une très grosse variation de puissance de la source.
- ❖ du passage sur une source de remplacement ou de secours.

Tout écart entre la production programmée et la consommation se traduit par une variation de la fréquence (le principe de conservation de l'énergie impose instantanée du déséquilibre par une variation de l'énergie cinétique de toutes les <<masses tournantes>>, groupes de production ou moteurs, tournant au synchronisme), et par une variation des échanges à travers les interconnexions transfrontalières.[34]

Or l'équilibre production-consommation est perpétuellement remis en question par les fluctuations de la consommation et par le non-respect rigoureux des programmes de production, qui en pratique sont impossibles à tenir parfaitement. [34]

En cas de chute importante de la fréquence, due à une surcharge importante, deux solutions peuvent alors être engagées : [34]

- ❖ si la surcharge vient de la perte d'unité de production (suite à la perte d'une interconnexion par exemple), des systèmes automatiques lancent alors le **délestage** de certaines portions du réseau.
- ❖ si la surcharge ne vient pas du réseau ou des unités de production, mais uniquement d'une consommation accrue, des unités de production sont mises en service et connectées au réseau

Le maintien d'une valeur satisfaisante de la fréquence nécessite ainsi des actions sur la puissance produite des centrales afin d'adapter en permanence le niveau de la production à celui de la demande. Trois niveaux d'action coexistent : les réglages primaires, secondaires et tertiaires.[34]

$$j \frac{d\Omega_t}{dt} = T_m - T_e \quad (III.1)$$

$j$  : inertie de l'arbre de la turbine [kg.m<sup>2</sup>] ;

$\Omega_t$  : Vitesse angulaire de la turbine [rad.s<sup>-1</sup>] ;

$T_m$ : Couple moteur [Nm] ;

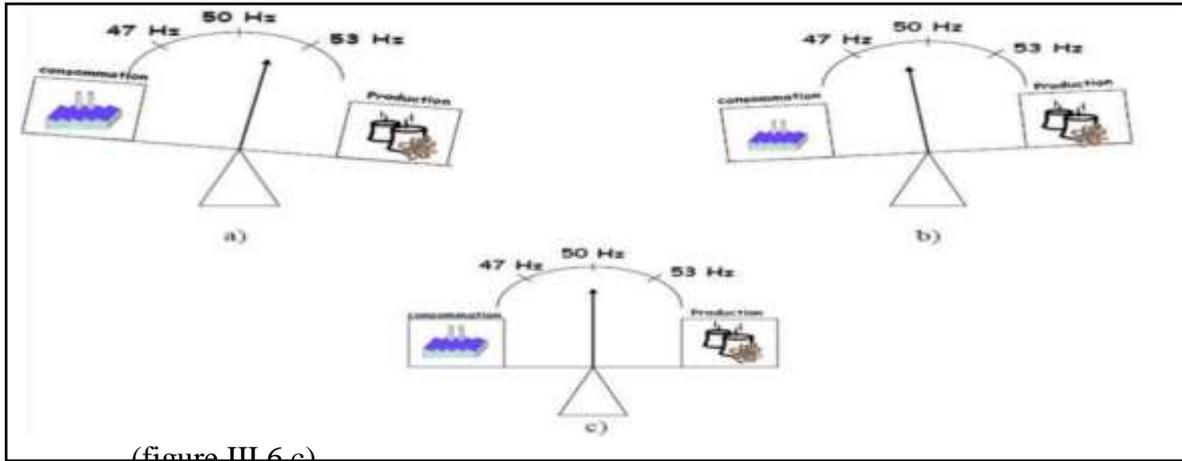
$T_e$  : Couple résistant [Nm].

$$\frac{1}{2} j \frac{d\Omega_t^2}{dt} = T_m \Omega_t - T_e \Omega_t = P_m - P_C \quad (III.2)$$

$P_m$  : Puissance produite [MW] ;

$P_C$  : Puissance consommée [MW].

- ❖ Si  $P_m > P_c$  ;  $\frac{d\Omega_t^2}{dt} > 0$  ; La turbine accélère, la vitesse de rotation augmente donc la fréquence augmente (figure III.6.a)
- ❖ Si  $P_m < P_c$  ;  $\frac{d\Omega_t^2}{dt} < 0$  ; La turbine décélère, la vitesse de rotation diminue donc la fréquence diminue (figure III.6.b)
- ❖ Si  $P_m = P_c$  ;  $\frac{d\Omega_t^2}{dt} = 0$  ; la vitesse de rotation reste stable donc la fréquence reste constante



(figure III.6.c)

Figure III.6. Evolution de la fréquence en fonction du niveau de production / consommation.[35]

### III.10. Régulation de la fréquence d'un réseau électrique

La régulation de la fréquence d'un réseau électrique est l'ensemble des moyens mis en œuvre afin de maintenir proches de leurs valeurs de consigne les grandeurs de la fréquence sur l'ensemble du réseau.

Le réglage de fréquence, est essentiel pour la sûreté, la qualité et l'optimisation du système électrique, ainsi il permet d'assurer le respect du plan de fréquence des réseaux interconnectés. Tout en permettant aux utilisateurs du réseau de faire fonctionner leurs matériels dans des conditions optimales, il assure aux gestionnaires du réseau une exploitation des réseaux à moindre coût et dans des conditions de sûreté satisfaisantes.

Le réglage de la fréquence est réalisé à l'aide de 3 groupes d'actions distinctes qui se différencient par leurs temps de réponse respectifs.[33]

#### III.10.1. Réglage primaire

Le réglage primaire de fréquence est indispensable à la sûreté du système électrique. En effet, face aux aléas et incidents tels que fluctuations rapides de la consommation (enclenchements tarifaires, déclenchements de charges...) et déclenchements d'unités de

production, c'est le dispositif qui rétablit automatiquement et très rapidement l'équilibre production - consommation et stabilise la fréquence à une valeur proche de la fréquence de référence.[33]

La réserve primaire (ou FCR) est une réserve de stabilisation de la fréquence dont le dimensionnement et les exigences techniques sont définies par la Policy on LFC&R (article A1).

Le réglage primaire est mis en œuvre par les utilisateurs du réseau, qui disposent de l'aptitude correspondante (entités de réserve de type « injection », « soutirage » ou « mixte »).

Pour les unités de production, le réglage primaire est mis en œuvre par l'action d'une régulation :

- ❖ Pour une unité synchrone, il s'agit du régulateur de vitesse de l'alternateur qui agit en général sur les organes d'admission du fluide moteur à la turbine lorsque la vitesse de l'alternateur (image de la fréquence) s'écarte de la vitesse de consigne par suite d'un déséquilibre entre la production et la consommation de l'ensemble du système européen interconnecté.
- ❖ Pour un parc non synchrone de générateurs, il s'agit d'un régulateur agissant pour modifier la valeur de puissance injectée lorsque la valeur de fréquence mesurée s'écarte de la valeur de référence.

Pour les entités de réserve de type « soutirage », le réglage primaire est obtenu soit en modulant le soutirage d'installations de consommation, soit en sollicitant alternativement en injection ou en soutirage des moyens de stockage internes à l'installation (batteries, volant d'inertie, etc...).

La fourniture de FCR peut être obtenue par combinaison des réactions mises en œuvre par plusieurs moyens de réglage. Cette association d'entités élémentaires de type « injection » ou « soutirage » constitue une entité de réserve de type « mixte » . .

Pour chaque entité de réserve  $j$  participant au réglage primaire de fréquence, la loi de réglage statique de la variation de puissance résultant de l'action du régulateur doit être de la forme :

$$|P_j - P_{cj}| = K_j |f - f_0| \quad (\text{III.3})$$

avec :

$P_j$  [MW] = Puissance réelle fournie par l'entité de réserve  $j$  en mode quasi stationnaire.

$P_{cj}$  [MW] = Puissance de consigne de l'entité de réserve j à la fréquence de référence  $f_0$ .

$f$  [Hz] = fréquence déduite de la mesure de vitesse d'une unité de production j synchrone ou fréquence mesurée localement sur le réseau (dans le cas d'un parc non synchrone de générateurs ou d'une entité de type soutirage ou mixte).

$f_0$  [Hz] = fréquence de consigne, généralement égale à la fréquence de référence (50 Hz).

$K_j$  [MW/Hz] = « Energie réglant » de l'entité de réserve j.

La compensation d'un écart du bilan production - consommation est assurée par une action répartie sur toutes les entités du système européen interconnecté synchrone participant au réglage primaire.

Les exigences techniques minimales en matière de participation au réglage primaire sont définies par le Règlement SOGL (article 154). Il est ainsi notamment précisé que l'énergie réglant de la zone synchrone continentale doit permettre de libérer la totalité de la réserve primaire (FCR) pour un écart de fréquence de 200 MHz.

La fréquence  $f_1$  atteinte en fin d'action du réglage primaire est différente de la fréquence de consigne  $f_0$ , et l'écart entre  $f_1$  et  $f_0$  est d'autant plus faible que l'énergie réglant totale du système européen interconnecté synchrone est grande.

La compensation d'un écart du bilan production - consommation  $P_{bil}$  par l'ensemble des entités réglant est égale à :

$$P_{bil} = -\sum_j (P_{bil} - P_{cj}) \quad (III.4)$$

L'écart de fréquence résultant se détermine alors par l'équation suivante :

$$f_1 - f_0 = \frac{P_{bil}}{\sum_j K_j} \quad (III.5)$$

Avec :

$\sum K_j$  [MW/Hz] = Energie réglant totale du système européen synchrone.

Et chaque entité réglant j produit :

$$P_j = P_{cj} - K_j(f_1 - f_0) \quad (III.6)$$

Cependant, le réglage primaire ne rétablit l'équilibre offre - demande que si les GRT disposent d'une réserve de puissance - la réserve primaire (Frequency Containment Reserve - FCR) - suffisante.

### **III.10.2. Réglage secondaire**

Pour résoudre l'écart de fréquence, on fait appel à une énergie réglante secondaire. Ce réglage n'est pas local mais national. Le dispatching national calcule à partir des données de fréquence et de transits sur les lignes d'interconnexion, la production nationale indispensable pour ramener la fréquence à sa valeur nominale et de rétablir les transits sur les lignes d'interconnexions aux valeurs contractuelles. Automatiquement les groupes participant au réglage secondaire et connectés au dispatching national, vont faire évoluer leur puissance apportée pour apporter cette énergie réglante secondaire. À la fin de ce réglage, la fréquence retrouve sa valeur nominale et les échanges entre réseaux interconnectés sont rétablis à leur valeur contractuelle.[33]

L'action du réglage primaire laisse subsister un écart de fréquence par rapport à la fréquence de consigne  $f_0$ . Elle provoque également des écarts sur les échanges entre les pays du système interconnecté synchrone : en effet, toutes les entités des différents pays du système interconnecté synchrone participant au réglage primaire réagissent à la variation de fréquence commune, que la perturbation se produise sur le système électrique du pays ou en dehors de celui-ci.

La demande liée à un écart de réglage secondaire d'une zone de réglage fréquence-puissance (zone RFP) a donc pour but :

- ❖ de retrouver le programme d'échange initialement convenu entre la zone origine de la perturbation et l'ensemble des zones voisines auxquelles elle est interconnectée, et de ramener la fréquence du système synchrone à sa valeur de référence ;
- ❖ et ainsi, de reconstituer la réserve primaire (FCR) engagée par l'ensemble des membres du RGCE de l'ENTSO-E pour pallier tout nouveau déséquilibre production - consommation.

La réserve secondaire fait partie des réserves de restauration de la fréquence (frequency restoration reserve – FRR) . Il s'agit d'une FRR automatique (aFRR), dont le dimensionnement et les exigences techniques sont définies par SOGL (Titre 6 – articles 157 à 159) et déclinées dans l'accord de bloc RFP RTE.

Une unité de production participant aux réglages primaire et secondaire doit produire :

$$P(t) = P_0 + (K \cdot \Delta f(t)) + (N(t) \cdot P_r) \quad (\text{III.7})$$

Où :

$P(t)$  : la puissance active produite à l'instant  $t$  ;

$\Delta f(t)$  : l'écart de fréquence au même instant ;  $N(t)$  : la valeur du niveau ;

$P_0$  : le programme de marche de l'installation ;

$K$  : son gain primaire ;

$P_r$  : son engagement de participation au réglage secondaire.

Il faut toujours vérifier la réaction des réglages primaire et secondaire de l'unité participant au réglage de la fréquence sont rapide afin de rétablir promptement et sans instabilité l'équilibre production-consommation parce que les groupes de production ont des temps de réponse variables en fonction de leur technologie et des réglages de leurs régulations.

On mesure l'écart  $\Delta f$  par rapport à sa valeur de consigne  $f_{0i}$ , on mesure pour chaque réseau l'écart  $\Delta P_i$  entre la puissance total  $P_i$  échange par ce réseau avec tous ses voisin et la valeur programmée de cette puissance  $P_{i0}$  écart de puissance à l'interconnexion).

$$\Delta P_i = P_i - P_{i0} \quad (\text{III.8})$$

La loi de réglage fréquence-puissance est :

$$\Delta E = \Delta f - \frac{\Delta P}{\lambda} = 0 \quad (\text{III.9})$$

Le RS régule la variable d'écart  $\Delta E$ , c'est-à-dire il ramené l'écart  $\Delta f$  et  $\Delta P_i$  a une valeur très faible qui est presque nulles.

Quand on termine le réglage la valeur initiale de la fréquence retrouver et aussi échanges entre réseaux interconnectée sont remis à leur valeurs initiale.

### **III.10.3. Réglage tertiaire**

Le réglage tertiaire intervient si l'énergie réglant secondaire disponible est insuffisante. Ce réglage n'est pas automatique comme le primaire et le secondaire mais manuel. Il correspond à

un ensemble de contrats avec les producteurs plus ou moins contraignants en temps de réponse et en puissance requis. C'est un appel sur le mécanisme d'ajustement. Cette réserve d'énergie tertiaire est dite rapide si mobilisable en moins de 15 minutes ou complémentaire si mobilisable en moins de 30 minutes.[33]

Le réglage tertiaire est l'utilisation (et la gestion) de la réserve tournante. Il permet :

- ❖ D'un point de vue global, répartissant les réserves de puissance nécessaires sur les différents groupes, au détriment des réglages primaires et secondaires.
- ❖ D'un point de vue local, de effacer tout problème pouvant apparaître sur le réseau de transport.
- ❖ D'un point de vue économique, dans certains pays, à l'aide de modèles de dispatchings économiques de façon centralisée au niveau de chaque compagnie ou d'un pool de compagnies en diversifier la production en fonction des couts de chaque unité. Ce réglage est manuel à temps de réponse de l'ordre de dizaine de minutes, avancement des études ont pour but d'automatiser toute la procédure. Le problème technique est difficile à résoudre, car la dimension du système production-transport est très grande, le parc est diversifié et l'automatisation de la conduite des unités nucléaires pose des problèmes très particuliers.

#### **III.10.4. Calcule de la déviation de la fréquence du logiciel PSAT**

La régulation de la fréquence de la charge et de la production dans les systèmes de distribution ne doit pas être négligée en raison d'une inertie moindre. La fréquence aurait une influence sur la répartition de la charge et de la production. Ainsi, la caractéristique statique de la fréquence devrait également être intégrée dans les modèles d'accès. Les caractéristiques statiques complètes des modèles d'accès peuvent être exprimées de manière universelle comme suit : [36]

$$PV \begin{cases} P = P(V, f) \\ Q = Q(V, f) \end{cases} \quad (III.10)$$

Lors du calcul du point d'équilibre, l'accès caractéristique statique peut être considéré comme un accès de type PQ ou PV avec une puissance variable dans la plage de tension, de fréquence et de puissance autorisée.

Son modèle d'accès doit posséder simultanément la caractéristique statique de fréquence

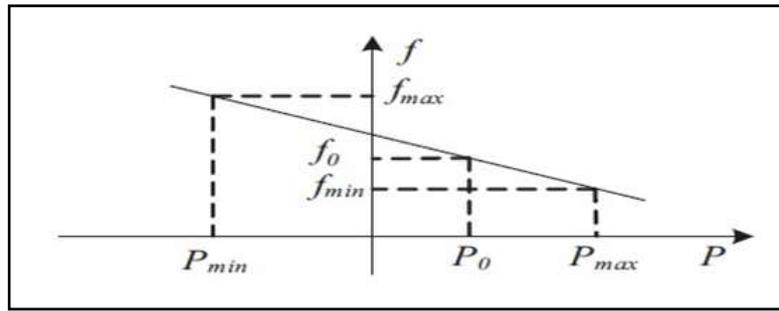


Figure III.7. Statisme de la puissance active et de la fréquence. [36]

$$P = P_0 - (f - f_0)/mp \quad (\text{III-11})$$

$mp$  : est le coefficient de chute.

Comme le montre la figure III.7, la puissance de sortie réelle de l'ESS varie de manière linéaire avec la fréquence du système, en suivant la relation de statisme représentée par la ligne continue.

$$PL = PL_0 \left( 1 + \frac{KpL \Delta f}{f_0} \right) (V - V_0) \quad (\text{III.12})$$

$PL_0$ : la puissance active nominale ;

$V$  et  $V_0$  : respectivement la tension réelle et de référence ;  $f_0$  : la fréquence nominale ;

$KpL$  : le coefficient de dépendance de la fréquence de la charge ;

$\alpha$  : le coefficient de dépendance de la tension de la puissance active (Les valeurs typiques des coefficients de dépendance sont disponibles dans [37]).

Pour calculer la fréquence, une équation supplémentaire de bilan de puissance réelle sur l'accès bilan est également incluse.

$$(\text{III.13})$$

$$-\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta P_s \\ \Delta P_L \end{bmatrix} = J' \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \\ \Delta f \\ \Delta P_{Loss} \end{bmatrix}$$

On a:

$$\Delta f = \frac{\Delta P}{K} \quad (\text{III.14})$$

On a aussi :

$$\Delta P_i = P_{is} + K_i \cdot P_{loss} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (\text{III.15})$$

$G_{ij}$  et  $B_{ij}$  : respectivement les parties réelle et imaginaire du (i, j) ème élément de la matrice d'admittance ;

$P_{ploss}$  : les pertes réelles ;  $P_{is}$ : la puissance injecté ;

$K_i$  : facteur de participation.

Où les pertes sont calculées par la somme des puissances injectées (III.15) :

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^n V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (\text{III.16})$$

Et :

$$P_{is} = P(V, f) - PL_i(V, f) \quad (\text{III.17})$$

Et :

$$PG_i = PG_{i\text{load}} + K_{ip\text{loss}} \quad (\text{III.18})$$

On remplaçant l'équation (III.16) dans (III.17) :

$$\Delta f = \frac{\theta_1 - \theta_0}{T_f \cdot 2\pi f} \quad (\text{III.19})$$

$T_f$  : constante de temps

Finalemnt :

$$\Delta f = \frac{\Delta \theta}{T_f \cdot \omega} \quad (\text{III.20})$$

### III.11. Réglage de la tension

La tension et la fréquence sont des paramètres très importants pour l'exploitation d'un système électrique. En effet, ces grandeurs sont les garants du bon fonctionnement de L'exploitation du réseau tant du point de vue du consommateur, dont certaines machines tournantes ou autres appareils (transformateurs, convertisseurs, etc.) sont dimensionnés pour des valeurs de fréquences ou de tensions fixes, que du point de vu de l'exploitant puisqu'un contrôle efficace de tension et de fréquence garanti une bonne qualité et une bonne continuité de service.

Ceux-ci fixent la plage de variation limites en tension devant être respectées en chaque point de livraison ainsi que les limites de fonctionnement au-delà desquelles des systèmes de coupure telle que les protections de découplage doivent intervenir. Pour le cas des réseaux de distribution, les limites de fonctionnement sont données par le Tableau III.1. [38]

Tableau III.1. Limites de fonctionnement du réseau de distribution.

	Tension et fréquence normales	Déviations maximales de tensions autorisées	Marges de variations de fréquences autorises
BT	Un=400V Fn=50Hz	+6 % -10 %	± 0.05 Hz
HTA	Un=20kV Fn=50Hz	± 5%	± 0.05 Hz

Les variations de puissances consommées sur le réseau sont inévitables et dépendantes de plusieurs facteurs comme la période de la journée, les saisons ou encore les secteurs de consommations (tertiaires, industriels ou résidentiels). Or, cet équilibre entre la production et la consommation est un facteur de fluctuation de l'onde de tension. Ainsi, plus la production est importante par rapport à la consommation plus la tension sera élevée et inversement. La tension évolue donc également en permanence, le paragraphe suivant expose quels sont les dispositifs de réglage permettant de conserver la tension dans les limites admissibles. [38]

Les charges présentes sur le réseau électrique consomment une certaine quantité de puissance active mais également une part plus ou moins importante de puissance réactive selon leurs types et leurs caractéristiques. Cette puissance réactive appelée est en partie fournie par les groupes de productions connectés au réseau de transport ou encore par des dispositifs de compensations d'énergie réactive. Cependant, le transit de puissance réactive n'est pas idéal. En

effet, pour ce niveau de tension, les lignes ont un caractère plus inductif que résistif, le transit de puissance réactive induit donc de forte chute de tension. De plus, le fait de faire transiter de la puissance réactive dans une ligne diminue la puissance active maximale transmissible par celle-ci. [39]

### **III.11.1. Réglage primaire de tension**

Le réglage primaire de tension est assuré par les groupes de production équipés d'un régulateur primaire de tension. Grâce à ce régulateur les alternateurs fixent la tension à une valeur de consigne sur leur point de raccordement. Le principe est d'agir sur l'excitation d'alternateur pour garder le niveau de tension désiré. En effet, si l'alternateur est surexcité celui-ci va produire de la puissance réactive ce qui aura pour effet d'accroître la tension à son point de connexion. Inversement, dans le cas d'une sous excitation de l'alternateur celui-ci va absorber de la puissance réactive et donc faire diminuer la tension à ses bornes. Ceci est réalisable dans les limites propres de chaque alternateur. [40]

### **III.11.2. Réglage secondaire de tension**

Comme pour la fréquence les réglages primaires sont réalisés de manière locale par chacun des groupes de production concernés. Ils agissent rapidement mais doivent être coordonnés pour éviter toute dérive ou encore pour optimiser le fonctionnement de groupes proches et éviter que certains fournissent trop de puissance réactive pendant que d'autres n'en fournissent pas ou pire en absorbent, c'est le rôle du réglage secondaire de tension (RST). [40]

Ce réglage de tension est envisagé par région ou zone. Ces zones sont des parties de réseau dont les évolutions du plan de tension sont sensiblement différentes. Sur cette zone est défini un noeud particulièrement représentatif de l'évolution de la tension, ce noeud est appelé « point pilote ». Le principe du RST est de réguler la tension en ce point pilote du réseau en agissant sur les productions de puissance réactive des groupes participants au réglage. Les mesures de tension sont fournies au RST qui calcule de nouvelles consignes de tension pour les groupes réglant dans le but de fixer la tension au point pilote. [38]

### **III.11.3. Réglage tertiaire de tension**

Le réglage tertiaire est nécessaire pour coordonner les actions entre deux zones régies par des RST différents. Ce réglage est effectué par les opérateurs de dispatching régional et comprend le calcul des tensions aux points pilotes. [39]

Ces réglages hiérarchisés permettent de réguler la tension sur les réseaux HTB (transport et répartition). Pour le réseau de distribution le contrôle se fait localement à l'aide de systèmes gérant l'apport en puissance réactive nécessaire afin de limiter le transit de cette puissance sur les réseaux amont via les postes HTB\HTA qui occasionnent des pertes supplémentaires. [40]

### **III.11. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons montré l'importance du réglage de la tension et de la fréquence dans les réseaux électriques. Ensuite, nous avons abordé les services systèmes de réglage de fréquences à trois niveaux (primaire, secondaire et tertiaire) qui sont chargés d'assurer l'équilibre entre consommation et production. Et puis nous avons parlé du principe du réglage de la tension et le moyen de les réaliser en présence d'une production d'énergie dans le réseau.

La demande d'électricités est dépendante des variations saisonnières avec les différentes caractéristiques au tout long de l'année.

Le déséquilibre dans le réseau de distribution est causé par l'intégration de la production décentralisée ou bien le changement imprévu des charges. Pour avoir un équilibre dans le système, il faut avoir une coordination entre les dispositifs de réglage de la fréquence et la production intégrée.

# **Chapitre IV**

## **Réglage de la tension et de la fréquence sur un réseau et résultats**

## **IV. Réglage de la tension et de la fréquence sur un réseau et résultats**

### **IV.1. introduction**

L'évolution de la population fait croître une hausse de charge qui met une pression énorme sur le réseau de distribution, cela provoque des déséquilibres et des perturbations sur la stabilité des services publics.

Cette demande excessive rend la transmission d'une énergie centralisée vers le réseau de distribution difficilement réalisable vu le modèle de système utilisé, une telle transmission de l'énergie va causer beaucoup de tort au réseau en engorgeant le système de transmission. C'est l'une des raisons qui a poussé les chercheurs à des solutions qui comportent une reconfiguration en intégrant une production décentralisée dans le système de distribution.

Les énergies renouvelables (éoliennes, solaires) présentent un double inconvénient :  
- Elles sont aléatoires, car elles dépendent de phénomènes naturels hors du contrôle de l'homme ;

- La densité de production est faible, les fermes solaires ou éoliennes sont dispersées sur tout le territoire national.

L'analyse de la stabilité de la fréquence et de la tension des réseaux de distribution est d'une importance capitale à cause de l'intégration des énergies renouvelables dans le réseau de distribution. Mais il y'a une autre conséquence moins évidente sur les adaptations que les fluctuations de production induisent sur le réseau en perturbant la stabilité.

L'intégration d'une grande quantité d'énergie renouvelable peut affecter la stabilité et la performance d'un réseau électrique autonome.

Dans ce chapitre on va présenter une simulation du réseau radial sans et avec production distribuer en augmentant et en diminuant la production intégrée sur la base de la déviation de la fréquence et des profils de tensions et de la capacité de charge. Une solution et une amélioration sur les chutes de tension et des fluctuations de la fréquence est proposée, en passant par les mêmes étapes en augmentant et en diminuant la puissance injectée. Un système de IEEE 33 JDB est utilisé comme système test, toutes la simulation sont effectués sous matlab avec outils d'analyses des réseaux électriques (PSAT).

## IV.2. PSAT comme outil de simulation

Plusieurs outils de simulation ont été utilisés dans l'analyse et l'étude des réseaux électriques tels que (Matlab, EMTP, Etap, PowerWorld, PSAT,... etc). Ces logiciels permettent de nous renseigner sur les différents facteurs d'un réseau électrique et à simuler les différents cas pour avoir les paramètres du réseau. Ces derniers utilisent les mêmes concepts. Dans ce mémoire, le logiciel PSAT est utilisé pour l'analyse de la stabilité de tension d'un réseau de distribution.

PSAT est un logiciel librement distribués conçu par Federico Milano basé sur MATLAB pour l'analyse et l'optimisation des réseaux électriques. L'interface graphique interactive du PSAT permet à l'utilisateur d'effectuer les fonctions statiques et dynamiques suivantes [41]:

- ❖ Calcul d'écoulement de puissance (*Power Flow- PF*).
- ❖ Calcul d'écoulement de puissance Optimal (*Optimal Power Flow- OPF*).
- ❖ Calcul continu de l'écoulement de puissance (*Continuation Power Flow- CPF*).
- ❖ Analyse de la stabilité de petites perturbations (*Small Signal Stability Analysis- SSSA*).
- ❖ Simulation temporelle (*Time Domaine Simulation- TDS*).
- ❖ Analyse transitoire d'électromagnétique (*Electro Magnetic Transient Analysis- EMT*)
- ❖ Interface graphique (*Graphical User Interface- GUI*)
- ❖ Éditeur de réseau graphique (*Graphical Network Editor- GNE*)

### IV.2.1. Fenêtre de PSAT

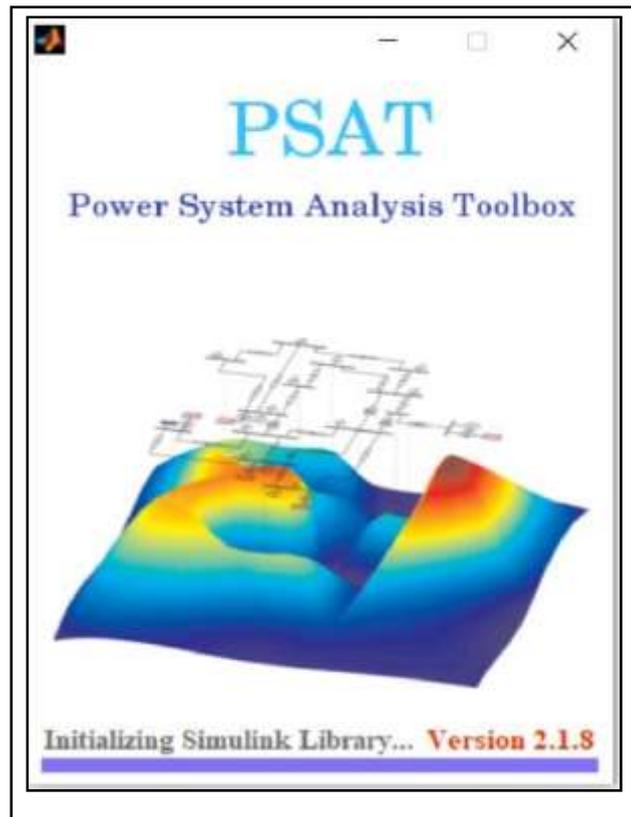


Figure IV.1. Fenêtre de PSAT [41]

Le PSAT inclut : [42]

- ❖ L'écoulement de puissance base sur la méthode de NEWTON-RAPHSON
- ❖ L'écoulement de puissance,
- ❖ La stabilité de tension,
- ❖ Time Domain,

### IV.2.2. Editeur de PSAT et Bibliothèque de SIMULINK

Toutes les opérations de PSAT sont réparties en deux types d'analyse :

- ❖ La première analyse est le calcul de l'écoulement de puissance. Cette application s'effectue dans une page de commande ou un éditeur comme montre la Figure IV.2.
- ❖ La seconde opération consiste à construire le réseau à étudier en utilisant une bibliothèque de simulink qui contient de nombreux modèles unifilaires (Figure IV.3).



Figure IV.2. L'éditeur de PSAT [42]

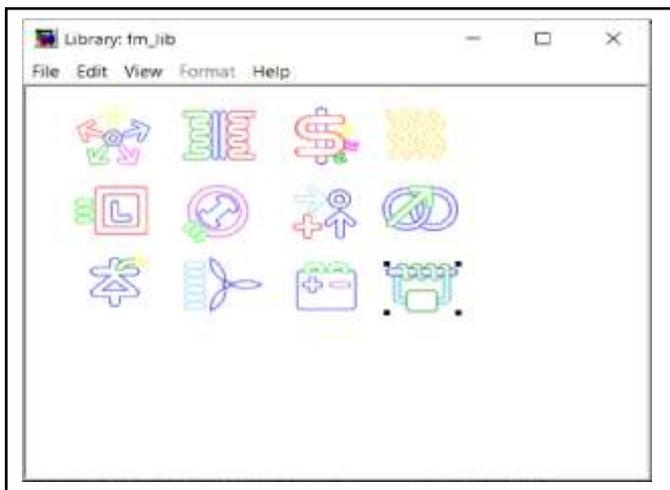


Figure IV.3. Bibliothèque de simulink [42]

### IV.2.3. Utilisation de PSAT

On utilise le PSAT :[43]

- ❖ Ouvrir MATLAB
- ❖ Ecrire « psat » dans la « command window » de MATLAB
- ❖ Ouvrir un nouveau fichier
- ❖ Créer du réseau électrique à étudier ☞ Lancer le modèle de la bibliothèque de simulation
- ❖ Introduire les données numériques des éléments (générateur, lignes, charges, transformateurs,...).
- ❖ Enregistrer le modèle.
- ❖ Charger le modèle :
  - ✓ Click deux fois sur « data file » de page d'accueil de PSAT.
  - ✓ Choisir « .mdl » de « Filters » puis « tests » de 'Folders in currentpath' et à partir de « Files in currentpath » on charge le modèle d'étude et click sur « load » pour la terminaison de charger.

Pour l'étude à l'état initial :

- ❖ Exécuter l'écoulement de puissance (Power Flow).

Puis pour l'étude à l'état statique :

- ❖ Exécuter l'écoulement de puissance continue « CPF »

### IV.3. Méthodologie

#### IV.3.1. Placement du DG (Génération d'énergie dispersée (Distributed generation)) (figure IV-4)

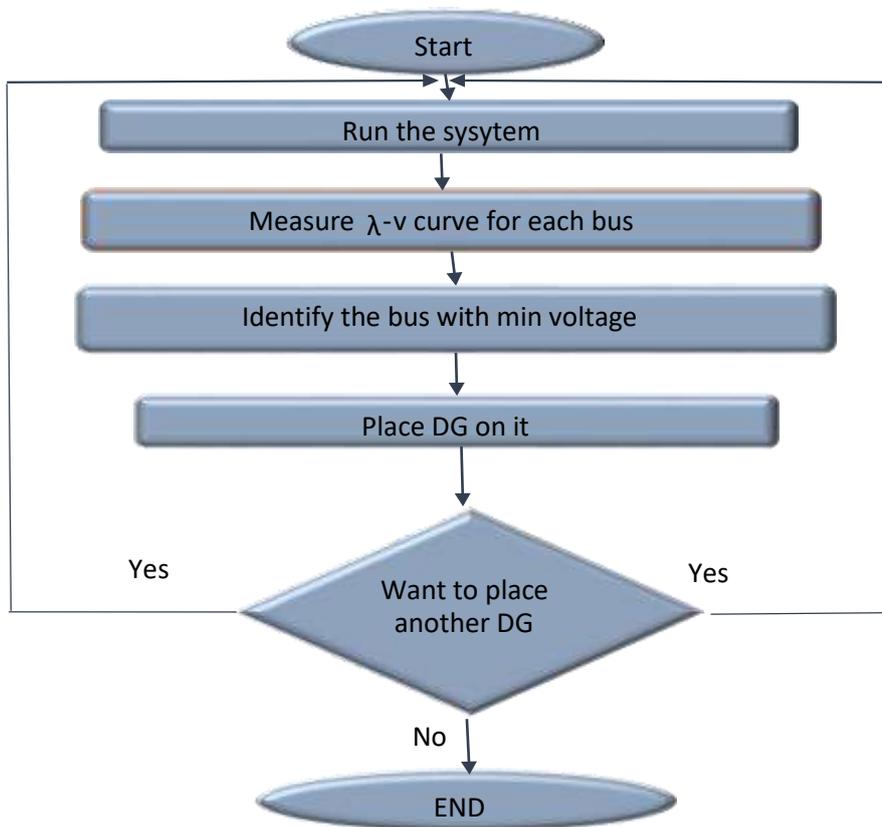


Figure IV.4. Organigramme du placement de la DG.

Dans ce travail la fréquence et les tensions analysées du point de vue de la variation de la production de DG, l'écart des grandeurs par rapport aux valeurs standards est mesurée et analysée par rapport à la diminution et à l'augmentation de la capacité de production. Pour le placement de la DG, on simule d'abord le système de base sans DG et la courbe  $\lambda$ -V sur chaque accès est observée, et l'accès avec la caractéristique de tension la plus basse est identifiée. La production décentralisée est placée sur cet accès.

#### IV.3.2. Mesure de la fréquence sur PSAT

Toutes les simulations sont effectuées avec l'outil d'analyse du réseau électrique (PSAT) dans l'environnement MATLAB, la bibliothèque spéciale Simulink de PSAT possède également un bloc de mesure de la fréquence (figure IV.5). La fréquence est calculée par l'écoulement de

puissance ‘power flow’ elle utilise son approche de correction des prédicteurs pour trouver la solution. Dans un premier temps de nouvelles valeurs sont prévues sur la base des valeurs précédentes par la méthode de Newton-Raphson, ensuite la valeur prévue est corrigée pour obtenir la solution réelle par la méthode de Newton-Raphson. La caractéristique de ‘power flow’ reste bien conditionner même au point de bifurcation.

L’interface graphique de PSAT permet de tracer librement la fréquence, la tension et les paramètres de charge en fonction de chacun de ces paramètres, ce qui donne une meilleure vue d’ensemble et une meilleure comparaison entre ces quantités. [41]

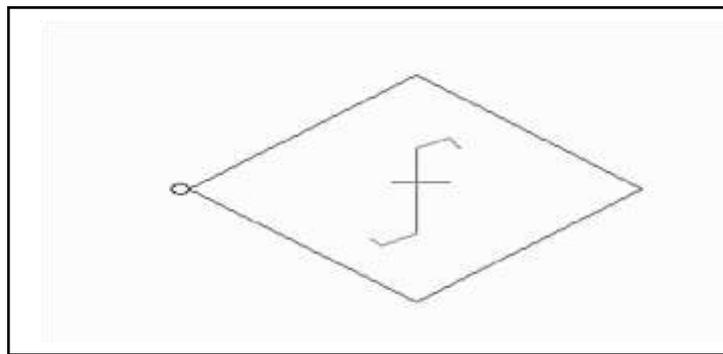


Figure IV.5. Bloc de mesure de fréquence [41]

#### IV.3.2.1. Présentation de power flow

Le calcul de l’écoulement de la puissance est une étape nécessaire pour l’étude de la stabilité d’un réseau électrique. Il est effectué en premier lieu pour la détermination des conditions initiales du système avant le choix d’une solution et la prise de décision pour résoudre ce problème posé

En effet, il permet de trouver les tensions aux différents nœuds, les puissances transmises à travers tous les éléments du réseau et injectées les puissances au niveau de l’accès bilan et les accès générateurs. Les résultats du calcul de l’écoulement de puissance sont obtenus à partir d’un programme utilisant la méthode de résolution de Newton-Raphson.[42]

#### IV.3.2.2. Présentation du CPF

L’écoulement de puissance continue (CPF : continuous power flow) fait l’écoulement de puissance tout en variant la charge, il permet de tracer les courbes de charge P-V d’un réseau électrique et également de déterminer l’indice de stabilité et de calculer la puissance maximale que le réseau peut satisfaire et à partir de là que le réseau devient instable. Il est basé sur

l'application de la matrice jacobienne de Newton-Raphson. Il prédit séquentiellement une solution et corrige cette solution prédite pour l'intégrer à la courbe PV.

L'écoulement de puissance continue passe par plusieurs étapes pour le calcul de chaque point de la courbe PV. Ces étapes sont résumées comme suit : [42]

- ❖ Un paramètre de charge doit être inséré dans les équations de la puissance de charge et de la puissance de production,
- ❖ Les équations de flux de puissance sont modifiées pour inclure ce paramètre,
- ❖ La nouvelle matrice jacobienne augmentée est calculée, la solution est ensuite corrigée par l'écoulement de puissance conventionnel en utilisant la matrice jacobienne augmentée modifiée,
- ❖ A chaque étape, un paramètre de continuation approprié doit être sélectionné le long du chemin de la solution afin d'éviter toute singularité dans la matrice jacobienne.

## **IV.4. Simulation**

La simulation est effectuée sur PSAT pour l'étude de la stabilité de la tension et de la déviation et la stabilité de la fréquence. Le système radial de test de la norme IEEE 33 JdB est pris comme exemple (figure IV.7). PSAT permet d'évaluer les niveaux de tension de tous les JdB et d'évaluer les déviations de fréquence par un bloc de mesure de fréquence placé sur le JdB juste après l'accès bilan.

On a 3 cas à étudier :

- ❖ Cas 1 : présentation d'un réseau radial de 33JdB IEEE standard sans aucun DG.
- ❖ Cas2 : intégration de DG au réseau de 33JdB IEEE avec diminution et augmentation de puissance de la DG (supposée imprévue et due au changement des conditions climatiques)
- ❖ Cas3 : amélioration du profil de la tension et de la stabilité de la fréquence du réseau de 33JdB IEE avec diminution et augmentation de puissance.

### **IV.4.1. Présentation des réseaux et ses caractéristiques**

Les caractéristiques du réseau radial de distribution IEEE 33 JdB sont données comme suit :

- ❖ Nombre de jeux de barres =33 ;
- ❖ Nombre de branches =32 ;

- ❖ Accès bilan =1 ;
- ❖ Tension de base =12,66kV ;
- ❖ Puissance de base = 10 MVA ;

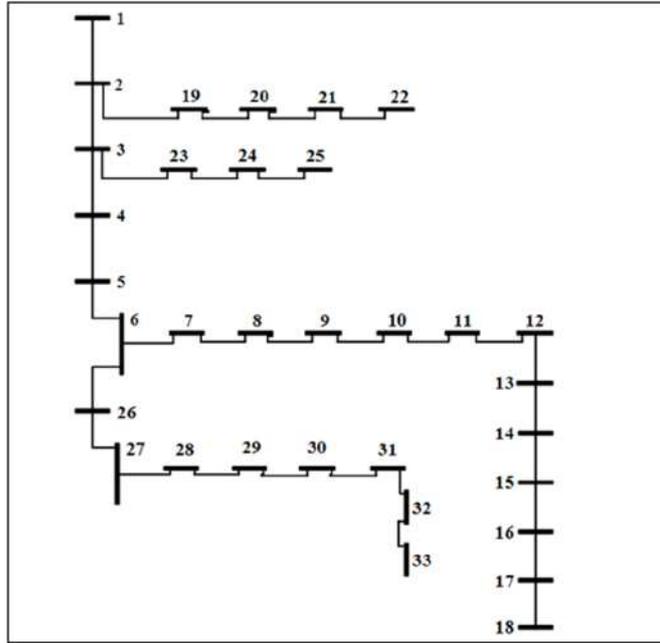


Figure IV.6. Représentation simplifiée du réseau radial de distribution IEEE 33 accès.

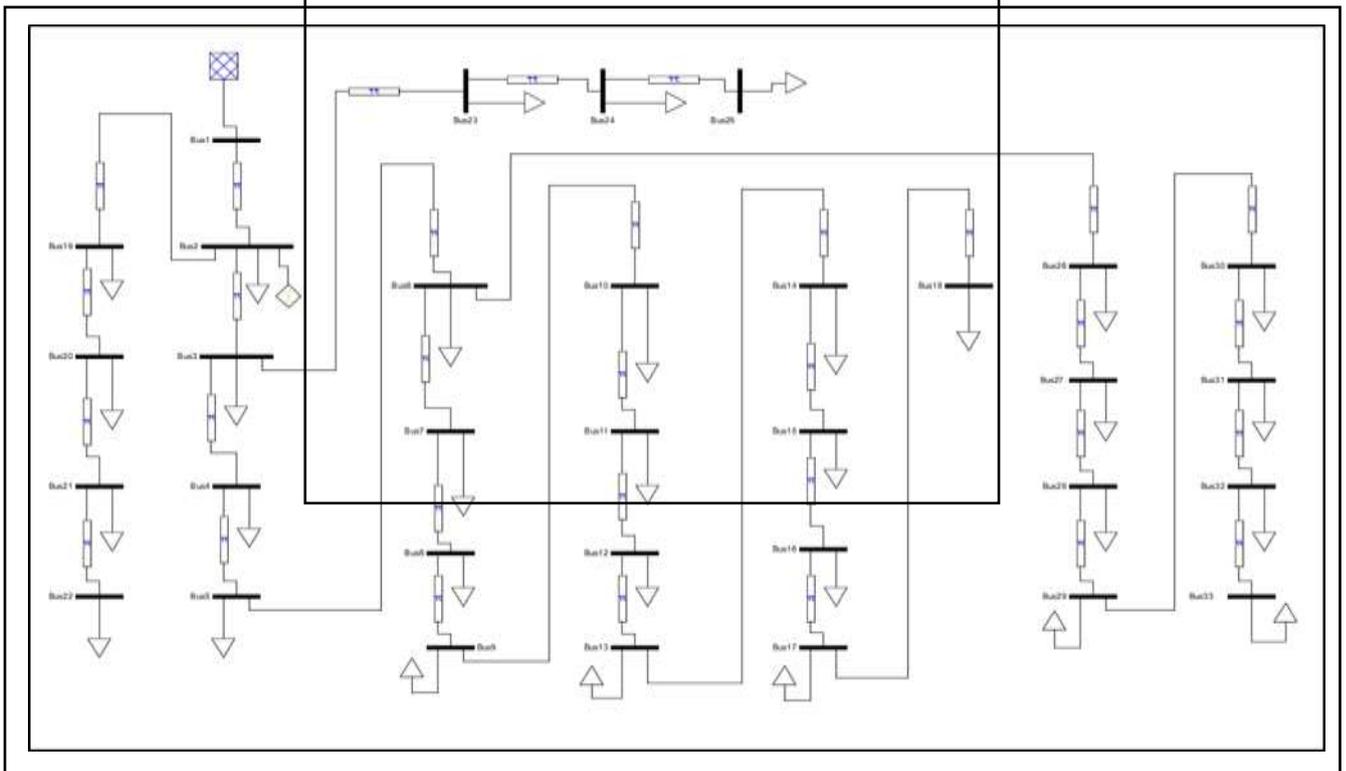


Figure IV.7. Représentation du réseau radial IEEE 33 accès radial.

## IV.5. Simulation, résultats et interprétation

### IV.5.1. Réseau de 33 JDB IEEE standard sans aucun DG :

Après la création de réseaux de 33 JdB radial, on a fait les simulations suivantes :

On a d'abord effectuée le calcul de l'écoulement de puissance (PF) du réseau en prenant en compte son état actuel sans variation de la charge. L'écoulement de puissance pour PF donne le profil des niveaux de tension et le bilan de puissance représenté par la figure IV.8.

On ensuite effectuée le calcul de l'écoulement de puissance continue CPF en augmentant la charge progressivement jusqu'au pont d'instabilité en mesurant le profil des tensions des JDB et les déviations de la fréquence.

Le CPF détermine aussi les puissances injectées aux niveaux des JDB et transmises au niveau des éléments des réseaux.

Le profil de tension dans les différents jeux de barre de réseaux radial est représenté dans la figure IV.8.

La déviation de la fréquence  $\Delta f$  et la chute de tension  $\Delta V$  en fonction de la charge pour le réseau radial sont représentés respectivement dans la figure IV.9.

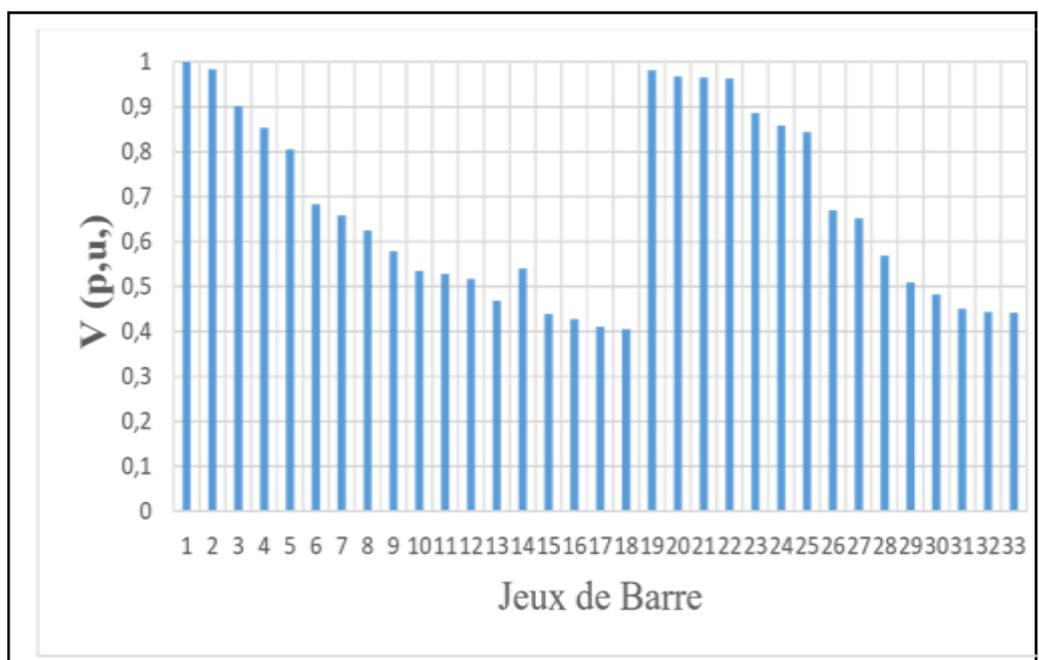
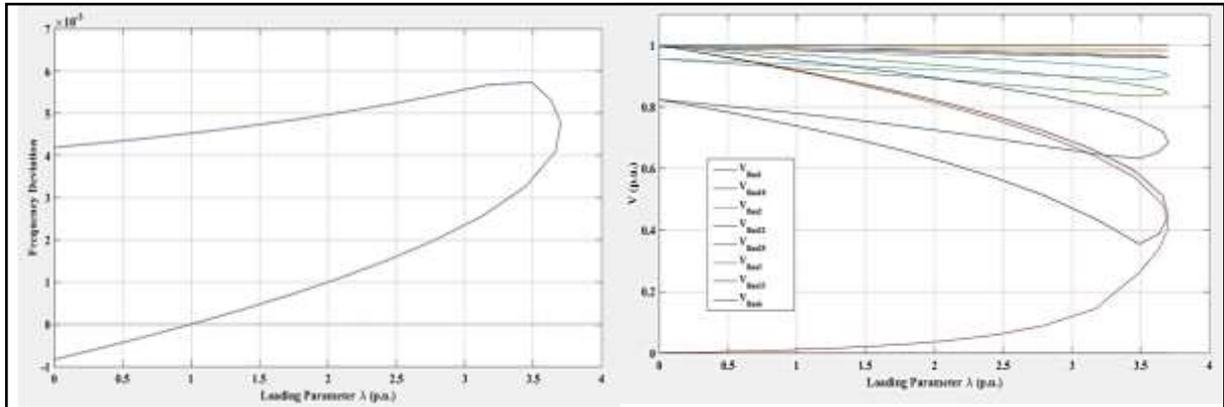


Figure IV.8. Profile de tension des jeux de barre pour le réseau radial sans DG



a) Courbe représentant  $f-\lambda$   
du réseau radial sans DG

b) Courbe de charge (P-V) du  
réseau radial sans DG.

Figure IV.9. Courbe de variation  $f-\lambda$  de la fréquence et courbes de charge (P-V) sans DG.

## IV.5.2. Intégration au JDB 18 du réseau d'une DG soumise à une intermittence de 25%,50% et 75%.

### IV.5.2.1. Insertion de la DG au JDB 18 dans les conditions climatiques normales sans intermittence.

Le réseau doit satisfaire une demande de puissance estimée à (0.9pu), la DG est supposée produire une puissance de (0.37pu) dans un premier temps la DG est insérée au JDB ayant le profil de la tension le plus bas qui est le JDB 18.

Le réseau a été simulé sur PSAT d'abord dans les conditions climatiques normales sans diminution de la production de la DG. Le profil de la tension des JDB obtenu par PF est donné par la figure IV.10.

L'évolution des tensions niveau du jeu de barre 1 jusqu'au JDB 18.

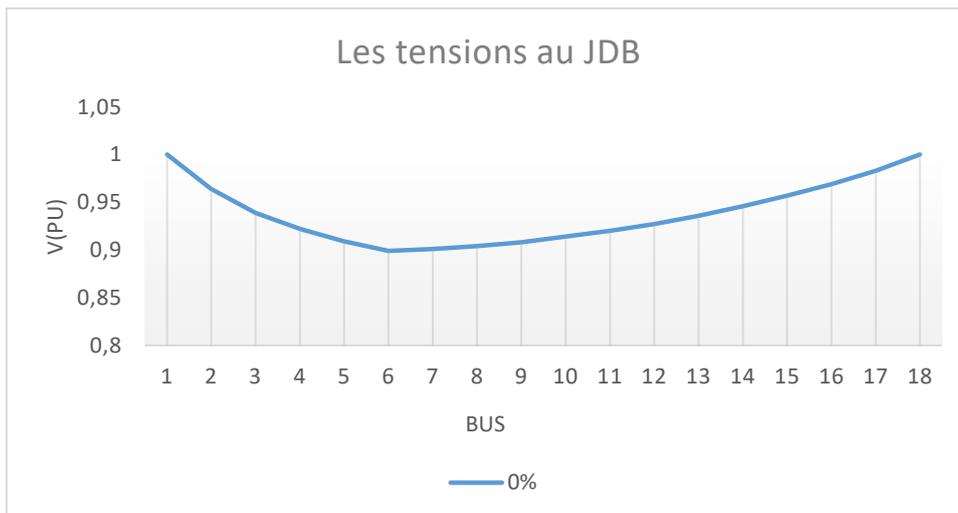
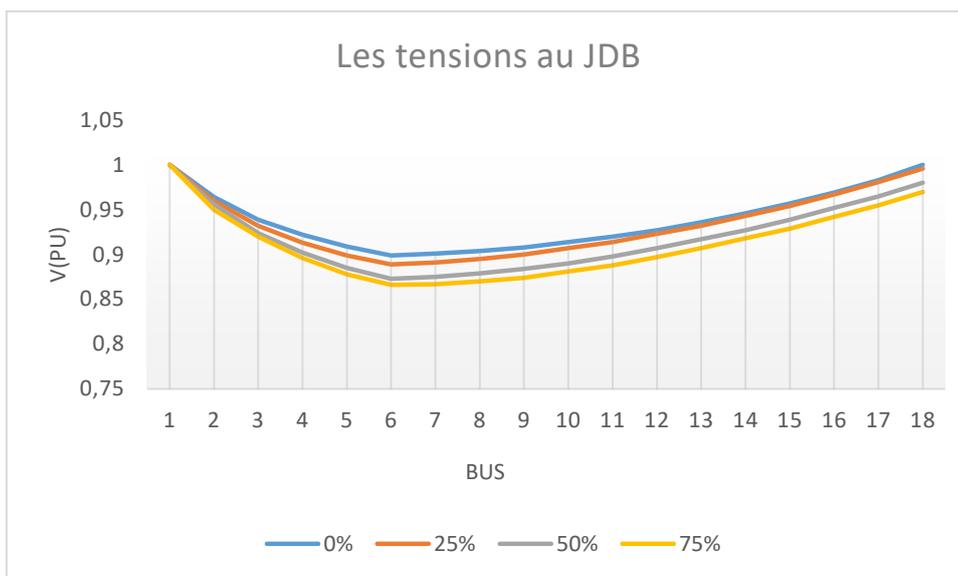


Figure IV.10. Profil des tensions des JDB dans les conditions climatiques normales sans intermittence de la DG.

**IV.5.2.2. Intermittence de la DG caractérisée par une diminution de la production (25%,50%et 75%)**

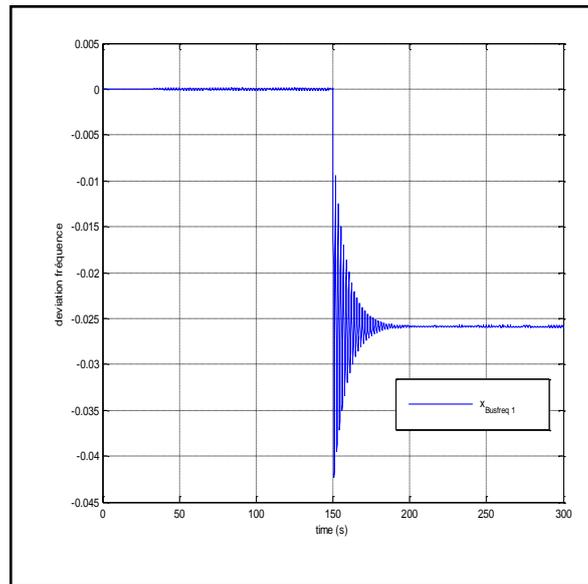
On a simulé notre réseau en supposant des conditions climatiques imprévues conduisant à une diminution de la production de la DG de 25% ,50% et 75%.

Le profil de la tension obtenus par pf des JDB est représenter par la figure IV.11, le régime transitoire obtenu par T.D du a la diminution de la production de la DG (25%,50% et 75%) de la déviation de fréquence  $\Delta f$  et des tensions des JDB sont représentées respectivement par les

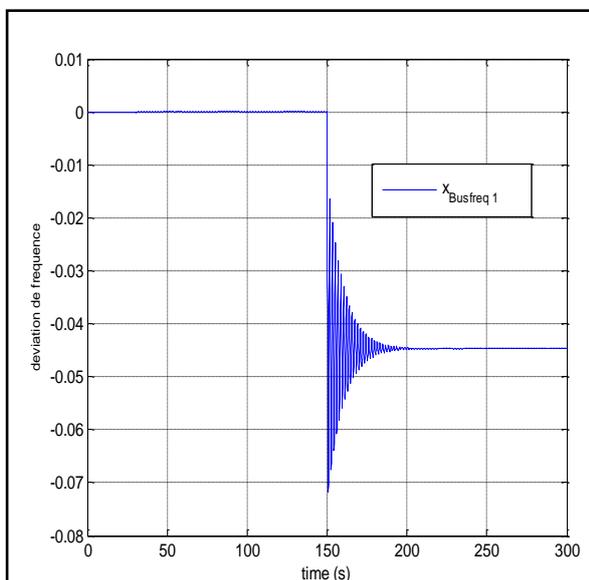


figures IV.12 et IV.13.

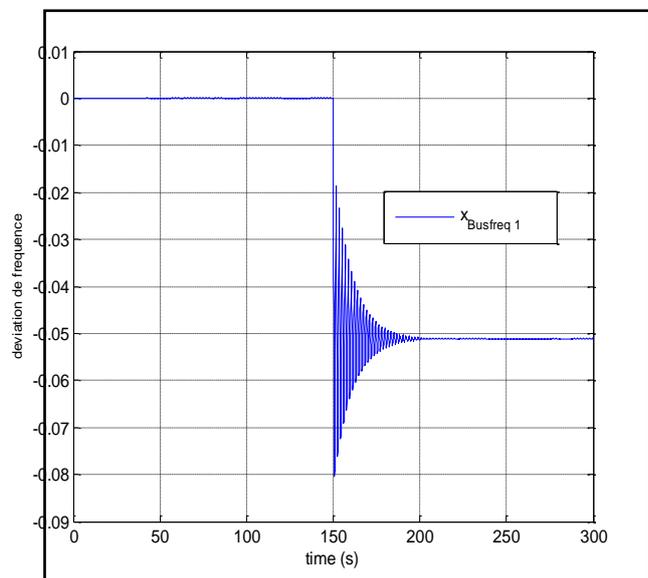
Figure IV.11. Profil de la tension sans et avec l'intermittence de la DG (25%,35% et 50%)



a) Régime transitoire de la déviation de la fréquence  $\Delta f$  dû à une diminution de la production de la DG de 25%

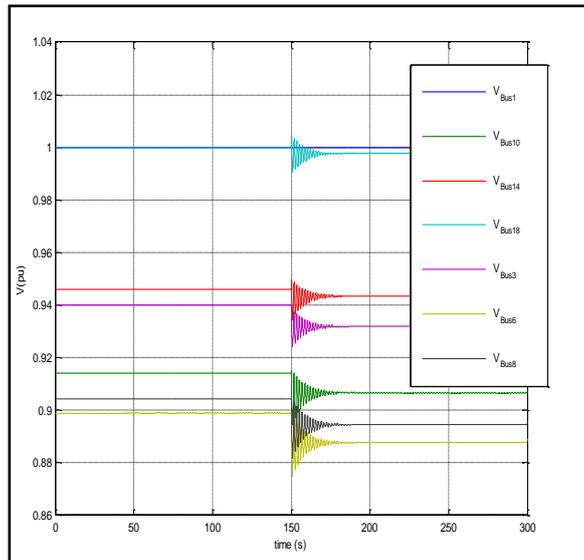


b) Régime transitoire de la déviation de la fréquence  $\Delta f$  dû à une diminution de la production de la DG de 50%

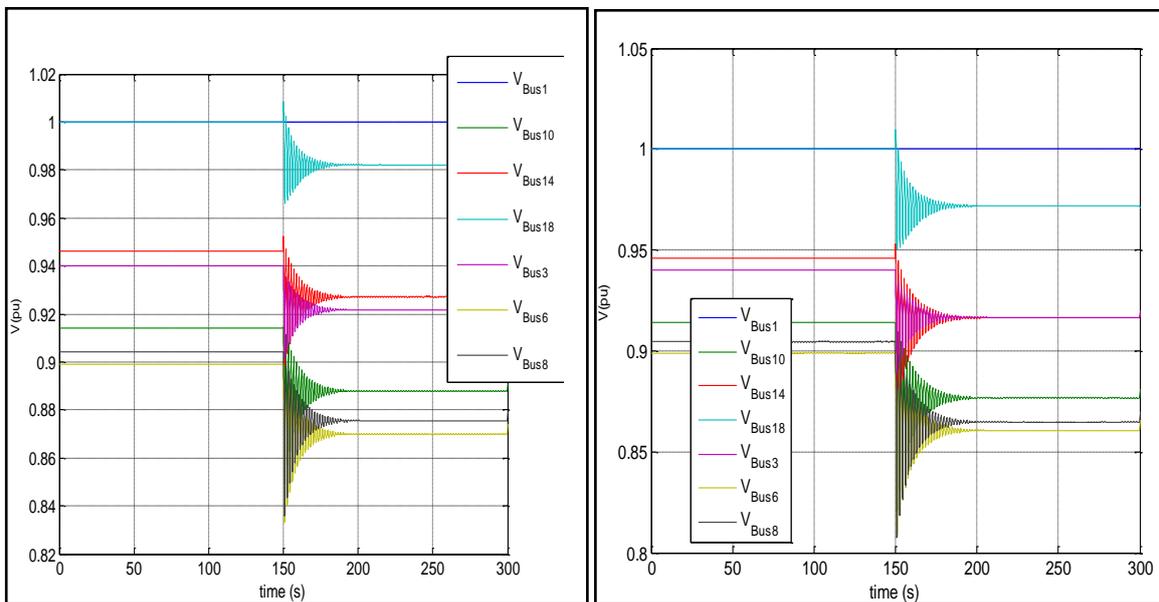


c) Régime transitoire de la déviation de la fréquence  $\Delta f$  dû à une diminution de la production de la DG de 75%

Figure IV.12. Régime transitoire de la déviation de la fréquence  $\Delta f$  dû à l'intermittence de la production de la DG (diminution de 25% ,50%et75%)



a) Régime transitoire des tensions des JDB dû à une diminution de la production de la DG de 25%.



b) Régime transitoire des tensions des JDB dû à une diminution de la production de la DG de 50%.

c) Régime transitoire des tensions des JDB dû à une diminution de la production de la DG de 75%.

Figure IV.13. Régime transitoire des tensions des JDB dû à l'intermittence de la production de la DG (diminution de 25%,50%et 75%).

### IV.5.2.3. Intermittence de la DG caractérisé par une augmentation de la production de 25%,50%et75%.

On a simulé notre réseau en supposant des conditions climatiques imprévues conduisant augmentation de la production de la DG de 25%,50%et 75%.

Le profil de la tension obtenues par PF des JDB est représenté par la figure IV.14, le régime transitoire obtenu par T.D dû à l'augmentation de la production de la DG (25%,50%et75%) de la déviation e fréquence  $\Delta f$  et des tensions des JDB sont représentées respectivement pat la figure IV.15 et IV.16.

L'évolution des tensions niveau du jeu de barre 1 jusqu'au JDB 18.

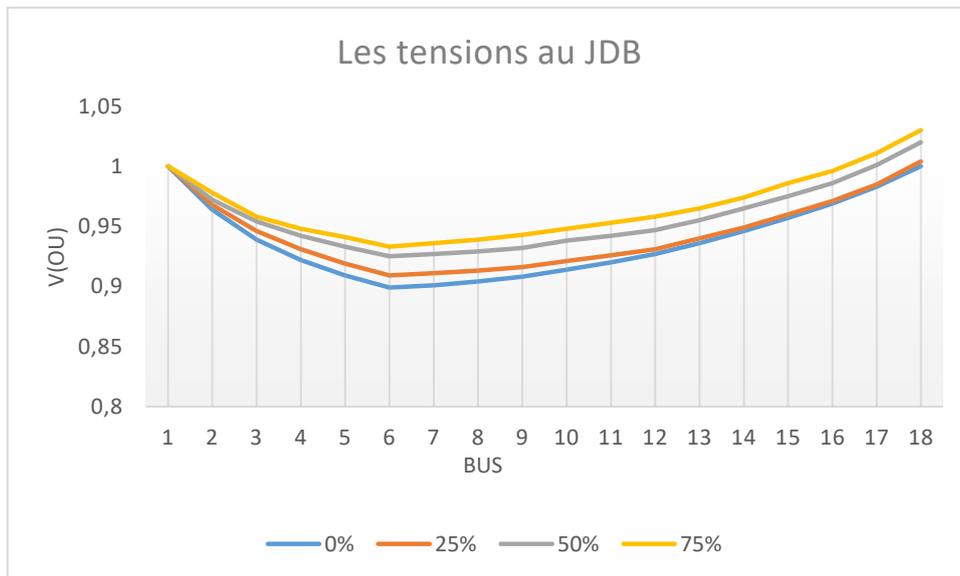
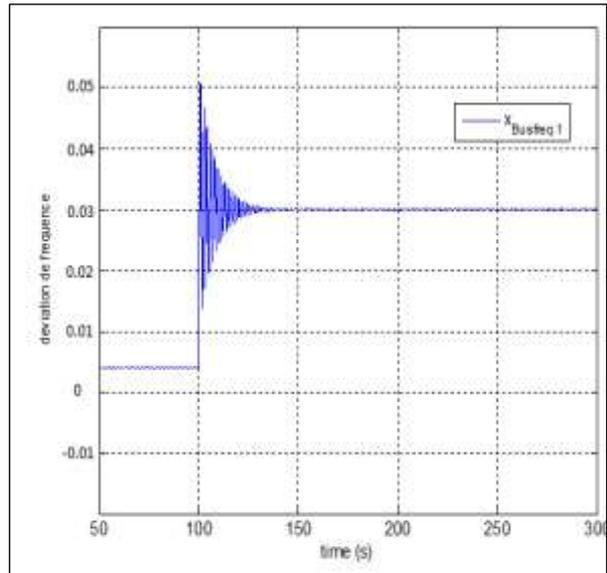
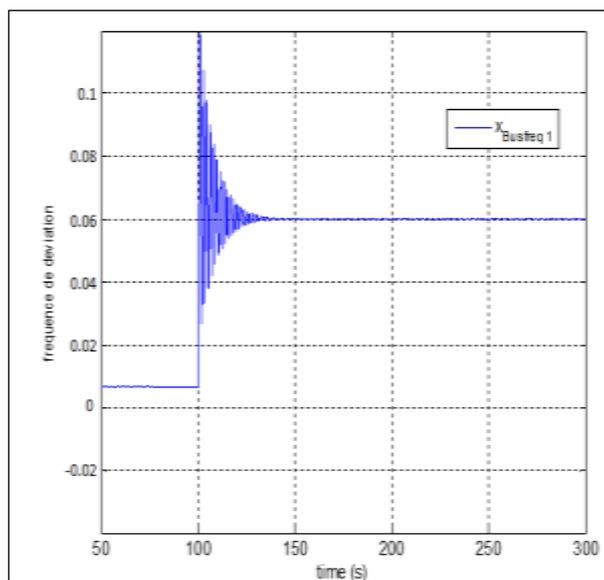
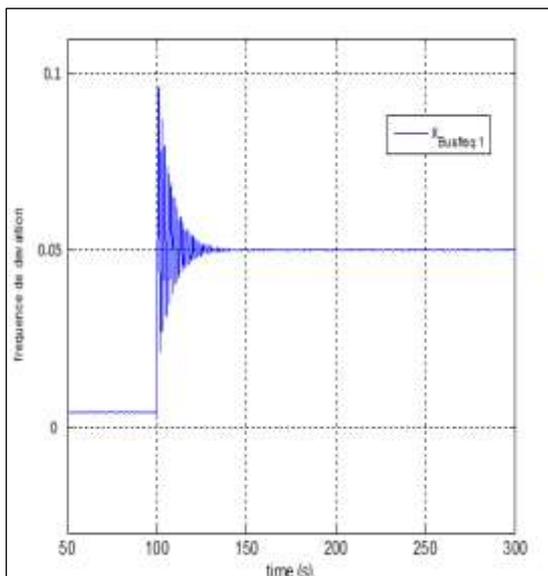


Figure IV.14. Profil de la tension sans et avec l'intermittence de la DG (25%,50% et 75%)



a) Régime transitoire de la déviation de la fréquence  $\Delta f$  dû à une augmentation de la production

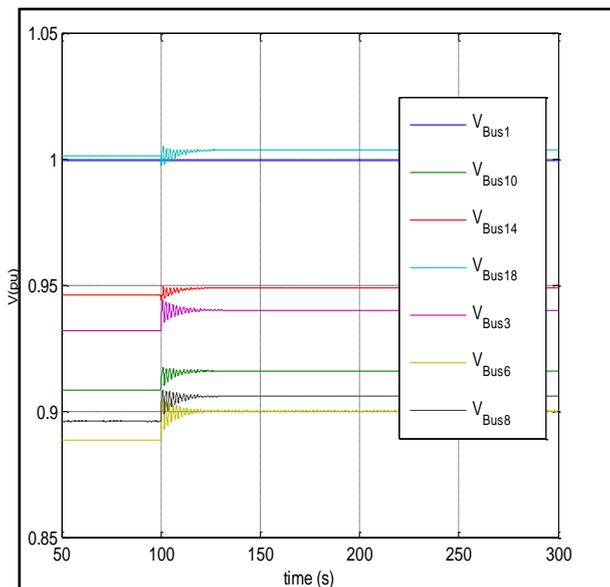


de la DG de 25%

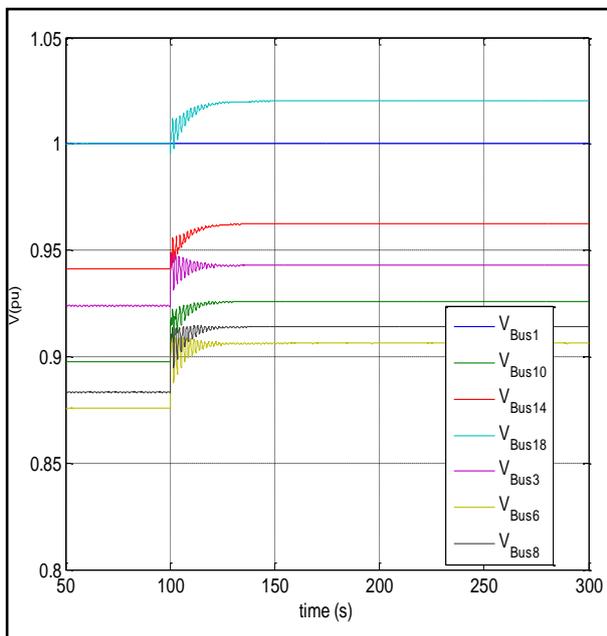
b) Régime transitoire de la déviation de la fréquence  $\Delta f$  dû à une augmentation de la production de la DG de 50%

c) Régime transitoire de la déviation de la fréquence  $\Delta f$  dû à une augmentation de la production de la DG de 75%

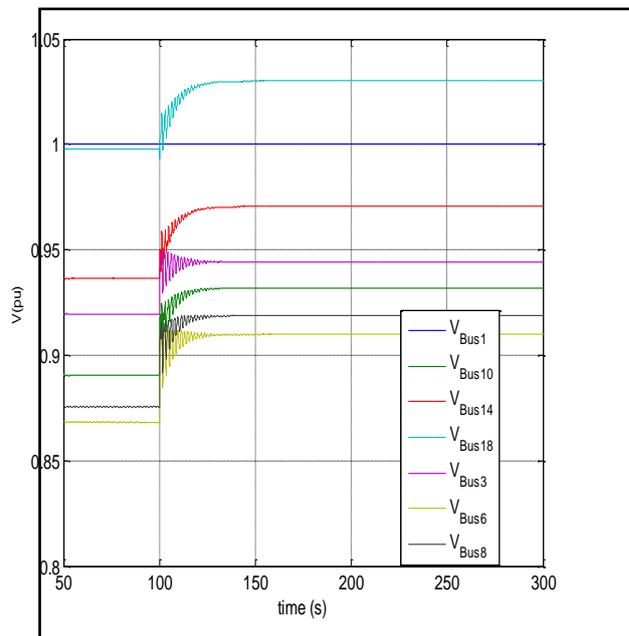
Figure IV.15. Régime transitoire de la déviation de la fréquence  $\Delta f$  dû à l'intermittence de la production de la DG (augmentation de 25% ,50% et 75%)



a) régime transitoire des tensions des JDB dû à une augmentation de la production de la DG 25%



b) régime transitoire des tensions des JDB dû à une augmentation de la production de la DG 50%



c) régime transitoire des tensions des JDB dû à une augmentation de la production de la DG 75%

Figure IV.16. Régime transitoire des tensions des JDB dû à un a l'intermittence de la DG  
(augmentation de 25%,50%et75%)

**IV.5.2.4. comparaison des résultats obtenus et interprétation**

Les tensions de chaque JDB avant et après la diminution et de l'augmentation de la DG (25%,50%et75%) sont relevées dans le tableau IV.1. Les courbes des tensions de JDB correspondantes sont représentées par les figure IV.11 et IV.14.

Tableau IV.1. Tensions de chaque JDB avant et après la diminution et de l'augmentation de la DG (25%,50%et75%).

	Diminution				Augmentaton			
	0%	25%	50%	75%	0%	25%	50%	75%
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0,964	0,96	0,956	0,95	0,964	0,968	0,972	0,978
3	0,939	0,932	0,924	0,92	0,939	0,946	0,954	0,958
4	0,922	0,913	0,902	0,896	0,922	0,931	0,942	0,948
5	0,909	0,899	0,885	0,878	0,909	0,919	0,933	0,941
6	0,899	0,889	0,873	0,866	0,899	0,909	0,925	0,933
7	0,901	0,891	0,875	0,867	0,901	0,911	0,927	0,936
8	0,904	0,895	0,879	0,87	0,904	0,913	0,929	0,939
9	0,908	0,9	0,884	0,874	0,908	0,916	0,932	0,943
10	0,914	0,907	0,89	0,881	0,914	0,921	0,938	0,948
11	0,92	0,914	0,898	0,888	0,92	0,926	0,942	0,953
12	0,927	0,923	0,907	0,897	0,927	0,931	0,947	0,958
13	0,936	0,932	0,917	0,907	0,936	0,94	0,955	0,965
14	0,946	0,943	0,927	0,918	0,946	0,949	0,965	0,974
15	0,957	0,954	0,939	0,929	0,957	0,96	0,975	0,986
16	0,969	0,967	0,952	0,942	0,969	0,971	0,986	0,996
17	0,983	0,981	0,965	0,955	0,983	0,985	1,001	1,011
18	1	0,996	0,98	0,97	1	1,004	1,02	1,03

**A) REGIME NORMAL SANS INTERMITANCE**

En intégrant la DG au JDB 18 du réseau radial on a constaté une diminution progressive de la tension du JDB1 (1pu) au JDB6 0.899pu), puis elle augmente jusqu'à JDB18 (1pu) comme le montre les figures IV.10 et IV.11.

## **b) Diminution de la production de la DG**

Après avoir simulé sur PSAT une diminution de la production de la DG qui peut être due aux variations des imprévues des conditions climatiques, on remarque ce qui suit :

### **B.1) Tension de JDB**

Après avoir simulé sur le réseau une perturbation climatique caractérisée par une diminution de la production de la DG de 25%, 50% et 75%, on a remarqué que les tensions de tous les JDB subissent une perturbation avec des amplitudes importantes au départ qui diminuent progressivement et se stabilisent après une centaine de secondes et conduisent à des chutes de tensions au niveau de tous les JDB. Cette chute de tension avec des valeurs maximales de 2%, 4% et 7% est proportionnelle à l'ampleur de la perturbation c'est-à-dire à la diminution de la production respectivement (25%, 50% et 75%).

### **B.2) Déviation de la fréquence**

La stabilité de la fréquence dépend d'abord de l'ampleur de la perturbation (c'est la variation de la production), elle dépend aussi des paramètres du réseau (les impédances des lignes, des transformateurs et des générateurs) et aussi des moments d'inertie des générateurs et des machines liées au réseau. Ces dernières données par le réseau radial IEEE 33 JDB ne font pas l'objet d'étude dans notre travail. Seule la perturbation due à l'intermittence de la production de la DG a été étudiée.

On remarque que la fréquence subit une perturbation avec des amplitudes importantes au départ qui s'atténuent avec le temps et se stabilisent après une centaine de secondes. La fréquence subit des variations de l'ordre de 0.025, 0.043 et 0.052 Hz pour des diminutions de la production de la DG de 25%, 50% et 75% respectivement (figure IV.12 a, b et c).

## **C) augmentation de la production de la DG**

Après avoir simulé sur PSAT une augmentation de la production de la DG qui peut être due aux variations des imprévues des conditions climatiques, on remarque ce qui suit :

### **C.1) Tension de JDB**

Après avoir simulé sur le réseau une perturbation climatique caractérisée par une augmentation de la production de la DG de 25%, 50% et 75%, on a remarqué que les tensions de tous les JDB subissent une perturbation avec des amplitudes importantes au départ qui augmentent progressivement et se stabilisent après une centaine de secondes et conduisent à des fluctuations des tensions au niveau de tous les JDB. Cette augmentation de tension avec des

valeurs maximal de 2%, 4% et 7% est proportionnelle à l'ampleur de la perturbation c'est à dire à la augmentation de la production respectivement (25%,50% et75%).

### C.2) déviation de la fréquence

La stabilité de la fréquence dépend d'abord de l'ampleur de la perturbation (c'est la variation de la production), elle dépend aussi des paramètres du réseau (les impédances des lignes, des transformateur et des générateurs) et aussi des moments d'inertie des générateurs et des machines liées au réseau. Ces derniers données par le réseau radial IEEE 33 JDB et ne font pas d'objet d'étude dans notre travaille. Seule la perturbation due à l'intermittence de la production de la DG a été étudiée.

On remarque que la fréquence subit une perturbation avec des amplitudes importantes âpre une centaine de seconde qui s'atténuent avec le temps et se stabilise vers la fin de la simulation .la fréquence attendre des variations de l'ordre de 0.03,0.045 et 0.06 HZ pour des augmentations de la production de la DG de 25% 50% et 75% respectivement (figure IV.15.a, b et c).

### IV.5.3. Amélioration de stabilité de la fréquence du réseau de 33JDB IEE avec diminution et augmentation de puissance

#### IV.5.3.1. insertion de la DG au JDB 9 dans les conditions climatiques normales sans intermittence.

Afin de trouver le point optimal qui nous donne une chute de tension minimal et une meilleure stabilité de la tension, nous insérons la DG dans les JDB 6 ,7 jusqu'à 17 en déterminant à chaque fois la chute de tension maximal. Une fois les tests effectués les résultats nous donnent le JDB 9 comme étant le point optimal ou on doit insérer la DG qui nous donne une chute de tension minimal et une meilleure stabilité.

L'évolution des tensions niveau de jeu de barre de bus 1 jusqu'à bus 18 :

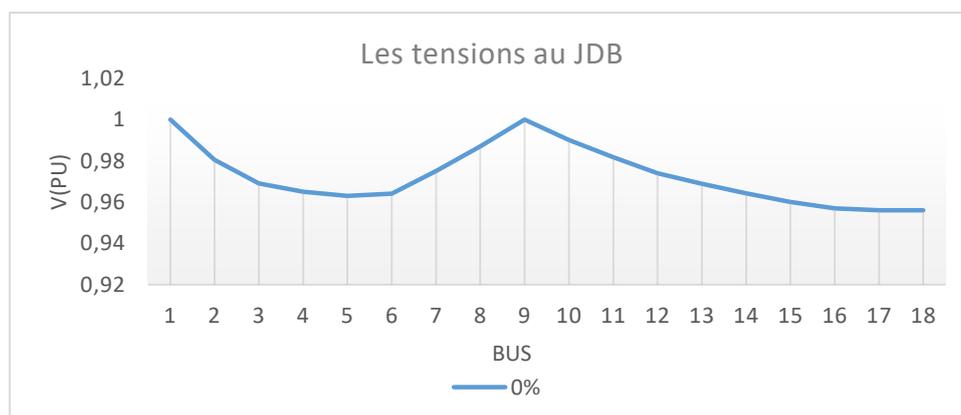


Figure IV.17. Profil des tensions des JDB dans les conditions climatiques normales sans intermittence de la DG

**IV.5.3.2. Intermittence de la DG caractérisée par une diminution de la production (25%, 50% et 75%)**

On à simuler notre réseau en supposant des conditions climatiques imprévues conduisant à une diminution de la production de la DG de 25% 50% 75%.

Le profil de la tension obtenus par PF des JDB est représenter par la figure IV.18, le régime transitoire obtenu par T.D du a la diminution de la production de la DG (25%,50% et 75%) de la déviation de fréquence  $\Delta f$  et des tensions des JDB sont représentées respectivement par les figures IV.19 et IV.20.

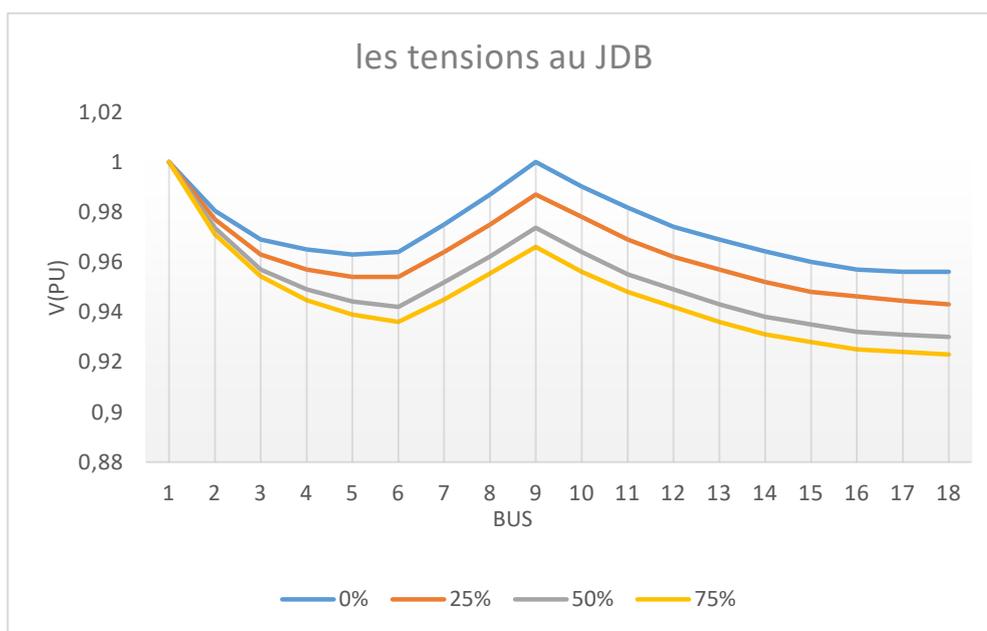
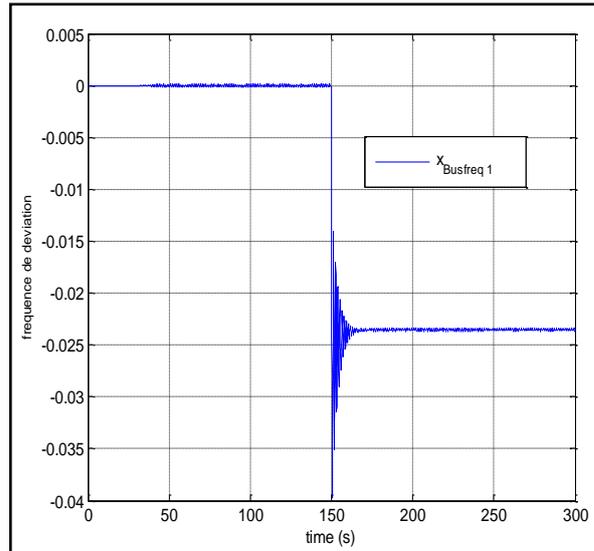
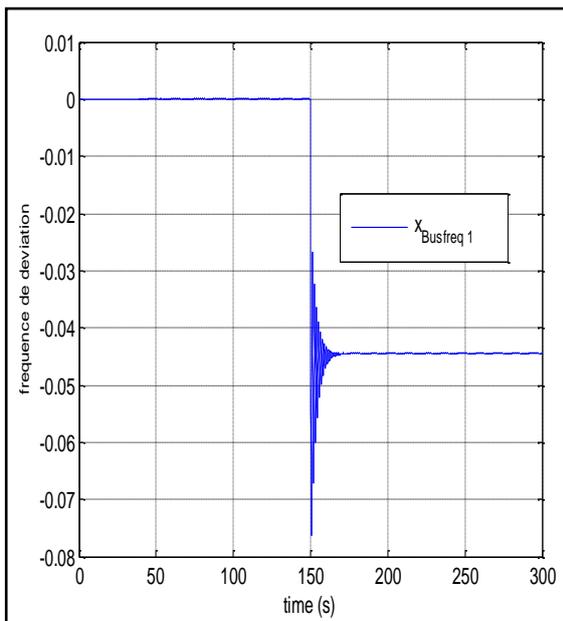


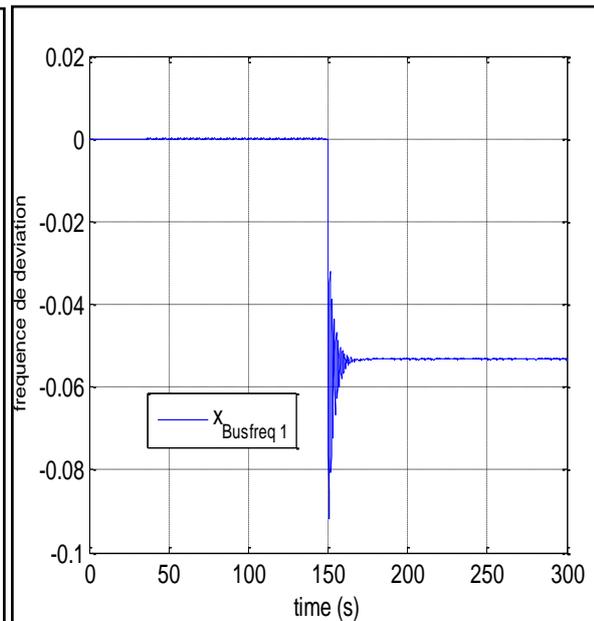
Figure IV.18. Profil de la tension sans et avec l'intermittence de la DG (25%,50% et 75%)



a) Régime transitoire de la déviation de la fréquence  $\Delta f$  dû à une diminution de la production de la DG de 25%

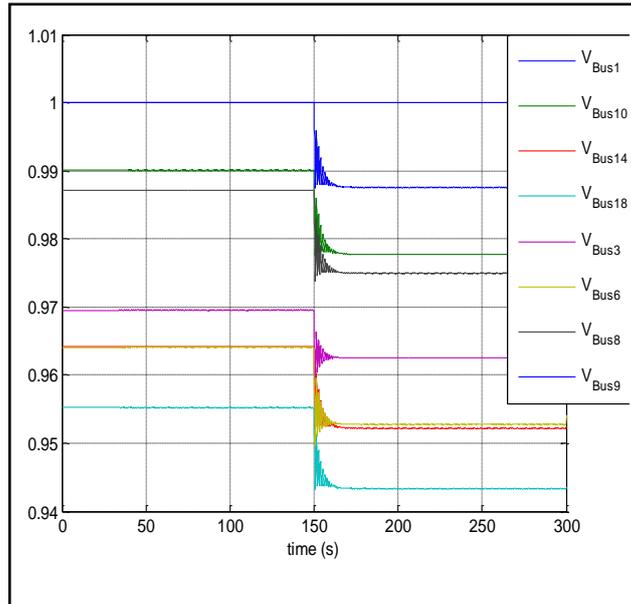


b) Régime transitoire de la déviation de la fréquence  $\Delta f$  dû à une diminution de la production de la DG de 50%

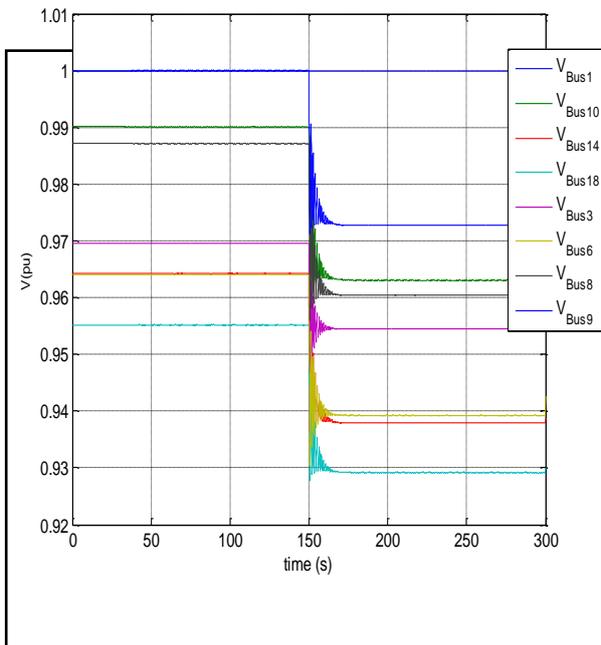


c) Régime transitoire de la déviation de la fréquence  $\Delta f$  dû à une diminution de la production de la DG de 75%

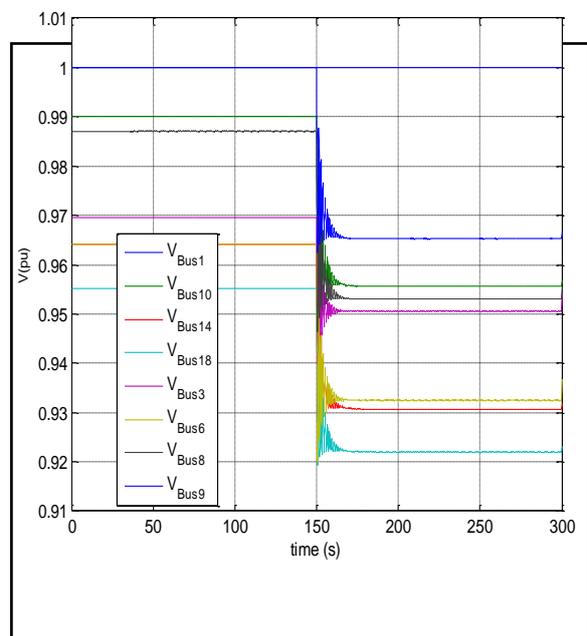
Figure IV.19. Régime transitoire de la déviation de la fréquence  $\Delta f$  dû à l'intermittence de la production de la DG (diminution de 25% ,50%et75%)



a) Régime transitoire des tensions des JDB dû à une diminution de la production de la DG de 25%



b) Régime transitoire des tensions des JDB dû à une diminution de la production de la DG de 50%.



c) Régime transitoire des tensions des JDB dû à une diminution de la production de la DG de 75%.

Figure IV.20. Régime transitoire des tensions des JDB dû à l'intermittence de la production de la DG (diminution de 25%, 50% et 75%).

### IV.5.3.3. Intermittence de la DG caractérisée par une augmentation de la production de 25 %,50% et 75%

On à simuler notre réseau en supposant des conditions climatiques imprévues conduisant à une augmentation de la production de la DG de 25% 50% 75%.

Le profil de la tension obtenus par pf des JDB est représenter par la figure IV.21, le régime transitoire obtenu par T.D du à l'augmentation de la production de la DG (25%,50% et 75%) de la déviation de fréquence  $\Delta f$  et des tensions des JDB sont représentées respectivement par les figures IV.22 et IV.23.

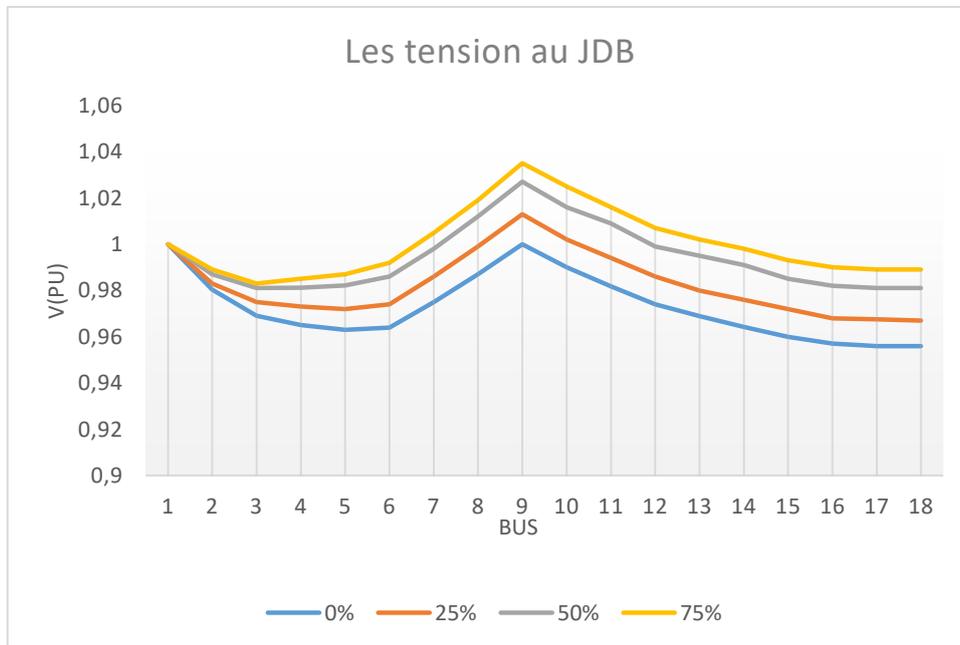
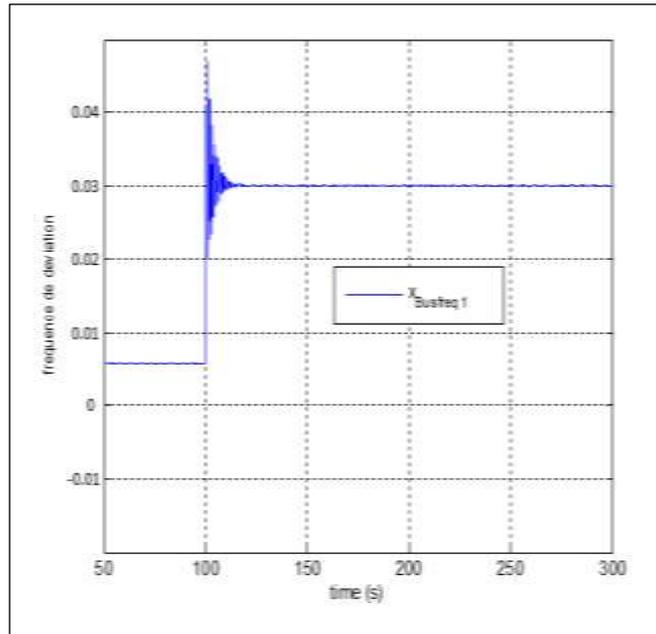
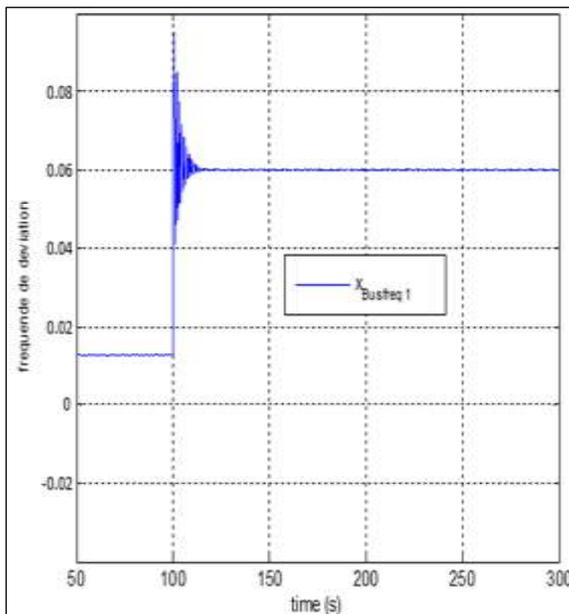


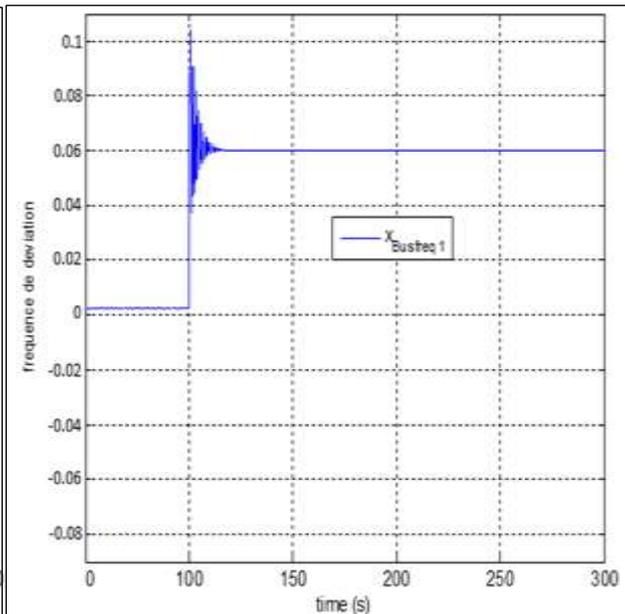
Figure IV.21. Profil de la tension sans et avec l'intermittence de la DG (25%,50% et 75%)



a) Régime transitoire de la déviation de la fréquence  $\Delta f$  dû à une augmentation de la production de la DG de 25%

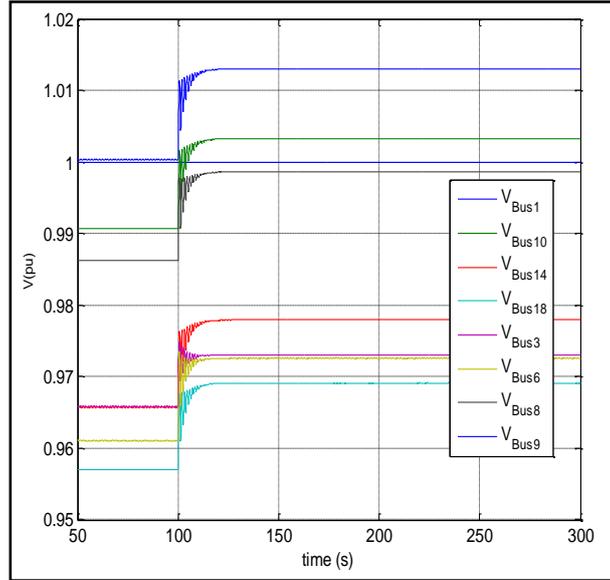


b) Régime transitoire de la déviation de la fréquence  $\Delta f$  dû à une augmentation de la production de la DG de 50%

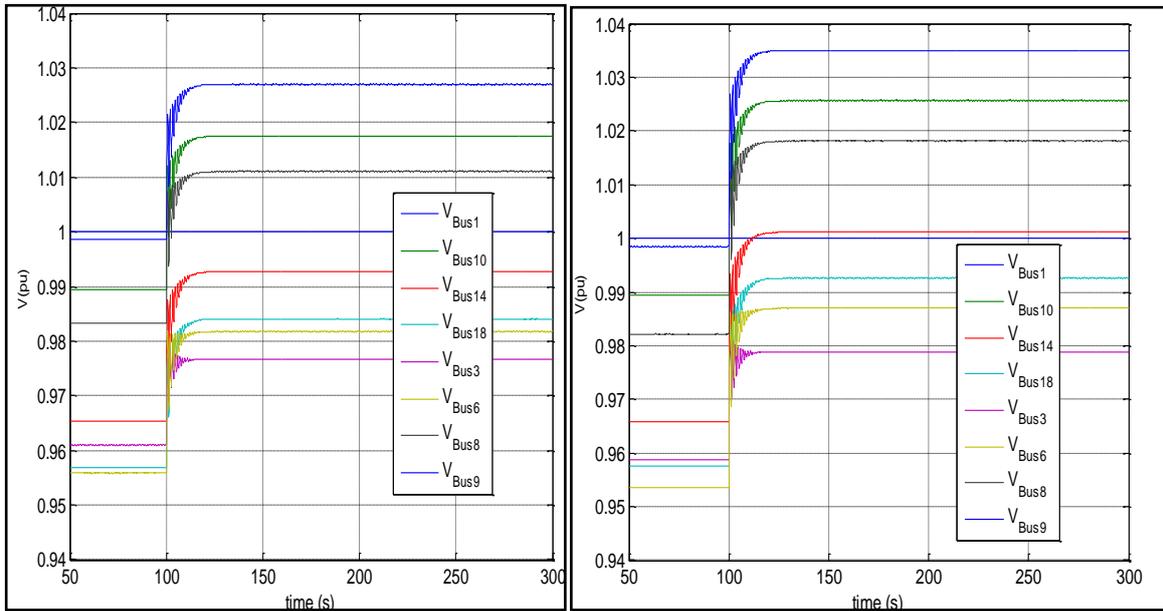


c) Régime transitoire de la déviation de la fréquence  $\Delta f$  dû à une augmentation de la production de la DG de 75%

Figure IV.22. Régime transitoire de la déviation de la fréquence  $\Delta f$  dû à l'intermittence de la production de la DG (augmentation de 25% ,50% et 75%)



a) régime transitoire des tensions des JDB dû à une augmentation de la production de la DG 25%



b) régime transitoire des tensions des JDB dû à une augmentation de la production de la DG 50% .

c) régime transitoire des tensions des JDB dû à une augmentation de la production de la DG 75%.

Figure IV.23. Régime transitoire des tensions des JDB dû à un a l'intermittence de la DG (augmentation de 25%,50%et75%)

**IV.5.3.4. comparaison des résultats obtenus et interprétation**

Les tensions de chaque JDB avant et après la diminution et de l'augmentation de la DG (25%,50%et75%) sont relevées dans le tableau IV.2. Les courbes des tensions de JDB correspondantes sont représentées par les figure IV.18 et IV.21.

Tableau IV.2. Tensions de chaque JDB avant et après la diminution et de l'augmentation de la DG (25%,50%et75%).

Bus	Diminution				Augmentation			
	0%	25%	50%	75%	0%	25%	50%	75%
Bus1	1	1	1	1	1	1	1	1
Bus2	0,9804	0,977	0,9736	0,971	0,9804	0,983	0,987	0,989
Bus3	0,969	0,963	0,957	0,9543	0,969	0,975	0,9811	0,983
Bus4	0,965	0,957	0,949	0,9447	0,965	0,973	0,9812	0,985
Bus5	0,963	0,954	0,9442	0,939	0,963	0,972	0,9821	0,987
Bus6	0,964	0,954	0,942	0,936	0,964	0,974	0,986	0,992
Bus7	0,975	0,964	0,9518	0,945	0,975	0,986	0,998	1,005
Bus8	0,987	0,975	0,9622	0,9554	0,987	0,999	1,012	1,019
Bus9	1	0,987	0,9737	0,966	1	1,013	1,027	1,035
Bus10	0,9901	0,978	0,964	0,956	0,9901	1,002	1,016	1,025
Bus11	0,9817	0,969	0,955	0,948	0,9817	0,994	1,009	1,016
Bus12	0,974	0,962	0,949	0,942	0,974	0,986	0,999	1,007
Bus13	0,9689	0,957	0,943	0,936	0,9689	0,98	0,995	1,002
Bus14	0,9642	0,952	0,938	0,931	0,9642	0,976	0,991	0,998
Bus15	0,96	0,948	0,935	0,928	0,96	0,972	0,985	0,993
Bus16	0,957	0,9462	0,932	0,925	0,957	0,9679	0,982	0,99
Bus17	0,956	0,9445	0,9309	0,924	0,956	0,9676	0,981	0,989
Bus18	0,956	0,943	0,93	0,923	0,956	0,967	0,981	0,989

A)  
Ré  
gi  
me  
nor  
ma  
l  
san  
s  
int  
er  
mit  
ten  
ce

E

n  
inté

grant la DG au JDB 8 du réseau radial on a constaté une diminution progressive puis une augmentation de la tension du JDB1 (1pu) au JDB9 (1pu), puis elle diminue et se stabilise jusqu'à JDB18 (0.956pu) comme le montre les figures IV.17 et IV.18.

**B) Diminution de la production de la DG**

Après avoir simulé sur PSAT une diminution de la production du dg qui peut être due aux variations des imprévues des conditions climatiques, on remarque ce qui suit :

**B.1) Tension de JDB**

Après avoir simuler sur le réseau une perturbation climatique caractérisée par une diminution de la production de la DG de 25% 50% 75%, on a remarqué que les tensions de tous les JDB subissent une perturbation avec des amplitudes importantes au départ qui diminue progressivement et stabilise après une centaine de seconde et conduit à des chutes de tensions au

niveau de tous les JDB. Cette chute de tension avec des valeurs maximal de 2%, 4% et 7% est proportionnelle à l'ampleur de la perturbation c'est à dire à la diminution de la production respectivement (25%, 50% et 75%).

### **B.2) déviation de la fréquence**

La stabilité de la fréquence dépend d'abord de l'ampleur de la perturbation (c'est la variation de la production), elle dépend aussi des paramètres du réseau (les impédances des lignes, des transformateur et des générateurs) et aussi des moments d'inertie des générateurs et des machines liées au réseau. Ces derniers données par le réseau radial IEEE 33 JDB et ne font pas d'objet d'étude dans notre travail. Seule la perturbation due à l'intermittence de la production de la DG a été étudiée.

On remarque que la fréquence subit une perturbation avec des amplitudes importantes au départ qui s'atténuent avec le temps et se stabilise après une centaine de seconde. la fréquence attendre des variations de l'ordre de 0.023, 0.043 et 0.052 HZ pour des diminution de la production de la DG de 25% 50% et 75% respectivement (figure IV.19 a, b et c).

### **C) Augmentation de la production de la DG**

Après avoir simulé sur PSAT une augmentation de la production du DG qui peut être due aux variations des imprévues des conditions climatiques, on remarque ce qui suit :

#### **C.1) Tension de JDB**

Après avoir simuler sur le réseau une perturbation climatique caractérisée par une augmentation de la production de la DG de 25% 50% 75%, on a remarqué que les tensions de tous les JDB subissent une perturbation avec des amplitudes importantes au départ qui augmente progressivement et stabilise après une centaine de seconde et conduit à des fluctuations des tensions au niveau de tous les JDB. Cette augmentation de tension avec des valeurs maximal de 1.5%, 3.2% et 5.5% est proportionnelle à l'ampleur de la perturbation c'est à dire à la augmentation de la production respectivement (25%, 50% et 75%).

#### **C.2) Déviation de la fréquence**

La stabilité de la fréquence dépend d'abord de l'ampleur de la perturbation (c'est la variation de la production), elle dépend aussi des paramètres du réseau (les impédances des lignes, des transformateur et des générateurs) et aussi des moments d'inertie des générateurs et des machines liées au réseau. Ces derniers données par le réseau radial IEEE 33 JDB et ne font

pas d'objet d'étude dans notre travail. Seule la perturbation due à l'intermittence de la production de la DG a été étudiée.

On remarque que la fréquence subit une perturbation avec des amplitudes importantes après une centaine de secondes qui s'atténuent avec le temps et se stabilise vers la fin de la simulation. La fréquence présente des variations de l'ordre de 0.023, 0.042 et 0.053 Hz pour des augmentations de la production de la DG de 25%, 50% et 75% respectivement (figure IV.22 a, b et c).

## **IV.6. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons traité le problème de la stabilité de la tension et de la fréquence des réseaux électriques. On a étudié l'influence de l'impact de l'intégration d'une production décentralisée dans un réseau de distribution nous avons ensuite la stabilité de la tension et en choisissant le JDB optimal pour l'insertion de la DG de la fréquence (améliorer les performances du réseau électrique). L'application a été effectuée sur des réseaux IEEE 33.

Après avoir fait la simulation avec PSAT sur le réseau choisi sans DG, on a relevé le profil de la tension et les courbes de charge, le JDB 18 et l'accès ayant le profil de la tension le plus faible.

Après avoir inséré une DG au JDB 18, on a simulé une perturbation due au changement des conditions climatiques imprévues caractérisée par une diminution de la production de la DG de 25%, 50% et 75%. Les résultats obtenus montrent une perturbation du réseau caractérisée par une augmentation des chutes de tension et de la déviation de la fréquence en fonction de l'ampleur de la diminution.

Ensuite on a simulé l'augmentation de la production de la DG de 25%, 50% et 75%, les résultats montrent aussi la perturbation du réseau (chute de tension et déviation de la fréquence) sont proportionnelles à l'ampleur de l'augmentation.

Nous terminons ce chapitre par un choix optimal de JDB pour l'intégration de la DG. Le JDB 9 s'avère être le meilleur choix dans notre cas. Les résultats obtenus par PSAT 5 (profil de la tension, et régime transitoire de la tension et de la déviation de la fréquence) montrent une nette amélioration des profils de la tension et de la fréquence.

### Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail est l'étude du profil de la tension et de la stabilité de la fréquence d'un réseau radial de distribution face à l'intermittence de la production décentralisée.

Au fil du temps, la demande de l'énergie électrique augmente, ce qui nécessite une augmentation de production pour répondre à la forte demande des consommateurs. Les énergies fossiles sont de plus en plus rejetées vu leur impact l'environnement. L'insertion des productions décentralisées dans les réseaux de distribution nécessite des recherches et des études sur l'impact de ces derniers sur le réseau. À cause de cette intégration d'énergies nouvelles basées sur des ressources renouvelables, les réseaux électriques subissent des dérèglements de plusieurs paramètres et surtout de la tension et de la fréquence. Le schéma d'exploitation classique des réseaux de distribution a été remis en cause. En effet l'arrivée de ces énergies n'a fait qu'augmenter le risque du déséquilibre à cause de leurs caractères imprévisibles dus aux phénomènes météorologiques.

Les réseaux électriques, déjà existants, ne sont pas conçus pour accueillir la production d'énergies renouvelables. Forcément, cette énergie produite affecte directement le réseau en place, et conduit à des changements dans le sens de transit de courants et de puissance et devient bidirectionnel, ce qui conduit à de nouvelles conditions et normes de gestion des électriques.

L'intégration des productions décentralisées influence la gestion de la production, ainsi la planification d'un réseau électrique. Des mesures et des normes ont été mises en place pour gérer le raccordement au réseau de cette production afin d'assurer l'équilibre et la stabilité du système électrique et de garantir un fonctionnement nominal et fiable.

Le développement des nouvelles technologies, qui comprennent les systèmes de stockage d'énergie, ainsi que l'évolution des systèmes de contrôle, faciliteront l'intégration massive des énergies renouvelables au réseau de distribution.

A travers les résultats de simulation par l'outil PSAT du réseau radial sans et avec production distribuée (DG) dans un système de IEE 33 JDB, on a montré l'importance de la contribution des DG par l'apport d'énergie au réglage du réseau.

Nous avons traité le problème de la stabilité de la tension et des fréquences des réseaux électriques et discuté l'influence de l'impact de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau de distribution sur l'amélioration de la stabilité de la tension et de la fréquence

(améliorer les performances du réseau électrique). L'application a été effectuée sur un réseau IEEE 33 JDB.

Les résultats de simulation du réseau IEEE 33 JDB avec intégration d'une DG au JDB 18 soumise à des perturbations climatiques conduisant à une diminution ou une augmentation de sa production, ont montré l'impact et l'importance de l'intermittence des DG et leur influence sur la stabilité de la tension et de la fréquence du réseau électrique.

Il a été démontré qu'une diminution ou augmentation de la production de la DG conduit à des augmentations des chutes de tension ou surtensions respectivement et des déviations de la fréquence. Des variations importantes de la production de la DG peuvent conduire, dans certains cas à une instabilité du réseau et peuvent provoquer un effondrement de la tension ou de la fréquence si des dispositions et des précautions ne sont pas prises en amont.

L'étude réalisée dans ce travail a montré qu'il est nécessaire de faire un choix optimal du ou des JDB ou les DG doivent être insérées afin de procurer au réseau une meilleure stabilité en tension et en fréquence et un meilleur transit de puissance avec moins de pertes. Dans le cas de l'exemple choisi, les résultats ont montré que le JDB 9 est le choix optimal pour l'insertion de la DG qui donnera au réseau une meilleure stabilité en tension et en fréquence.

On propose comme perspective d'effectuer une étude sur d'autres moyens de régler les problèmes de la stabilité de la fréquence et de la tension dû à la volatilité de DG.

# Bibliographie

- [1] THEODRE Wildy et GIL BERT SYBILLE, « Electrotechnique » quatrième édition « DC-Boeck », 2005.
- [2] T. BENBOUDJEMA, O. AGRI « Etude des capacités et perspectives de production d'énergie électrique en Algérie », Mémoire de Fin D'études, Option : Réseaux Electriques, 2014/2015.
- [3] Dr.TEBANI .H «Cours production de l'énergie électrique ». 2<sup>ème</sup> année licence électrotechnique, université hassiba benbouali, chlef ,2019/2020.
- [4] techno-science.net / réseau électrique.
- [5] F. Hamoudi, « Architectures des réseaux électriques, Power system », cours UEF, 10 novembre 2015.
- [6] E.GLADKIKH, « Optimisation de l'architecture des réseaux de distribution de l'énergie électrique », thèse de doctorat, université Grenoble Alpes, 2006.
- [7] T .NABECHE, F. TEZKRATT, « Restructuration du réseau électrique MT de la région de Fréha pour alimentation du pôle d'excellence de Tamda », Mémoire de Fin d'Etude, Filière : Génie Electrique, 2014.
- [8] J.C. Sabonnadaière, N. hadjsaïd, « Lignes et réseaux électriques 1(lignes d'énergie électrique) », Livre, paris, Lavoisier 2007.
- [9] Enerdigit / La réserve primaire, secondaire et tertiaire pour l'équilibre du réseau.
- [10] N.AOUZELLAG, « Cours Réseaux Electriques », 3ème année Licence Electrotechnique, université A. Mira, Bejaia, 2017/2018.
- [11] A.bouzidi « cours Réseaux électriques industriels », master 2 réseaux électrique, université A. Mira, Bejaia, 2020/2021.
- [12] Srd-energies / document protection découplage production.
- [13] A.TIGUERCHA « analyse des marches d'électricité dérégulés avec les méthodes intelligentes », thèse doctorat, l'Université houari Boumediene, 2019/2020.
- [14] « cours production centraliser et décentraliser » master 1 réseau électrique, université de Jijel.
- [15] Dr.M. BENMEDDOUR « cours de production de l'énergie électrique » master réseau électrique université Biskra .2018/2019
- [16] N.AOUZELLAG, « Cours production décentralisée », master1 réseaux électrique, université A. Mira, Bejaia, 2019/2020.
- [17] «\_Arrêté du 23 avril 2008 relatif aux prescriptions techniques de conception et de fonctionnement pour le raccordement à un réseau public de distribution d'électricité en basse tension ou en moyenne tension d'une installation de production d'énergie électrique », Journal O\_ciel de la République Française, Avril 2008.
- [18] K. Foued «Etude des variations rapides de tension pour le raccordement d'une production décentralisée dans un réseau MT» mémoire de magistère, Constantine 2016.
- [19] Hydro power, Alternative Energy News, 2010, « réf de janvier 2013 », disponible Sur: [http://www.alternative-ener gy-news.info/technology/hydro/](http://www.alternative-ener-gy-news.info/technology/hydro/)
- [20] Mehdi Merad-Boudia, <<Injection de l'électricité produite par les énergies Renouvelables dans le réseau électrique>>, Université de Tlemcen Abou Berk Belkaid, 2010.
- [21] Direction Générale de l'Energie et du Climat, L'industrie des énergies dé carbonées en 2010. [http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Biomasse\\_energie.pdf](http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Biomasse_energie.pdf)
- [22] N. BAKHTA. « Cours production décentralisée », université des sciences et de la technologie d'oran mohamed boudiaf 2016/2017.
- [23] <http://www.energies-renouvelables.org/default.asp>
- [24] Dr.Dhaker.Abbes « cours d'intégration des énergies renouvelables aux réseau électrique introduction au smartgrids », école des hautes études d'ingénieur Lille, France .2015/2016
- [25] R. Singh and S. Goswami, «Optimum allocation of distributed generations based on nodal pricing for profit, loss reduction, and voltage improvement including voltage rise issue» International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 32, no. 6, pp. 637 – 644, 2010.

- [26] N. Khalesi, N. Rezaei, and M.-R. Haghifam, «Dg allocation with application of dynamic programming for loss reduction and reliability improvement, » International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 33, no. 2, pp. 288 – 295, 2011
- [27] cours Chapitre 02 Impacts de l'intégration des ressources renouvelables sur le réseau de distribution.<https://www.exoco-lmd.com/>
- [28] S.NACIRI, « Impact de l'intégration des énergies renouvelables au réseau de distribution HTA », mémoire de fin d'étude, université Sidi Mohamed Ben Abdellah, 2017.
- [29] N.Hocini, E.Tazamouchet, « Sur la maîtrise de l'insertion des ressources renouvelables aux réseaux électriques », Mémoire de fin d'étude, Université de Bejaïa, 2015/2016.
- [30] T.AcKermann, « Wind power in power systems »,Wiley,2005.
- [31] thèse « impact de l'éolien sur le réseau de transport et la qualité de l'énergie », Ecole centrale de Lille, France.
- [32] B.Thibaut « Modalisation de la consommation électrique à partir de grandes masses de données pour la simulation des alternatives énergétiques du futur », Thèse doctorat, université de recherche Paris sciences et lettre .2017/2018.
- [33] [http://www.electrosup.com/stabilite\\_des\\_reseaux\\_electriques.php](http://www.electrosup.com/stabilite_des_reseaux_electriques.php) ,constant matrix, Measurement Volume 114, January 2018, Pages 308-321
- [34] R.KHALID «SUIVI DE LA FRÉQUENCE DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE À L'AIDE D'UNE CARTE ARDUINO », master 2 électrotechnique, université DES FRERES MENTOURI CONSTANTINE,2015/2016.
- [35] A. Bouzidi « cour de conduite des réseaux électrique », chapitre IV 'Réglage du réseau" ,2020
- [36] X. Dou et al., An improved CPF for static stability analysis of distribution systems with high DG penetration,«International Journal of Electrical Power & Energy Systems», vol. 86, pp. 177- 188, 2017.
- [37] C.J. Ramos, A.P. Martins, A.S. Carvalho, Power system frequency estimation using a least mean squares differentiator, Int. J. Electr. Power Energy Syst. 87 (2017) 166–175.
- [38] Guillaume RAMI « contrôle de tension auto adaptatif pour des productions décentralisées d'énergies connectées au réseau électrique de distribution» Thèse de doctorat INPG, 2006.
- [39] RTE, « Mémento de la sûreté du système électrique », 2004
- [40] B.Crappe, « Commande et régulation des réseaux électriques », Hermes sciences, 2003.
- [41] Federico Milano, « Power System Analysis Toolbox Documentation for PSAT» version 2.1.8, Janvier 6, 2013.
- [42] B. BOUSSAHOUA, « Evaluation de la sécurité transitoire des réseaux électriques par les algorithmes intelligents » Thèse de doctorat en Electrotechnique, Faculté d'Electronique et informatique, USTHB 2012.
- [43] M. MENZER « Analyse des performances d'un réseau électrique en présence des sources à énergie renouvelable » Mémoire de Fin d'Etudes, Réseau électrique, Université Mohamed Khider Biskra 2017/2018.

