

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة الدكتور الطاهر مولاي سيدة –

Université Saida Dr Tahar Moulay –
Faculté des Sciences et de Technologie
Département d'Electrotechnique et d'Automatique



MEMOIRE

Mémoire de fin d'études présenté pour l'obtention du Diplôme de MASTER

En : Électrotechnique

Spécialité : Réseaux Électriques

**Par : ABDELAZIZ Fatima Zohra Ahlem
et
BELKHADEM Marwa Mokhtaria**

Sujet

**Amélioration de l'efficacité des Réseaux Electriques par
l'optimisation de
l'intégration des énergies renouvelables et les systèmes FACTS**

Soutenu publiquement le 25/06/2025 devant le jury composé de :

Dr.Arzag.kaddour	Univ. Saida	Président
Dr.Bekri Loubaba Oum el Fadhel	Univ. Saida	Rapporteur
Dr.Amara Mohamed	Univ. Saida	Examineur

Année universitaire 2024/2025

Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au département d'électrotechnique de l'université DR- TAHER MOULAY – SAIDA.

Nos remerciements vont tout d'abord à ALLAH tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donnée durant toutes ces longues années.

Nos sincères remerciements aux messieurs les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en participant au jugement de ce travail.

Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadrant Dr BEKRI O.L pour avoir d'abord proposé ce thème, pour le suivi continu tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils et remarques.

Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidé à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants du département d'électrotechnique qui ont contribué à notre formation.

Enfin nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues pour le soutien moral et matériel...

Résumé

L'un des défis des énergies renouvelables «En.R» telles que le solaire ou l'éolien réside dans le risque d'interruption de leur production dont la stabilité est menacée par leur caractère aléatoire.

Les systèmes FACTS «Flexible AC Transmission Systems» apportent une solution à ce problème de capacité et de stabilité du réseau, lequel intègre une part croissante d'énergie renouvelable.

Cependant, et pour des considérations économiques, l'emplacement des En.R et des FATCS dans un réseau devra être optimisé.

Mots clés: Réseaux électriques, Optimisation, EnR, FACTS.

Summary

One of the challenges of renewable energy sources such as solar and wind power lies in the risk of interruptions in their production, whose stability is threatened by their unpredictable nature.

Flexible AC Transmission Systems (FACTS) provide a solution to this problem of grid capacity and stability, which incorporates a growing share of renewable energy.

However, for economic reasons, the placement of renewable energy sources and FATCS within a grid must be optimized.

Keywords: Electrical networks, Optimization, RES, FACTS.

ملخص

من تحديات مصادر الطاقة المتجددة، كالطاقة الشمسية وطاقة الرياح، خطر انقطاع إنتاجها، الذي يُهدد استقراره بطبيعته غير المتوقعة

تُقدم أنظمة نقل التيار المتردد المرنة حلاً لمشكلة سعة الشبكة الكهربائية واستقرارها والتي تشمل حصة متزايدة من الطاقة المتجددة

و.مع ذلك ولأسباب اقتصادية يجب تحسين توزيع مصادر الطاقة المتجددة و أنظمة نقل التيار المتردد المرنة داخل الشبكة

الكلمات المفتاحية: الشبكات الكهربائية، التحسين، الطاقة المتجددة

Table des matières

Liste des figures	VII
Liste des tableaux	X
Liste des acronymes.....	XI
Liste des symboles	XI
Introduction générale.....	1

Chapitre I: Etat de l'art sur les énergies renouvelables

I.1. Introduction.....	4
I.2. Définition de l'énergies renouvelables	4
I.3. Types de l'énergies renouvelables	5
I.3.1.Energie biomasse	
I.3.1.1.Définition.....	5
I.3.1.2.Les principes de fonctionnement de l'Energie Renouvelables.....	7
I.3.1.3. Les avantages et les inconvénients de l'Energie Biomasse	8
I.3.2.l'Energie Hydraulique	
I.3.2.1. Définition.....	9
I.3.2.2. Les principes de fonctionnement de l'énergie hydraulique.....	9
I.3.2.3. Les avantages et les inconvénients de l'énergie hydraulique	11
I.3.3. Energie géothermique	
I.3.3.1. Définition	11
I.3.3.2. Les principes de fonctionnement de l'énergie géothermique	11
I.3.3.3 les avantages et les inconvénients de l'énergie géothermique.....	12
I.3.4. Energie Solaire	
I.3.4.1. Définition.....	13
I.3.4.2. L'énergie solaire en Algérie	14
I.3.4.3. Les principes de fonctionnement de l'énergie solaire	15
I.3.4.4. Les types d'énergies solaires.....	15
I.3.4.5. Présentation de la centrale P.V de skhouna-saïda, Algérie.....	16
I.3.4.6. Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire.....	18
I.3.5. Energie Eolienne	
I.3.5.1. Définition.....	18
I.3.5.2. Principe de fonctionnement de la centrale éolienne.....	19
I.3.5.3. Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne.....	20

I.4. Evolution d'énergie renouvelable dans le Monde et en l'Algérie.....	20
I.5. Conclusion	22

Chapitre II: Le concept FACTS

II.1.Introduction	24
II.2. Le concept FACTS	24
II.2.1. Fonctionnement des <i>FACTS</i>	26
II.2.2. Contexte Algérien :	27
II.2.3. Nécessité des dispositifs FACTS	29
II.3. Systèmes FACTS	29
II.4. Avantages des FACTS	30
II.5. Différents types des FACTS	30
II.5.1. Compensateurs parallèles	30
II.5.1.2. <i>Compensateur statique synchrone (STATCOM)</i>	32
II.5.2. Compensateurs série.....	33
II.5.3. Compensateurs hybrides.....	34
II.6. Modélisation des dispositifs FACTS.....	34
II.6.1.Types de la modélisation des dispositifs FACTS	35
II.6.1.1. <i>Injection de puissance aux extrémités de la ligne</i>	35
II.6.1.2. <i>Création d'un noeud fictif</i>	36
II.6.1.3. <i>Modification de la matrice d'admittance nodale</i>	37
II.7. Modélisation du STATCOM	37
II.7.Coût des dispositifs FACTS.....	38
II.8. FACTS au monde	39
II.9. Conclusion.....	40

Chapitre III: Amélioration de l'efficacité d'un réseaux réel IEEE par l'intégration des En.R et les FACTS

III.1.Introduction.....	42
III.2.Outils de simulation.....	43
III.3. Stabilité des réseaux électriques	45
III.3.1 Classification de la stabilité des réseaux électriques	46
III.3.2. Facteur de charge et les directions de puissance.....	46
III.3.3. Calcul Continu de l'écoulement de puissance (Continuation power flow- CPF).....	48
III.4. Simulation relatives au réseau standard IEEE 39 nœuds	51
III.4.1. Présentation du réseau.....	51
III.5.Emplacement du STATCOM	55

III.5.1. Impact du STATCOM	55
III.6. Emplacement du SPQ.....	57
III.6.1. SPQ sur le nœud	60
<i>III.6.1.1. Profils des tensions et les pertes de puissances dans le système.....</i>	<i>60</i>
III.6.2. SPQ nœud 8.....	62
<i>III.6.2.1. Profils des tensions et les pertes de puissances dans le système:</i>	<i>62</i>
III.6.3.SPQ au nœud 8.....	63
<i>III.6.3.1.Profils des tensions et les pertes de puissances dans le système :</i>	<i>64</i>
III.6.4.Synthèse.....	66
III.7. Système hybride STATCOM + SPQ :.....	66
III.8. Conclusion :	68
Conclusion générale et perspectives	
Conclusion générale et perspectives.....	71
Bibliographie.....	75
Annexes	76

Liste des figures

Chapitre I : Etat de l'art sur les énergies renouvelables

Figure I.1: Les énergies renouvelables	05
Figure I.2 : Energie de biomasse	06
Figure I.3: Principe de fonctionnement de biomasse	08
Figure I.4: Conversion de l'énergie hydraulique en énergie électrique	09
Figure I.5 : Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique	10
Figure I.6: La géothermie	12
Figure I.7: Conversion du rayonnement solaire en énergie électrique	14
Figure I.8: Héliodyne le premier four solaire en Algérie	14
Figure I.9: Energie photovoltaïque	16
Figure I.10: Le schéma général de centrale photovoltaïque Ain Skhouna de Saida	17
Figure I.11: les champs photovoltaïques de la centrale d'Ain Skhouna	18
Figure I.12: central éolienne	20
Figure I.13: Evolution d'énergie renouvelable dans le monde	22
Figure I.14 : Evolution d'énergie renouvelable en Algérie	22

Chapitre II : Le concept FACTS

Figure II.1 : Ligne de transport à courant alternatif	26
Figure II.2 : SVC à Naama et Béchar	29
Figure II.3: Photo montrant l'une des Plates-formes des trois SVC de l'Algérie	30
Figure II.4 : Classification des dispositifs FACTS selon la catégorie	31
Figure II.5 : Compensateurs parallèles à base de thyristors	32
Figure II.6 : Compensateurs parallèles à base de GTO thyristors	33
Figure II.7 : STATCOM (a) structure de base, (b) schéma équivalent	34
Figure II.8 : Compensateurs série	35
Figure II.9 : Compensateurs hybrides	36
Figure II.10 : Connexion de FACTS au Ligne Transmise	36
Figure II.11 : Connexion de FACTS avec l'injection de puissances aux deux extrémités	37
Figure II.12 : Modélisation avec noeud fictif : a) ligne avec FACTS, b) représentation équivalente	38
Figure II.13: Intégration du dispositif FACTS dans une ligne	39
Figure II.14 : Représentation schématique de STATCOM	39

Chapitre III :Amélioration de l'efficacité'un réseaux réel IEEE par l'intégration des En.R et les FACT

Figure III.1 : Les fonctions statiques et dynamiques de l'interface graphique interactive du PSAT	46
Figure III.2 : L'éditeur de PSAT	47
Figure III.3 : Bibliothèque de simulink	47
Figure III.4: Calcul continu de l'écoulement de puissance: pas prédicteur obtenu par les moyens de la tangente	51
Figure III.5: Calcul continu de l'écoulement de puissance : pas correcteur obtenu par les moyens d'intersection perpendiculaire	52
Figure III.6: Calcul continu de l'écoulement de puissance: pas correcteur obtenu par les moyens de la paramétrisation locale	53
Figure III.7 : Le réseau test IEEE 39-nœuds	54
Figure III.8 : La structure du réseau test IEEE 39-nœuds	55
Figure III.9: Profil des tensions du réseau IEEE 39-nœuds	56
Figure III.10 : Présentation des nœuds fragiles de chaque zone	56
Figure III.11: Courbe V(P) de la zone 1 du système (état de base)	57
Figure III.12: Courbe V(P) de la zone 2 du système (état de base)	57
Figure III.13: Courbe V(P) de la zone 3 du système (état de base)	57
Figure III.14: Courbe V(P) avec STATCOM au nœud15	58
Figure III.15: Profils des tensions du système avec STATCOM au nœud 15	59
Figure III.16: Profils de pertes de puissance actives avec STATCOM au nœud 15	59
Figure III.17: Profils de pertes de puissance réactives avec STATCOM au nœud 15	59
Figure III.18: Organigramme du processus CPF avec SPQ	61
Figure III.19: Courbe V(P) avec SPQ au nœud 3	62
Figure III.20: Profils des tensions du système avec SPQ au nœud 3	62
Figure III.21 : Profils de pertes de puissance actives avec SPQ au nœud 3	63
Figure III.22 : Profils de pertes de puissance réactives avec SPQ au nœud 3	63
Figure III.23: Maximum du facteur de charge avec SPQ [Extrait de l'annexe: B3, B4 , B5]	63
Figure III.24: Courbe V(P) avec SPQ au nœud8	64
Figure III.25: Profils des tensions du système avec SPQ au nœud 8	64
Figure III.26: Profils de pertes de puissance actives avec SPQ au nœud 8	65

Figure III.27 : Profils de pertes de puissance réactives avec SPQ au nœud 8	65
Figure III.28: Courbe V(P) avec SPQ au nœud18	65
Figure III.29: Profils des tensions du système avec SPQ au nœud18	66
Figure III.30: Profils de pertes de puissance actives avec SPQ au nœud 18	66
Figure III.31: Profils de pertes de puissance réactives avec SPQ au nœud 18	66
Figure III.32: Pertes de puissances actives et réactives totales pour les différents emplacements du SPQ	67
Figure III.33: Rapport global des tensions pour les différents emplacements du SPQ	67
Figure III.34: Courbe V(P) de la zone 1 avec SPQ et STATCOM	68
Figure III.35: Courbe V(P) de la zone avec SPQ et STATCOM	68
Figure III.36: Courbe V(P) de la zone 3 avec SPQ et STATCOM	69
Figure III.37: Profils des tensions du système avec SPQ et STATCOM	69
Figure III.38: Profils des pertes des puissances actives avec SPQ et STATCOM	70
Figure III.39: Profils des pertes des puissances actives avec SPQ et STATCOM	70

Liste des tableaux

Chapitre II : Le concept FACTS

Tableau II.1. Types de FACTS modélisables par la création d'un noeud fictif	38
Tableau II.2: Prix approximatif des différents FACTS	41
Tableau II.3:FACTS installés dans le monde en 2005	41

Liste des acronymes

CRE	Commission de régulation de l'énergie
CDER	Centre de Développement des Energies Renouvelables
kW	Unité de puissance (Kilowatt)
MW	Unité de puissance (Mégawatt)
Pv	Photovoltaïque
MWc	Mégawatt-crête
KV	Kilovolt
Mtep	Million de tonnes équivalent pétrole
M	Mètre
Cm	Centimètre
m³	Mètre cube
°C	Degrés Celsius
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission System
EPRI	Electric Power Research Institute
STATCOM	Static Synchronous Compensator
SSSC	Static Synchronous Series Compensator
IPFC	Interline Power Flow Controller
MVA	<i>Méga Volts Ampères</i>
AC	Alternative Current (Courant alternatif)
SVC	Static var compensator
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
GTO	Gate Turn-Off Thyristor
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
En.R	Energies renouvelables
UPFC	Unified Power Flow Controller
CPF	Continuation Power Flow
SPQ	Source Photovoltaïque(puissance active, puissance réactive)

Liste des symboles

V_s	Tension de la source
V_r	Tension de la charge
I_{max}	Courant maximal
I_{min}	Courant minimal
MLI	Modulation par largeur d'impulsion
V_{sh}	Tension (shunt) injectée par le STATCOM
Q_{sh}	Puissance réactive délivrée par le STATCOM
Q_r	Puissance réactive demandée par la charge
I_{sh}	Courant (shunt) injecté par le STATCOM
V_{se}	Tension (série) injecté par le SSSC
X_l	Réactance de la ligne de transport
X	Réactance totale du réseau
X_{eff}	Réactance effective
V	Tension de source
B	Susceptance
X_a	Réactance série limitant les transitoires
I_q	Composante du courant de la ligne sur l'axe q
I'_q	Composante du courant fourni par le compensateur shunt sur l'axe q
V_{sq}	Composante de la tension de la source sur l'axe q
X_i	Angle de commutation
I_l	Courant de ligne

Introduction

générale

Introduction générale :

Face à l'augmentation croissante de la demande énergétique mondiale et aux préoccupations environnementales liées à l'utilisation des énergies fossiles, les énergies renouvelables apparaissent comme une alternative incontournable. L'intégration de ces sources dans les réseaux électriques modernes, bien que bénéfique, soulève des défis techniques, notamment en termes de stabilité et de qualité de l'énergie. Pour répondre à ces enjeux, les technologies d'électronique de puissance telles que les systèmes FACTS (Flexible AC Transmission Systems) offrent des solutions innovantes. Ce mémoire s'inscrit dans cette dynamique en explorant l'impact combiné de l'intégration de sources photovoltaïques et des dispositifs FACTS, en particulier le STATCOM, sur la performance d'un réseau électrique standard. À travers une étude de cas sur le réseau IEEE 39 nœuds, modélisé sous PSAT, nous visons à démontrer l'intérêt de cette synergie pour améliorer la stabilité et l'efficacité énergétique des réseaux.

Le premier chapitre pose les bases théoriques du sujet. Il commence par une définition générale des énergies renouvelables et expose leurs principales formes : solaire, éolienne, hydraulique, géothermique et biomasse. Chaque type est présenté avec ses **principes de fonctionnement**, ses **avantages** et ses **inconvénients**, ainsi qu'un aperçu de leur **développement en Algérie**, avec un focus particulier sur la **centrale photovoltaïque d'Ain Skhouna à Saïda**. Ce chapitre permet ainsi de comprendre les caractéristiques techniques des sources d'énergie renouvelable et leurs enjeux d'intégration dans le réseau.

Le deuxième chapitre introduit le concept des **systèmes FACTS**, leur rôle dans les réseaux électriques modernes et leurs différents types : **shunt, série et hybrides**. Une attention particulière est portée sur le **STATCOM (StaticSynchronousCompensator)**, un dispositif de compensation parallèle particulièrement efficace pour la régulation de tension. Le chapitre détaille son **principe de fonctionnement**, où le réseau connaît des contraintes de stabilité. Il s'agit d'un chapitre clé pour comprendre l'importance des FACTS dans l'amélioration des performances du réseau.

Le chapitre III constitue la partie **pratique et applicative** du mémoire. Il présente le réseau **IEEE 39 nœuds** utilisé comme modèle de test, puis détaille les **différentes simulations réalisées sous PSAT**. Celles-ci incluent :

- L'analyse de la stabilité sans compensation,
- L'introduction du **STATCOM** pour améliorer la stabilité,
- L'ajout de **sources photovoltaïques (SPQ)** à différents nœuds,
- L'évaluation d'un **système hybride STATCOM + SPQ**.

Chaque scénario est comparé en termes de **profil de tension**, de **pertes de puissance** et de **performance globale du réseau**. Les résultats obtenus démontrent l'efficacité de l'approche hybride et valident les hypothèses posées.

A black and white conceptual image showing a human hand cupping a small, detailed landscape. The landscape contains several wind turbines, a solar panel array, and some trees. A bright sun is visible in the sky above the hand. The image serves as a background for the chapter title.

Chapitre I : Etat de l'art sur les énergies renouvelables

I.1. Introduction:

L'énergie est dite renouvelable quand il s'agit de sources reconstituées naturellement, plutôt que de l'énergie non renouvelable qui épuise ses stocks. Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont fortement augmenté ces dernières années. Au cours des 20 prochaines années [1], tout système énergétique durable dépendra d'une utilisation rationnelle des sources traditionnelles et d'une utilisation accrue de l'énergie. La production d'électricité décentralisée à partir d'énergies renouvelables offre une plus grande sécurité aux consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant, les sources aléatoires imposent certaines règles en termes de dimensions et d'utilisation des systèmes de récupération d'énergie[1].

I.2. Définition de l'énergies renouvelables :

Une énergie renouvelable est une source d'énergie se renouvelant assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de temps humain. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil (rayonnement), mais aussi la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique). Soulignons que le caractère renouvelable d'une énergie dépend non seulement de la vitesse à laquelle la source se régénère, mais aussi de la vitesse à laquelle elle est consommée. Le comportement des consommateurs d'énergie est donc un facteur à prendre en compte dans cette définition. Les énergies renouvelables sont également plus « propres » (moins d'émissions de CO₂, moins de pollution) que les énergies issues de sources fossiles, (Figure I.1).

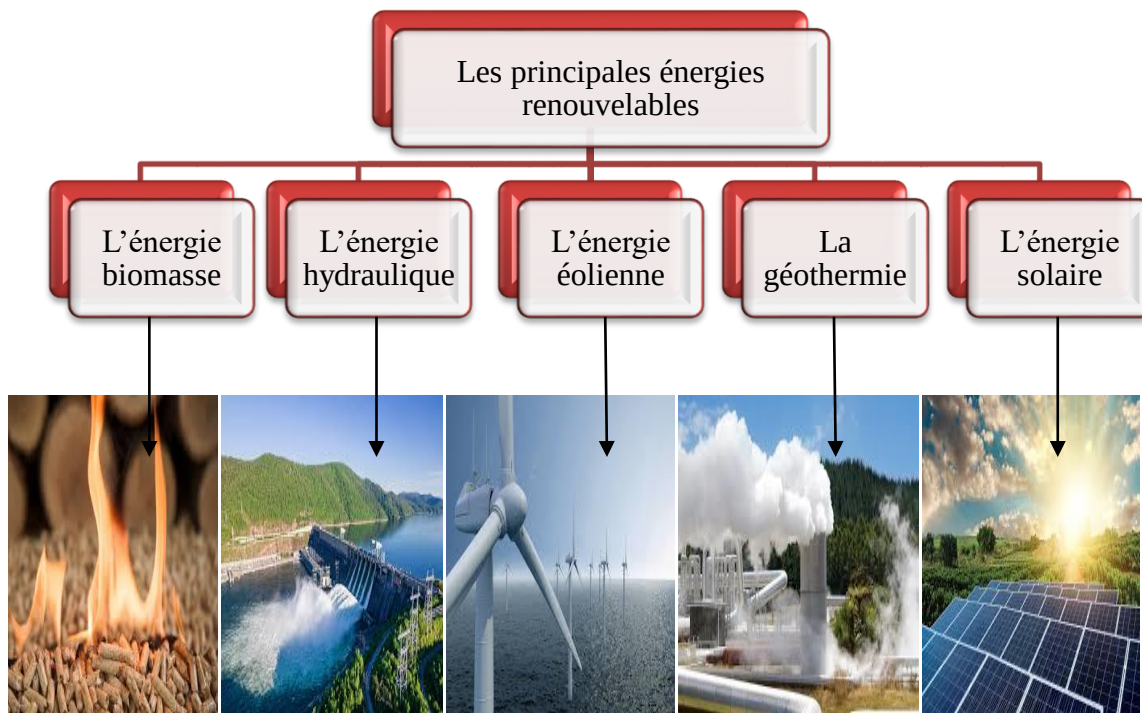


Figure I.1: Les énergies renouvelables [2]

I.3. Types de l'énergies renouvelables:

Il existe plusieurs types d'énergies renouvelables, produites à partir de sources différentes.

I.3.1.Énergiebiomasse:

I.3.1.1.Définition:

L'énergie biomasse englobe toute matière organique provenant de sources végétales ou animales. Les principales formes d'énergie tirée de la biomasse incluent: les biocarburants destinés aux transports (fabriqués principalement à partir de céréales, de sucre, de plantes oléagineuses et d'huiles recyclées); le chauffage résidentiel (fonctionnant au bois); ainsi que la combustion de bois et de déchets dans des centrales qui génèrent de l'électricité, de la chaleur, ou les deux simultanément (voir Figure I.2).

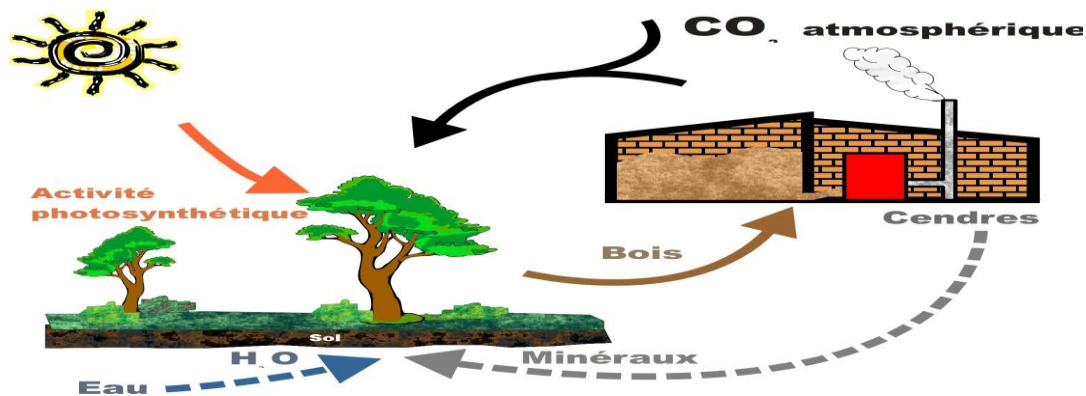


Figure I.2 : Energie de biomasse [3]

Il s'agit de l'ensemble des végétaux et donc l'ensemble des déchets organiques de l'agriculture et de l'activité humaine. La biomasse est divisible en 3 secteurs:

- **Le bois énergie** : Parmi les usages du bois aujourd'hui, sont distingués :
- Les usages à longue durée, qui retardent les émissions, avec le bois d'œuvre (charpentes, constructions, menuiserie, ameublement, etc.), possédant la valeur économique la plus importante, et le bois d'industrie (panneaux, papier, cartons, chimie verte, etc...).
- Les usages émettant du CO₂ très rapidement, comme le bois-énergie (combustion du bois essentiellement pour la production de chaleur, seule ou en cogénération avec l'électricité) mais qui permet de valoriser les sous-produits de l'exploitation forestière, les résidus de scieries et de papeteries ou les rebuts de construction. D'après le rapport de la Commission de régulation de l'énergie (CRE) de 2023 en 2019 le bois d'œuvre (20,0 Mm³) et le bois d'industrie (10,5 Mm³) constituaient la majeure partie de l'utilisation commerciale du bois, devant le bois-énergie (8,1 Mm³) et l'autoconsommation non commercialisée (17 Mm³ environ). Le bois-énergie a connu une légère croissance sur la dernière décennie en raison d'une consommation plus forte de bûches et de plaquettes pour la cogénération, les chaufferies collectives et industrielles, et d'une demande domestique accrue. Avec une consommation de 110 TWh₂₉ environ aujourd'hui, il est la principale EnR (dont il représente 30%) [4], devant les énergies hydrauliques, éolienne et solaire. Il est utilisé principalement (90%) [4] pour la production de chaleur (chauffage des particuliers), des collectivités et de l'industrie, avec environ 20 TWh dans les réseaux de chaleur et également pour

la production d'électricité et la production de biocarburants (valorisation des cellulose, hémicellulose et lignine).

Nous l'avons déjà dit, mais il convient de le répéter, l'usage du bois énergie doit être limité en raison de multiples inconvénients, à savoir (i) un bilan carbone négatif (ii) l'affaiblissement des puits de carbone forestiers, (iii) la dégradation de la qualité de l'air due à l'émission de particules toxiques, (iv) le bilan énergétique mitigé dû, notamment, à l'important séchage nécessaire et au transport et (v) la compétition avec le bois-construction et le bio-industrie[4].

- **Le biogaz:** ce sont les matières organiques qui libèrent le biogaz lors de leur décomposition selon un processus de fermentation aussi appelé méthanisation, on l'appelle aussi gaz naturel renouvelable ou même gaz de marais, par opposition au gaz d'origine fossile.

- **Le biogaz et le bio méthane :**

Le biogaz est un mélange de méthane de formule brute CH_4 et de gaz carbonique additionné d'autres composants, le biogaz est un gaz combustible il sert à produire de la chaleur, de l'électricité ou du biocarburant.

- **Les agro carburants:** issus du colza, du tournesol, du blé ou même de la betterave, utilisés purs ou mélangés a de l'essence ou du gazole, alimentent des moteurs[5].

I.3.1.2. Les principes de fonctionnement de l'Energie Renouvelables :

Une centrale biomasse produit de l'électricité grâce à la vapeur d'eau dégagée par la combustion de matières végétales ou animales, qui met en mouvement une turbine reliée à un alternateur.

- 1) **La combustion:** La biomasse est brûlée dans une chambre de combustion.
- 2) **La production de vapeur:** En brûlant, la biomasse dégage de la chaleur qui va chauffer de l'eau dans une chaudière. L'eau se transforme en vapeur, envoyée sous pression vers des turbines.
- 3) **La production d'électricité:** La vapeur fait tourner une turbine qui fait à son tour fonctionné un alternateur. Grâce à l'énergie fournie par la turbine, l'alternateur produit un courant électrique alternatif. Un transformateur élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à moyenne et haute tension.
- 4) **Le recyclage:** À la sortie de la turbine, une partie de la vapeur est récupérée pour être utilisée pour le chauffage. C'est ce que l'on appelle la cogénération. Le reste de la

vapeur est à nouveau transformée en eau grâce à un condenseur dans lequel circule de l'eau froide en provenance de la mer ou d'un fleuve. L'eau ainsi obtenue est récupérée et re-circule dans la chaudière pour recommencer un autre cycle (Figure I.3)[6].

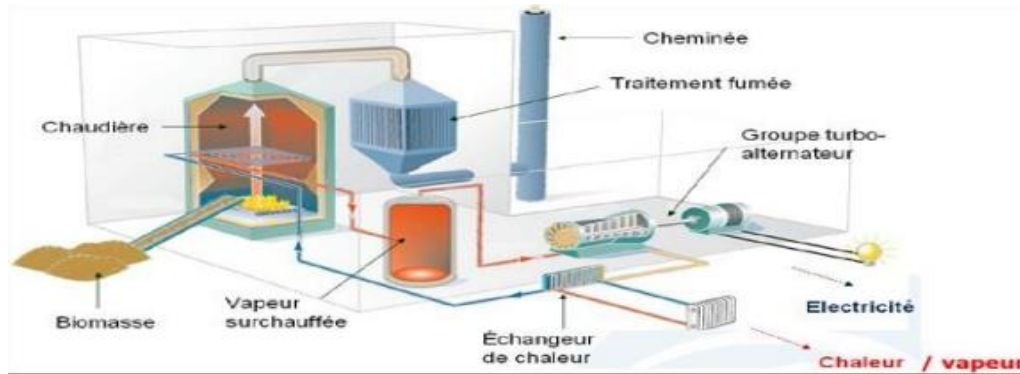


Figure I.3: Principe de fonctionnement de biomasse. [6]

I.3.1.3. Les avantages et les inconvénients de l'Energie Biomasse:

1) Les avantages:

- Technologie de combustion efficace disponible pour les applications résidentielles (chauffage urbain et commercial).
- Meilleur résultat dans la production de chaleur urbaine (pour plusieurs bâtiments) que dans les systèmes de chauffage individuels.
- Réduction des émissions de CO₂, d'oxyde d'azote et de dioxyde de soufre grâce au remplacement des combustibles fossiles.
- Sécurité énergétique avec sources de biomasse forestière disponible localement.

2) Les inconvénients:

- Un engagement à long terme est nécessaire pour obtenir un rendement du capital investi (dépendances en immobilisations élevées).
- Possibilité de perte de chaleur pendant la distribution.
- Coûts supplémentaires associés à la réglementation provinciale des chaudières à vapeur (exigent un niveau élevé d'attention et de compétence des opérateurs).
- Moins intéressant pour les collectivités faiblement peuplées.
- Investissement dans l'infrastructure pour vendre la chaleur [7].

I.3.2. L'Energie Hydraulique:

I.3.2.1. Définition :

L'hydroélectricité ou énergie hydraulique est la conversion de l'énergie potentielle de l'eau (chute d'eau entre deux niveaux de hauteurs différentes ou les marées qui vont créer un mouvement de l'eau) en énergie mécanique puis en énergie électrique.

La conversion de l'énergie hydraulique en énergie mécanique est réalisée à l'aide d'une turbine. La conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique se fait à l'aide d'un générateur électrique qui est le plus souvent une génératrice synchrone. L'énergie est ensuite injectée sur le réseau électrique à l'aide d'un transformateur qui permet de raccorder deux réseaux électriques avec des tensions différentes. En France, en 2020, c'est la première source d'énergie électrique renouvelable devant l'éolien et la deuxième source de production d'électricité du pays après le nucléaire. (Figure I.4) [5].

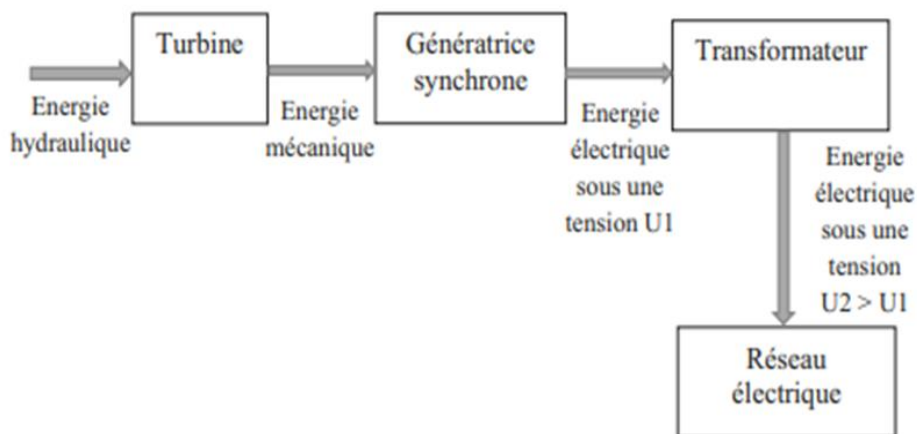


Figure I.4:Conversion de l'énergie hydraulique en énergie électrique. [5]

I.3.2.2. Les principes de fonctionnement de l'énergie hydraulique:

L'eau accumulée dans les barrages ou dérivées par les prises d'eau, constitue une énergie potentielle disponible pour entraîner en rotation la turbine d'une génératrice. L'énergie hydraulique se transforme alors en énergie mécanique. Cette turbine accouplée mécaniquement à un alternateur l'entraîne en rotation afin de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique. (Figure I.5).

La puissance disponible résulte de la conjonction de deux facteurs :

- Hauteur de la chute.
- Débit de la chute.

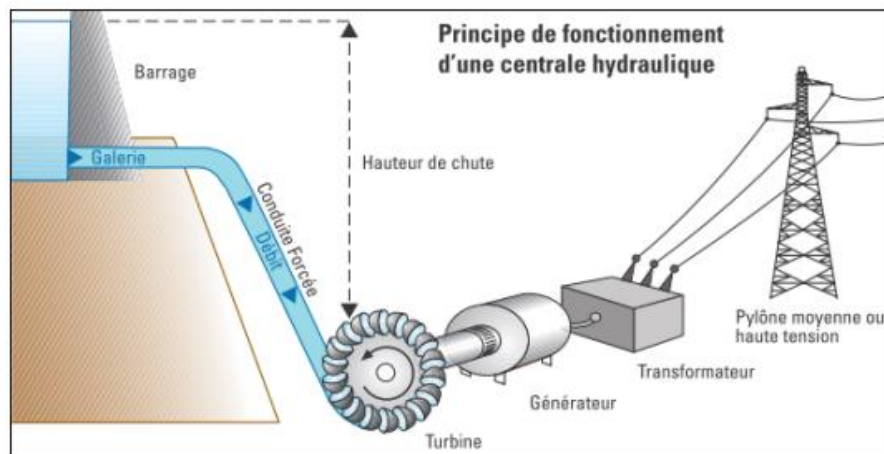


Figure I.5 : Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique[8].

Une centrale hydraulique ou hydroélectrique transforme l'énergie mécanique de l'eau en énergie électrique : en s'écoulant ou en chutant d'une grande hauteur, l'eau entraîne une machine tournante, la turbine, qui transmet cette énergie à un générateur capable de produire de l'électricité. Techniquement, c'est le même fonctionnement que les moulins à eau. La différence, c'est que ces centrales sont beaucoup plus puissantes et génèrent beaucoup plus d'énergie. Grâce au cycle naturel de l'eau, pas besoin de machines qui feraient remonter l'eau en altitude: les centrales hydrauliques sont naturellement réapprovisionnées en eau. Sans compter que l'eau rejetée par la centrale est restituée à la rivière tout aussi propre, sans avoir subi de modifications [8].

Les deux types de barrage:

1) Barrage de haute chute:

- Les centrales hydrauliques implantées en montagne utilisent des barrages «des haute chute».
- Avec les barrages de haute chute il faut 1 m qui chute 450 mètres pour produire un kilowatt.
- Les barrages de haute chute ne fonctionnent qu'en hiver et se remplissent au printemps et en été.

2) Barrage de rivière :

- Les centrales hydrauliques situées à proximité d'un fleuve ou d'une rivière de plaine utilisent des barrages « de vallée ».
- Avec les barrages de vallées il faut 100 m^3 qui tombent de 4 mètres 50cm.

- Les barrages de vallées peuvent produire de l'électricité en toute saison [6].

I.3.2.3. Les avantages et les inconvénients de l'énergie hydraulique :

1) Les avantages :

- Energie renouvelable non intermittente : source de production électrique souple et stockable à grande échelle.
- N'émet pas de gaz à effet de serre lors de la production d'électricité.
- Installation qui dure longtemps.
- Apporte un revenu régulier à de petites communes.

2) Les inconvénients:

- Impacts du barrage sur l'environnement et la biodiversité (faune et flore aquatique).
- Émissions de gaz à effet de serre lors de la construction du barrage.
- Impacts sur la société : expulsion de personnes habitant sur la zone.
- Les sédiments sont bloqués par les barrages et n'arrivent plus.

I.3.3. Energie géothermique:

I.3.3.1. Définition:

L'énergie géothermique: est une ressource juste sous nos pieds. Provenant de la chaleur accumulée dans nos sols, l'énergie géothermique apparaît être une ressource quasi inépuisable puisque constamment réapprovisionnée. Cette énergie est vouée à plusieurs utilités :

Elle peut servir à produire de l'eau chaude, à chauffer une maison ou même à rafraîchir une pièce, à grande échelle, elle est utilisée dans l'agriculture pour le chauffage des serres par exemple [2].

I.3.3.2. Les principes de fonctionnement de l'énergie géothermique :

1. La géothermie très basse énergie (température inférieure à 30°C):

Elle concerne les aquifères peu profonds d'une température inférieure à 30°C, température très basse qui peut cependant être utilisée pour le chauffage et la climatisation si l'on adjoint une pompe à chaleur.

2. La géothermie basse énergie (température entre 30 et 90°C) :

Appelée également basse température ou basse enthalpie, elle consiste en l'extraction d'une eau à moins de 90°C dans des gisements situés entre 1 500 et 2 500 mètres de

profondeur. L'essentiel des réservoirs exploités se trouve dans les bassins sédimentaires de la planète car ces bassins recèlent généralement des roches poreuses (grès, conglomérats, sables) imprégnées d'eau.

3. La géothermie moyenne énergie (température entre 90 et 150°C) :

La géothermie de moyenne température ou moyenne enthalpie se présente sous forme d'eau chaude ou de vapeur humide à une température comprise entre 90 et 150°C. Elle se retrouve dans les zones propices à la géothermie haute énergie, mais à une profondeur inférieure à 1000 m.

4. La géothermie haute énergie (température supérieure à 150°C) :

La géothermie haute enthalpie ou haute température concerne les fluides qui atteignent des températures supérieures à 150°C. Les réservoirs, généralement localisés entre 1500 et 3000 mètres de profondeur, se situent dans des zones de gradient géothermal anormalement élevé. (Figure I.6). [2]

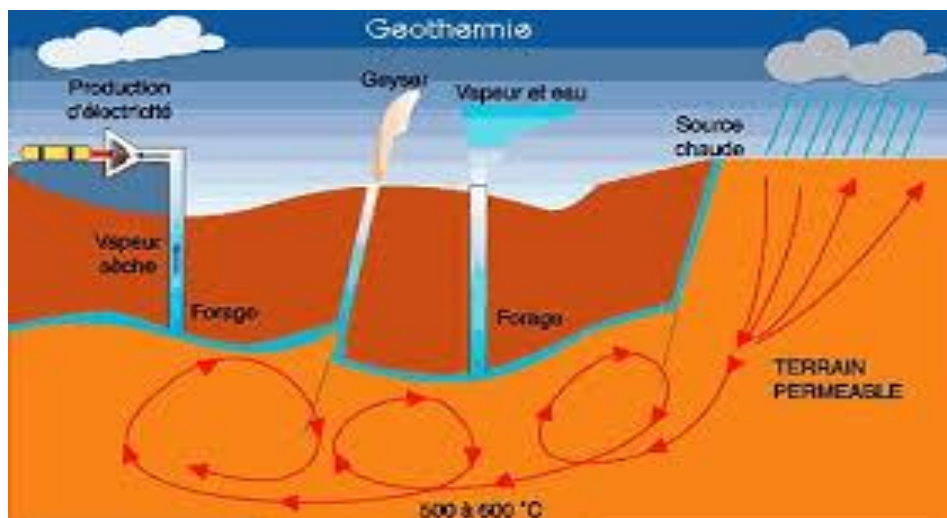


Figure I.6: La géothermie.

I.3.3.3 les avantages et les inconvénients de l'énergie géothermique:

1) Les avantages :

- La géothermie de profondeur ne dépend pas des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent).
- C'est une source d'énergie quasi-continue.

- Les gisements géothermiques ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années (30 à 80 ans en moyenne).

2) Les inconvénients :

- Les sites de forages sont limités en fonction du type de roche (roche chaude facile à percer).
- Risque de rejets gazeux nocifs ou toxiques.
- Risque de réchauffement du site de forage.
- Certaines pratiques de forages augmentent les risques sismiques.
- Certaines technologies utilisent des produits chimiques à fort impact environnemental[3].

I.3.4. Energie Solaire :

I.3.4.1. Définition :

L'énergie solaire est parmi les plus anciennes sources d'énergie que l'humanité ait connue. Cette énergie est fournie pour 30 %, soit l'équivalent de 102 W/m², à la terre par les rayonnements solaires.

Le reste de ses rayonnements est utilisé principalement pour assurer les mouvements de l'eau et de l'air ; et enfin pour assurer l'équilibre thermique du sol.

Le Soleil est ainsi la source d'énergie la plus puissante sur la planète.

L'énergie reçue par ce dernier en une heure est égale à celle dont la terre a besoin pendant environ un an.

L'énergie solaire peut être convertie en électricité, soit directement par effet photovoltaïque, soit indirectement après conversion en chaleur puis en énergie mécanique dans les centrales thermiques solaires (Figure I.7)

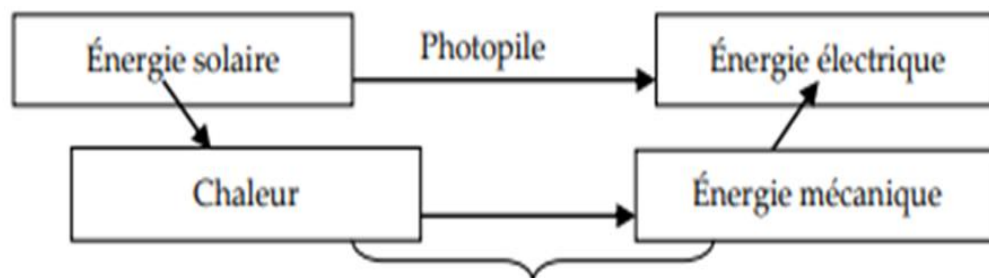


Figure I.7 : Conversion du rayonnement solaire en énergie électrique. [7]

1.3.4.2. L'énergie solaire en Algérie:

L'énergie solaire thermique est la transformation instantanée de l'énergie des rayons solaires en énergie thermique. Cette transformation peut être utilisée directement, comme par exemple le chauffage de l'eau sanitaire à l'aide des capteurs solaire, ou indirectement dans le cas de la production de l'électricité dans une centrale thermodynamique solaire. Le solaire thermique est basé sur l'utilisation de la chaleur transmise par rayonnement qui est différente de celle du photovoltaïque où l'électricité est générée par l'énergie des photons. A l'aide des progrès technologiques, les techniques de captation directe d'une partie de l'énergie solaire sont nettement améliorées afin de rendre les systèmes solaires plus fiables, efficaces et rentables. Historique de l'Héliodyne à Bouzaréah, l'utilisation de l'énergie solaire en Algérie ne date pas d'aujourd'hui. En 1954 et sur le site du Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER), le four solaire de Bouzareah, baptisé "Héliodyne", a vu le jour (Figure I.8).



Figure I.8: Héliodyne le premier four solaire en Algérie [8].

C'est une réalisation prestigieuse de plus de 40 tonnes et dont la hauteur atteint près de 9 mètres. Le four solaire répond à des caractéristiques remarquables qui lui ont valu le titre du plus puissant four solaire au monde pour l'époque. La réalisation du four solaire à Bouzaréah avait pour but d'obtenir à l'échelle une expérience semi-industrielle, des produits susceptibles d'un débouché direct sur le territoire algérien. Il s'agit principalement de la synthèse à partir de l'oxygène et de l'azote atmosphérique, de l'acide azotique destiné à la fabrication d'engrais azotés, ainsi que le craquage de certains composés organiques contenus dans des gisements de gaz naturel découvert en Algérie. Les principales caractéristiques de l'Héliodyne sont données comme suit :

- Diamètre du miroir parabolique : 8,40 m
- Surface utile : 50 m²
- Ouverture relative : 2,67 m
- Distance focale : 3,14 m
- Puissance théorique : 50 kW
- Puissance utilisable dans le four : 30 kW
- Température au foyer en fonctionnement statique : 3000 °C
- Hauteur totale au-dessus de son assise de béton : 8.90 m
- Puissance utilisable dans le four : 30 kW

I.3.4.3. Les principes de fonctionnement de l'énergie solaire:

L'énergie solaire peut, ou bien être convertie en chaleur, ou bien en électricité, l'exploitation de cette énergie peut se faire de manière thermique, thermodynamique ou photovoltaïque. [8].

I.3.4.4. Les types d'énergies solaires :

1. Energie solaire thermique :

L'Energie solaire thermique: qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.

L'Algérie entend mettre en valeur son potentiel solaire, l'un des plus importants au monde, en lançant des projets importants en solairethermique.

Deux projets pilotes de centrales thermiques à concentration avecstockage d'une puissance totale d'environ 150 MW chacune était lancés sur la période 2011-2013. Ces projets s'ajouteront à la centralehybride de HassiR'Mel d'une puissance de 150 MW, dont 25 MW ensolaire.

2. Energie photovoltaïque :

C'est l'énergie récupérée et transformée directement en électricité à partir de la lumière du soleil au moyen de capteurs photovoltaïques (Figure I.9).

La cellule photovoltaïque est un dispositif utilisant l'effet photovoltaïque permet de convertir directement le rayonnement solaire en énergie électrique.

Un système photovoltaïque consiste en un ensemble de cellules montées sur un module qui sont reliés en série, ou en parallèle ou de façon combinée.

Les technologies photovoltaïques existantes ont atteint différents degrés de développement. Outre le photovoltaïque, plusieurs autres techniques sont utilisées pour produire de l'énergie solaire. [10].



Figure I.9:Energie photovoltaïque. [9].

I.3.4.5. Présentation de la centrale P.V de skhouna-saida, Algérie :

La stratégie énergétique de l'Algérie repose sur l'accélération du développement de l'énergie solaire. Le gouvernement a prévu prévoyait le lancement de plusieurs projets solaires photovoltaïques d'une capacité totale d'environ 800 MWc jusqu'à l'ici 2020. D'autres projets d'une capacité de 200 MWc par an devraient être réalisés sur la période 2021-2030. Actuellement on compte 23 centrales photovoltaïques sur le territoire national. (Figure I.10). [15].



Figure I.10:Le schéma général de la centrale photovoltaïque Ain Skhouna de Saida

La centrale photovoltaïque d'**Ain Skhoua** 30MWc a été installée en 2015, elle s'inscrit dans le cadre du programme national des énergies renouvelables. Cette centrale injecte sa puissance produite directement dans le réseau national 60KV. Elle a été réalisée par les opérateurs Allemand, groupe BELECTRIC.

Avec sa capacité de 30 mégawatts, cette centrale solaire photovoltaïque pour la production d'énergie électrique est la première du genre dans la région sud-ouest et dont la réalisation a nécessité la mobilisation d'un investissement de près de 3,9 milliards de dinars.

Tous les champs solaires de la centrale d'**Ain Skhoua** occupent une superficie de 42.3 ha avec 119520 panneaux photovoltaïques (CS6P-250P-silicium poly-cristallin). Cette centrale se compose de deux champs (appelé aussi boucle) ; Saida 1 (Boucle 1) et Saida 2 (Boucle 2) avec une puissance de 15.936 MWc et 13.944MWc respectivement. Le champ Saida 1 (Boucle 1) comporte 8 sous champ (Skide) et le champ Saida2 (Boucle 2) 7 sous champ photovoltaïques, ce qui fait un total de 15 sous champ. (Figure I.11) [11].



Figure I.11: les champs photovoltaïques de la centrale d'Ain Skhoua.[11]

3. Energie solaire passive :

L'énergie solaire passive: est une autre forme d'utilisation de l'énergie solaire qui consiste à utiliser directement la lumière pour le chauffage.

Cette énergie est concernée la plus ancienne et certainement la plus importante, quoique discrète, pour cela, Pour qu'un bâtiment bénéficie au mieux des rayons du soleil, on doit tenir

compte de l'énergie solaire lors de la conception architecturale (façades doubles, surface vitrée orienté vers le Sud etc.)

L'isolation thermique joue un rôle important pour optimiser la proportion de l'apport solaire passif dans le chauffage et l'éclairage d'un bâtiment. Dans une maison solaire passive, l'apport solaire passif permet de faire des économies d'énergie importantes. Dans les bâtiments dont la conception est dite bioclimatique, l'énergie solaire passive permet aussi de chauffer tout ou en partie d'un bâtiment pour un coût proportionnel quasi nul [12].

4. L'énergie thermodynamique :

La chaleur produite va être convertie en énergie mécanique pour produire de l'électricité, la température beaucoup plus élevée que dans les systèmes thermiques entre 100° et 1 500°C, contre 20 à 100°C pour la thermique [13].

I.3.4.6. Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire:

1) Les avantages :

- L'énergie solaire est inépuisable et non polluante.
- L'énergie est propre et ne dégage pas de gaz à effet de serre
- L'énergie solaire thermique permet d'assurer une partie des besoins en eau chaude sanitaire et en chauffage. L'installation des panneaux solaires thermiques permet de réaliser des économies conséquentes
- Les frais de maintenance et de fonctionnement d'une installation thermique sont relativement faibles.

2) Les inconvénients :

- Le coût d'investissement d'une installation solaire thermique est relativement élevé.
- L'énergie solaire est une énergie intermittente. Il faut donc un système de chauffage d'appoint.
- La production d'énergie solaire n'est possible que lorsqu'il y a du soleil.
- Il faut pouvoir stocker la chaleur dans des ballons ou des dalles chauffantes.

I.3.5. Energie Eolienne:

I.3.5.1. Définition :

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

exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers. À l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an. La machine se compose de 3 pales (en général) portées par un rotor et installées au sommet d'un mât vertical. Cet ensemble est fixé par une nacelle qui abrite un générateur. Un moteur électrique permet d'orienter la partie supérieure afin qu'elle soit toujours face au vent. Les pales permettent de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Le vent fait tourner les pales entre 10 et 25 tours par minute. La vitesse de rotation des pales est fonction de la taille de celles-ci. Plus les pales seront grandes, moins elles tourneront rapidement(Figure I.12).

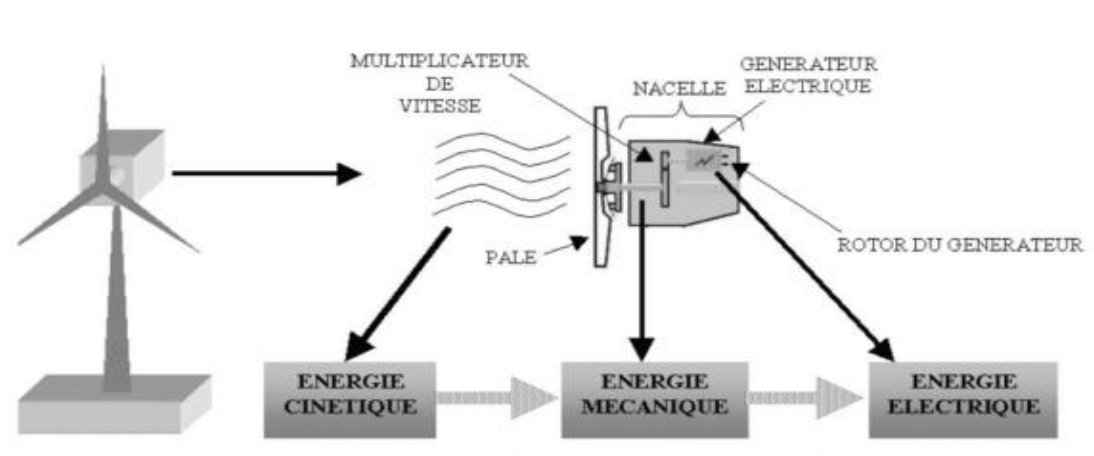


Figure I.12: Central Eolienne [3].

I.3.5.2. Principe de fonctionnement de la centrale éolienne :

Une éolienne est un dispositif mécanique destiné à convertir l'énergie du vent en électricité. Elle est composée des principaux éléments suivants :

- 1) un mât, haut d'une centaine de mètres en moyenne, qui soutient la nacelle afin que celle-ci puisse capter des vents plus hauts donc plus forts;
- 2) une nacelle, située en haut de ce mât, qui abrite notamment la génératrice ;
- 3) le rotor, auxquelles sont fixées les trois pales, entrent en mouvement rotatif grâce à l'intensité du vent et fait ainsi tourner un arbre mécanique. Le multiplicateur augmente la vitesse de celui-ci, cette énergie est enfin convertie en électricité par la génératrice.
- 4) Une éolienne produit de l'électricité lorsque la vitesse du vent se situe entre 3 mètres par seconde (force suffisante pour entraîner la rotation des pales) et 25 mètres par seconde. Lorsque ce dernier seuil de vitesse est atteint, un dispositif présent dans la nacelle se met alors en marche, celui-ci actionne le frein du rotor ainsi qu'une

modification de l'inclinaison des pales, ce qui conduit à un arrêt de la machine tant que le vent ne faiblit pas.

Actionnées par le vent, les pales fixées sur le rotor entraînent une génératrice électrique installée dans la nacelle. Le courant ainsi produit, d'une tension de 400 à 690 Volts est ensuite transporté par câble souterrain jusqu'au poste de livraison, afin d'être injecté sur le réseau national [3].

I.3.5.3. Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne :

1) Les avantages :

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable contrairement aux énergies fossiles.
- L'énergie éolienne est une énergie propre. Elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement comme les autres sources d'énergie qui ont causé un changement radical du climat par la production énorme et directe du CO₂.
- L'énergie éolienne ne présente aucun risque et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs contrairement à l'énergie nucléaire.
- Mode d'exploitation des éoliennes et la possibilité de les arrêter à n'importe quel moment, leur donne l'avantage d'avoir un bon rendement, contrairement aux modes de fonctionnement continus de la plupart des centrales thermiques et nucléaires [14].

2) Les inconvénients :

- Nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour les gérants des réseaux.
- Coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés.
- Bruit: il a nettement diminué grâce aux progrès réalisés au niveau des Multiplicateurs [15].

I.4. Evolution d'énergie renouvelable dans le Monde et en l'Algérie:

L'Evolution d'énergie renouvelable dans le monde et en l'Algérie est montré à la figure (III.8) et la figure (III.9) respectivement.

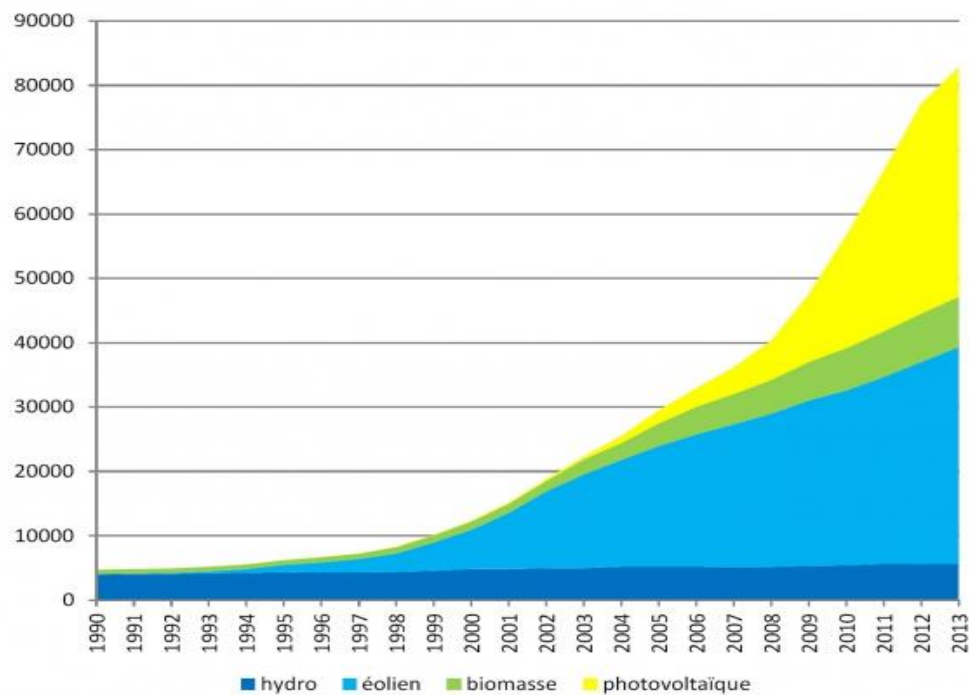


Figure I.13:Evolution d'énergie renouvelable dans le monde[16].

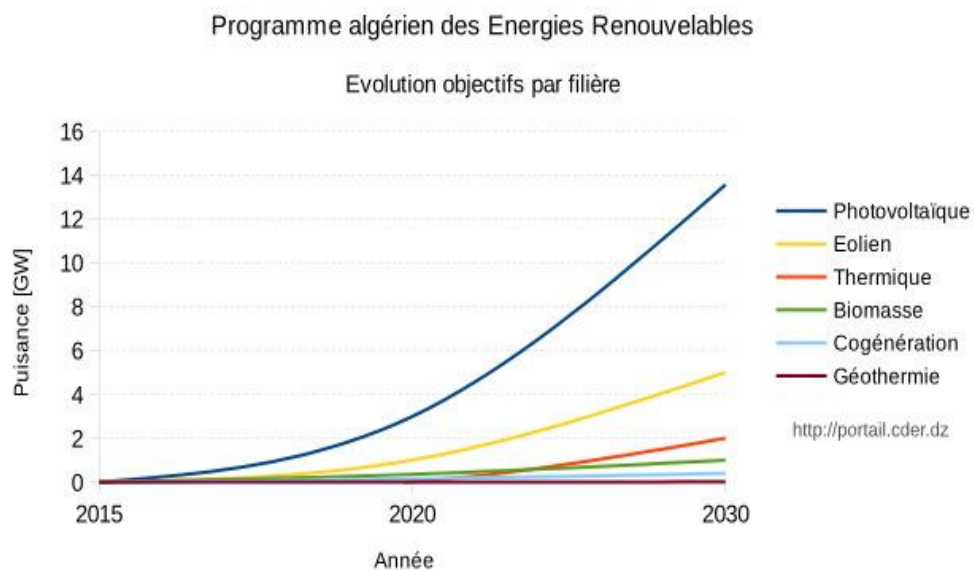


Figure I.14:Evolution d'énergie renouvelable en Algérie[16].

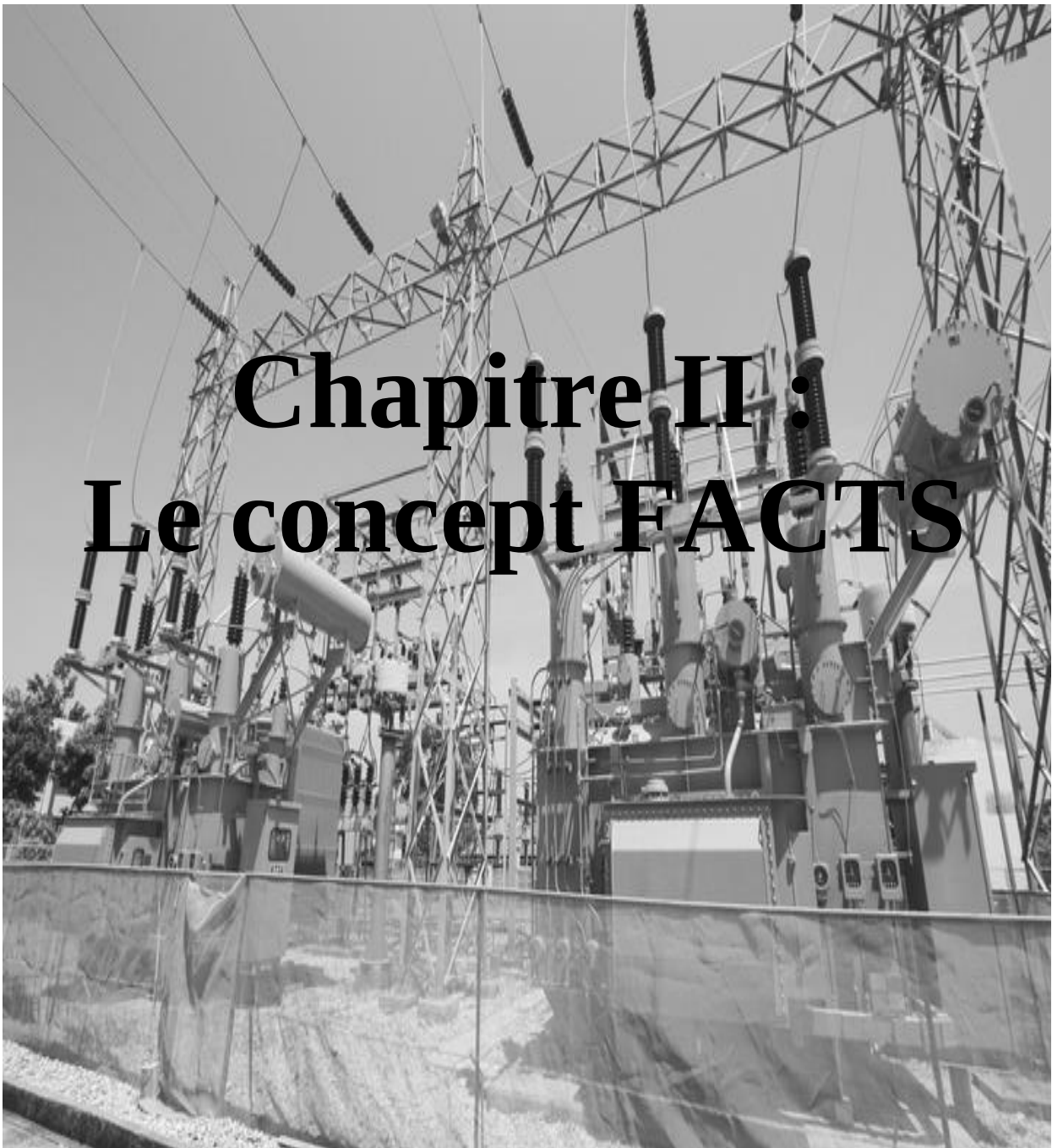
D'après les deux figures précédentes et l'état l'art sur les énergies renouvelables, notre choix pour étude et simulation s'est porté sur l'énergie photovoltaïque. Elle est la plus évoluée, propre, inépuisable et gratuite.

I.5. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre une description générale des différentes sources renouvelables, en ayant précisé les avantages et les inconvénients de chaque type. L'évolution d'énergie renouvelable en monde et en Algérie a été évoquée.

Le défis des énergies renouvelables «En.R»telles que le solaire réside dans le risque d'interruption de leur production dont la stabilité est menacée par leur caractère aléatoire.

Les systèmes FACTS «Flexible AC Transmission Systems» apportent une solution à ce problème de capacité et de stabilité du réseau, lequel intègre une part croissante d'énergie renouvelable, le chapitre suivant est dédié à ce concept.



Chapitre II : Le concept FACTS

II.1.Introduction :

L'exploitation d'un réseau électrique doit respecter certaines règles essentielles. D'une part, il faut assurer en permanence l'égalité entre la production et la consommation afin de maintenir la fréquence à une valeur constante. D'autre part la répartition de la puissance active entre les générateurs et les charges obéit aux lois de Kirchhoff ; les transits empruntent les chemins de moindre impédance sans se soucier des capacités de transport des lignes et des problèmes de stabilité. A cela vient s'ajouter la puissance réactive, qui peut être produite ou consommée par les lignes elles-mêmes et qui vient modifier l'état de charge des lignes ainsi que le plan de tension [17].

La technologie des FACTS présente des solutions efficaces pour l'amélioration du fonctionnement des réseaux électriques. Leurs capacités de contrôler les différents paramètres électriques agissant sur le flux de puissance dans un réseau permettent un contrôle efficace du transit de puissance et de la tension dans un réseau. Ces dispositifs peuvent aussi augmenter la puissance transmissible et la stabilité du système de puissance. Les avantages des FACTS ne touchent pas uniquement le régime permanent, ils ont aussi des avantages en régime transitoire et dynamique tel que l'amortissement de pompage, le filtrage des harmoniques et la limitation des courants de défaut.

II.2. Le concept FACTS :

EPRI (Electric Power Research Institute), qui représente un consortium dédié à la recherche dans les réseaux électriques et regroupant des compagnies d'électricité américaines, a lancé en 1988 le concept FACTS (Flexible AC Transmission Systems) qui est un projet à long terme. La technologie FACTS utilise l'électronique de puissance et plus particulièrement des systèmes à thyristors qui permettent d'obtenir des vitesses de commande nettement supérieures à celles des systèmes mécaniques qui sont encore largement utilisés, et un niveau de maintenance bien inférieur car les systèmes mécaniques s'usent beaucoup plus rapidement que les systèmes statiques. Parmi les systèmes FACTS, on cite [18].

- ❖ Compensateur synchrone statique ('STATCOM'*Static Synchronous Compensator*).
- ❖ Static Synchronous Series Compensator (SSSC).
- ❖ Le contrôleur de transit de puissance entre ligne IPFC (*Interline Power Flow Controller*)

Face à la saturation des réseaux électriques, les compagnies de distribution d'énergie électrique exploitent, de plus en plus, leurs réseaux près des limites de sécurité (conduite aux limites). Cette situation engendre des problèmes d'exploitation, notamment pour le contrôle des flux de puissance, le maintien d'un profil de tension acceptable, la surveillance des reports de charge,...etc. À cet effet, l'aspect sécurité prend une grande importance et des recherches sont entreprises dans différents pays pour trouver des moyens susceptibles d'améliorer la sécurité et rendre l'exploitation des réseaux plus flexible.

Ainsi, plusieurs études ont été menées pour connaître les avantages liés à l'utilisation des dispositifs FACTS dans les réseaux pour:

- Lesupport du profil de la tension.
- l'amélioration de la stabilité statique et dynamique.
- l'amortissement des oscillations subsynchrones.

Ces avantages découlent principalement de l'augmentation des capacités de transit des lignes existantes par un contrôle rigoureux des différentes variables du réseau. Pour fixer les idées, nous pouvons prendre un exemple simple:

Considérons le transit de puissance sur une ligne à courant alternatif. Cette ligne est représentée sur la figure (II.1) les pertes étant supposées nulles, la puissance transmise P est fonction des amplitudes des tensions E_1 et E_2 aux extrémités de la ligne, du déphasage δ_{12} entre ces deux tensions et de l'impédance x de la ligne, comme le montre l'équation (II.1)

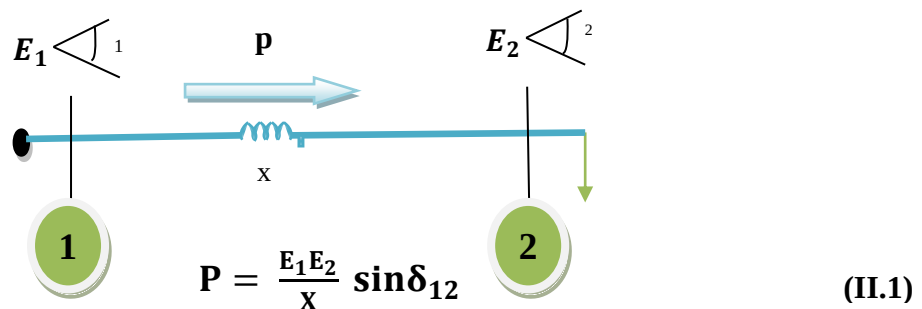


Figure II.1 : Ligne de transport à courant alternatif

Cette équation montre que la puissance transmissible par une ligne est limitée par les paramètres énoncés ci-dessus et pas forcément par sa limite thermique. De plus, il découle de cette équation que si l'on peut régler un, deux ou les trois paramètres, on contrôle alors le transit de puissance dans la ligne [18].

Elle montre aussi qu'il est possible d'augmenter la puissance transitée entre deux

réseaux soit en maintenant la tension des systèmes, soit en augmentant l'angle de transport entre les deux systèmes, soit en réduisant artificiellement l'impédance de la liaison. En jouant sur un ou plusieurs de ses paramètres, les FACTS permettent un contrôle précis des transits de puissance réactive, une optimisation des transits de puissance active sur les installations existantes et une amélioration de la stabilité dynamique du réseau. Ils permettent aussi aux consommateurs industriels de réduire les déséquilibres de charges et de contrôler les fluctuations de tensions créées par des variations rapides de la demande de puissance réactive et ainsi d'augmenter les productions, de réduire les coûts et d'allonger la durée de vie des équipements [19].

En effet, les FACTS permettent de :

- Ne pas transporter d'énergie réactive en la fournissant là où elle est demandée.
- Augmenter les puissances maximales transmissibles et donc les transferts de puissance active.
- Contrôler les flux de puissance pour la surcharge des lignes et le risque de déclenchement en cascade [18].

II.2.1. Fonctionnement des FACTS :

Un FACTS agit généralement en fournissant ou en consommant dynamiquement de la puissance réactive sur le réseau. Ceci a pour effet de modifier l'amplitude de la tension à son point de connexion, et par conséquent la puissance active maximale transmissible.

Les FACTS sont utilisés aussi pour le filtrage des courants harmoniques et la stabilisation de la tension. L'ordre de grandeur de la puissance d'un FACTS va de quelques MVA (**Méga Volts Ampères**) à quelques centaines de MVA. Ils s'appliquent dans deux secteurs principaux :

➤ Grands réseaux de transmission

Pour améliorer le contrôle, augmenter les capacités de transfert de puissance et assister la récupération du réseau consécutive à un défaut dans les systèmes de transmission AC (**Alternative Current**).

➤ Réseaux Industriels

Pour améliorer la qualité de la puissance fournie en un point précis du réseau AC en présence de fluctuations de charge, e.g. compensation du flicker pour les fours à arc. Gamme de puissance inférieure à celle d'un réseau de transmission.

II.2.2. Contexte Algérien :

Depuis les années 2000, le développement du réseau de transport d'électricité fait partie des priorités de l'Algérie [18].

Le réseau de transport algérien est en phase d'expansion, car il doit répondre à la forte augmentation de la demande en électricité (+ 5 à 7% par an). Les principaux besoins en électricité sont domestiques liés:

- à l'accroissement de la population (celle-ci a plus que triplé en 50 ans, et son taux de croissance est actuellement estimé à 1,2% par an).
- au changement des habitudes de consommation avec l'usage des appareils. En outre, dans les années 90, peu d'investissements ont été entrepris sur le réseau électrique, et celui-ci s'est dégradé.

Au total, depuis 2005, près de 15 000 km de nouvelles lignes HT et THT ont été réalisés ou restent à construire.

Le développement du réseau de transport concerne à la fois le développement des réseaux haute tension (60 et 220 000 Volts), et la création d'un réseau à très haute tension (400 000 Volts).

Le développement du réseau 400 000 Volts est mis en œuvre à la fois dans l'axe:

- Est-Ouest (interconnexions internationales avec le Maroc et la Tunisie).
- Nord-Sud (raccordement des réseaux du Sud, jusqu'alors le point trop isolé du réseau national).

En 2002, un total de trois SVC (static var compensator) a été introduit dans le réseau national de la Sonelgaz: un dispositif à la sous station de Naama et deux à Béchar (figure II.2).

Les trois SVC ont une classe identique, -10/+40Mvar à la tension 220kV (figure II.3) et l'une des plates-formes de ses trois SVC est montrée par la figure (II.3) Le réseau est constitué d'une ligne de 500km sous une tension de 220kv. Un seul circuit aérien de la ligne de transmission pour l'alimentation de la charge éloignée dans la partie ouest du pays.

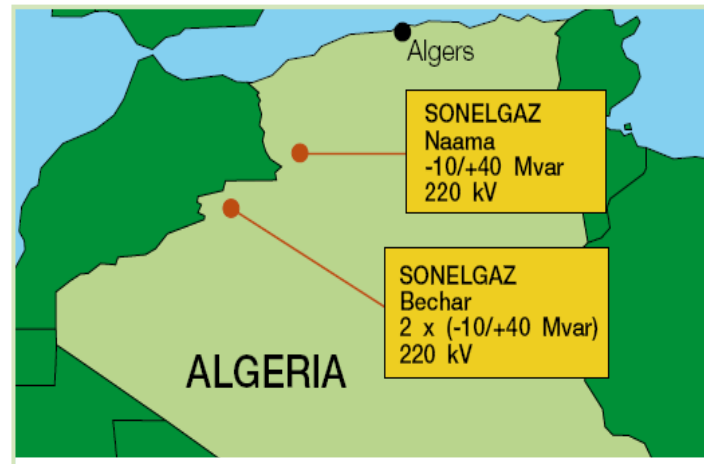


Figure II.2 : SVC à Naama et Béchar [19]

Des productions locales de diesel et des turbines à gaz alimentent les charges locales de Béchar depuis le début des années quatre vingt dix et elles ont été fermées pendant l'année 2002.

Deux sous stations 220/60 kV, une intermédiaire (Naama) et une à la fin de la ligne (Béchar) ont été équipées avec des SVC (figure II.3) pour les objectifs suivants :

- Pour fournir au système de transmission, le support en énergie réactive afin de maintenir une tension stable pendant le fonctionnement normal et quotidien.
- Pour le rendement dynamique au cours du contrôle de la ligne 220kV mise sous tension ainsi pour le maintien d'une tension stable dans le système sous diverses conditions d'exploitation. En particulier, pour prévenir l'effondrement de tension (voltage collapse) et l'instabilité du système pendant le transitoire et l'évolution rapide des conditions de tension dans le système. Les charges prises hors réseau 220kV sont de l'ordre de 12 MVA à Naama et 35 MVA à Béchar.



Figure II.3: Photo montrant l'une des Plates-formes des trois SVC de l'Algérie[18]

II.2.3. Nécessité des dispositifs FACTS :

La compensation de l'énergie réactive au niveau des lignes de transmission permet la régulation du profil de la tension le long de ces lignes avec un bon contrôle de la puissance active transmise. Il est reconnu que, la stabilité peut être améliorée, quelque soit son type, si la compensation réactive du système de transmission varie rapidement. Les méthodes de compensation de l'énergie réactive classiques se basent sur les batteries de condensateurs ou les bobines fixes ou commandées mécaniquement. Ces méthodes sont non efficaces dans le contrôle du réseau électrique quand il est sévèrement perturbé.

Grâce aux avancées récentes dans la technologie des IGBT et GTO, le temps de réaction de ces dispositifs a diminué à quelques milli secondes. Il est possible donc de répondre à la demande par l'utilisation d'une compensation rapide en utilisant les dispositifs FACTS [20].

II.3. Systèmes FACTS :

Les systèmes FACTS (Flexible Alternating Control Transmission Systems) sont définis selon IEEE « Les systèmes de transmission du courant alternatif incorporant des contrôleurs à base d'électronique de puissance afin d'améliorer la contrôlabilité des réseaux électriques ainsi que la capacité de transfert des lignes» .

Avec une vitesse de commande rapide et une durée de vie considérable cette technologie est devenue un outil incontournable pour l'amélioration de l'exploitation et de la flexibilité des systèmes de puissance. En plus, avec les avancées récentes dans la technologie

des thyristors GTO/IGBT, la vitesse de réponse de ces dispositifs a diminué jusqu'à quelques millisecondes ce qui les rend capables d'offrir des solutions appropriées pour n'importe quelle situation du réseau électrique [21].

II.4. Avantages des FACTS :[22]

- Contrôle le transit de la puissance active.
- Augmente la sécurité des systèmes énergétiques (augmentation de la limite de la stabilité transitoire, amortissement des oscillations ...).
- ^{2 2} ➤ Réduit le transit de l'énergie réactive.
- Optimise les puissances générées, donc réduit le coût de production de l'énergie.
- Agir comme filtre actif.
- Améliorée l'interconnexion et l'échange énergétique

II.5. Différents types des FACTS :

Les dispositifs FACTS se divisent en trois catégories suivant leur façon de se connecter au réseau électrique (Figure II.4) [21]:

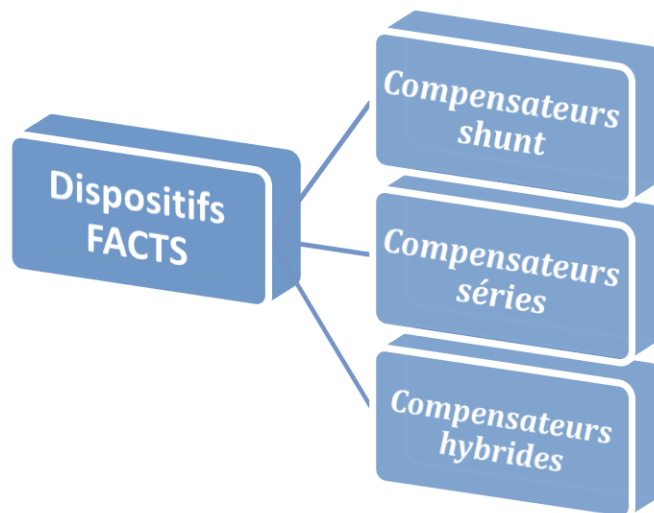


Figure II.4 : Classification des dispositifs FACTS selon la catégorie

II.5.1. Compensateurs parallèles :

Ces compensateurs sont branchés en parallèle avec le réseau électrique. Ils permettent à partir d'une impédance variable d'absorber ou injecter du courant au réseau au point de connexion. Cette injection du courant modifie les puissances actives et réactives qui transitent

dans la ligne et au même temps elle permet la régulation de la tension de la ligne. Les compensateurs parallèles les plus utilisés sont [21]:

**Compensateurs parallèles à base de thyristors (Figure II.5) :*

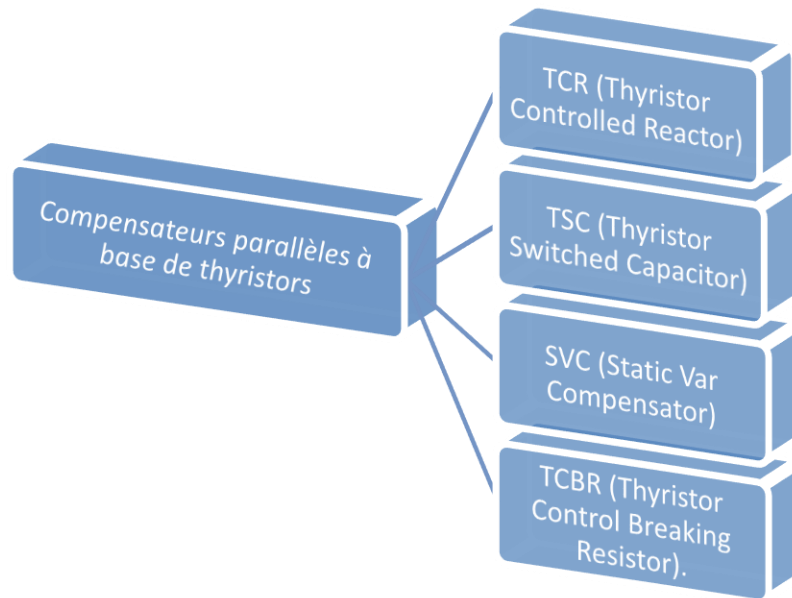


Figure II.5 : Compensateurs parallèles à base de thyristors

**Compensateurs parallèles à base de GTO thyristors (Figure II.6) :*

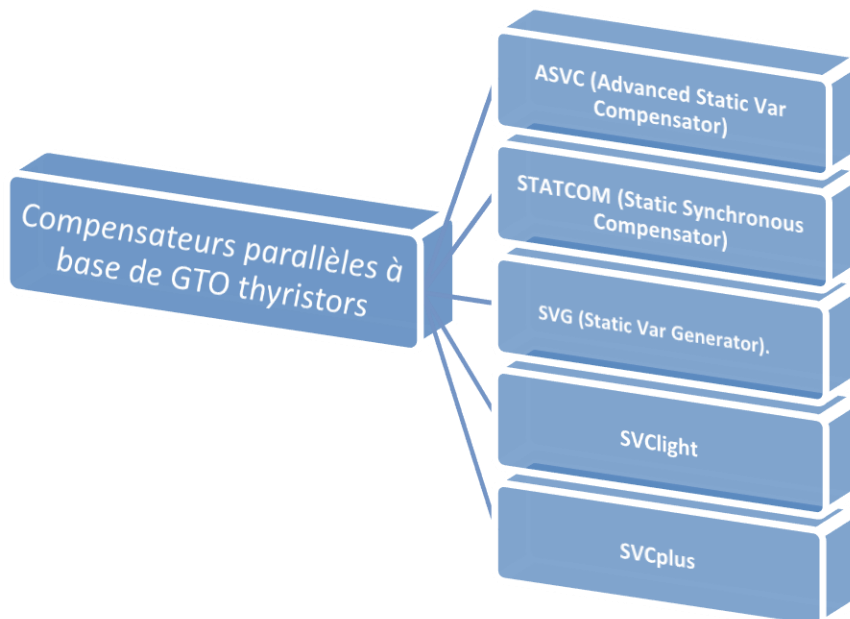


Figure II.6 : Compensateurs parallèles à base de GTO thyristors

II.5.1.2. Compensateur statique synchrone (STATCOM) :

STATCOM (STATicCOMpensator) : C'est en 1990 que le premier STATCOM a été conçu. C'est un convertisseur de tension à base de GTO ou de IGBT alimenté par des batteries de condensateur, l'ensemble est connecté parallèlement au réseau à travers un transformateur de couplage Figure (II.7.), Ce dispositif est l'analogue d'un compensateur synchrone , et comme c'est un dispositif électronique il n'a pas d'inertie mécanique présentant alors de meilleures caractéristiques tel que sa dynamique rapide et son faible coût d'installation et de sa maintenance devant les compensateurs synchrones [23].

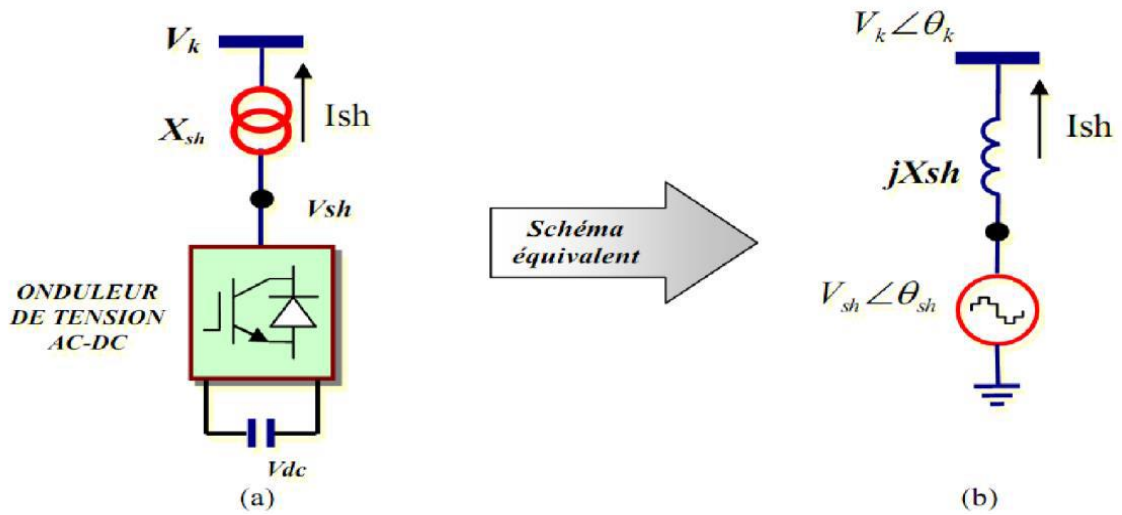


Figure II.7 : STATCOM (a) structure de base, (b) schéma équivalent [23]

Le **STATCOM** permet le même contrôle qu'un SVC mais avec plus de robustesse, ce dispositif est capable de délivrer la puissance réactive même si la tension au jeu de barres (noeud de connexion) est très faible, d'après sa caractéristique on constate que le courant maximal du STATCOM est indépendant de la tension du noeud. Pour un STATCOM idéal, n'ayant pas des pertes actives, l'équation (II.2) décrit le transfert de puissance réactive dans le réseau électrique. [24]

$$Q_{sh} = \frac{|V_K|^2}{X_{sh}} - \frac{|V_K||V_{sh}|}{X_{sh}} \cos(\theta_K - \theta_{sh}) = \frac{|V_K|^2 - |V_K||V_{sh}|}{X_{sh}} \quad (II.2)$$

Si $V_K > V_{sh}$, $Q_{sh} > 0$ devienne positive et le STATCOM absorbe la puissance réactive.

Si $V_K < V_{Sh}$, $Q_{sh} < 0$ devienne négative et le STATCOM fournisse la puissance réactive.

Le STATCOM présente de nombreux avantages :

- * Bonne réponse à faible tension : le STATCOM est capable de fournir son courant nominal, même lorsque la tension est presque nulle.
- * Bonne réponse dynamique : le système répond quasiment instantanément.
- * L'étendue de la plage de l'opération est plus large qu'avec un SVC classique.
- * Pour un contrôle optimal de la tension, les phases sont contrôlées séparément pendant les perturbations du système.
- * Une conception modulaire du convertisseur permet une adaptation pour une grande plage de puissances nominales.

II.5.2. Compensateurs série :

Des condensateurs série ont été utilisés avec succès pendant de nombreuses années pour améliorer la stabilité et les aptitudes de charge de réseaux de transport à haute tension. Ils travaillent par l'insertion de la puissance réactive capacitive pour compenser la chute de tension inductive sur les lignes.

Son principe est simple, la tension injectée par un condensateur série est proportionnelle et perpendiculaire au courant de la ligne. Par conséquent, la puissance réactive fournie par le condensateur est proportionnelle au carré du courant. Il en résulte que le condensateur série a un effet d'autorégulation [25]. Lorsque la charge du système croît, la puissance réactive produite par le condensateur série augmente également. Les compensateurs séries les plus utilisés sont présentés par la Figure II.8 :

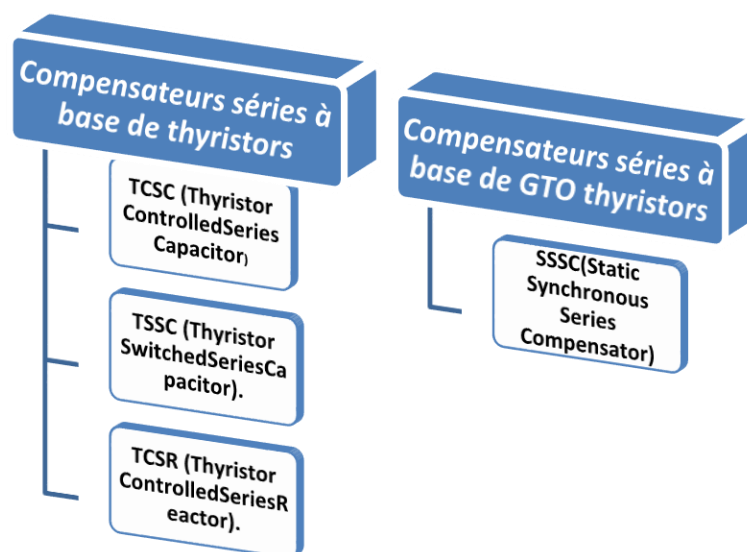


Figure II.8 : Compensateurs série

II.5.3. Compensateurs hybrides :

Ce type de compensateur assemblé entre les dispositifs séries et les dispositifs shunts commandé d'une manière coordonnée afin d'accomplir un contrôle prédéfini. Ils sont donc capables de contrôler les trois paramètres (tension, impédance et angle de déphasage) qui permettent de contrôler le transit de puissance sur une ligne de transport [21].

Les compensateurs hybrides les plus utilisés sont donnés par la Figure II.9:

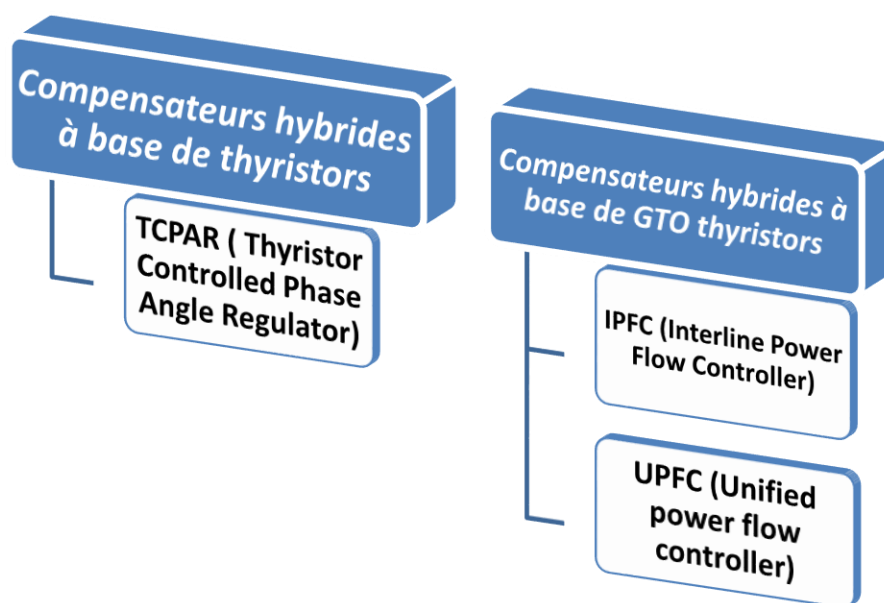


Figure II.9 : Compensateurs hybrides

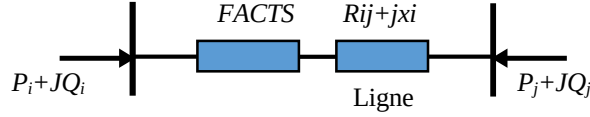
II.6. Modélisation des dispositifs FACTS :

La modélisation des FACTS consiste à représenter les dispositifs sous certaines hypothèses et dans un domaine de fréquence choisi. Les modèles développés sont ensuite intégrés dans des programmes de calcul afin de pouvoir simuler leurs effets dans l'ensemble du système. Différentes façons de modéliser les dispositifs FACTS ont été développées pour l'étude des régimes stationnaires. Elles se différencient principalement par la méthode utilisée pour intégrer les FACTS dans le calcul du Load Flow. Les trois modélisations rencontrées le plus souvent dans la littérature sont basées respectivement sur l'injection de puissance équivalente, la création d'un nœud fictif ou encore la modification de la matrice d'admittance. Les trois techniques sont présentées aux paragraphes suivants. [26]

II.6.1.Types de la modélisation des dispositifs FACTS :

II.6.1.1.Injection de puissance aux extrémités de la ligne :

Une des méthodes les plus répandues consiste à représenter les dispositifs FACTS sous forme d'injections de puissances aux nœuds telles que représentées à la (figures II.10).



Ce modèle **Figure II.10 : Connexion de FACTS au Ligne Transmise.** Les transits de puissances dans la ligne par des injections de puissances aux deux extrémités (Figure II.11). Celles-ci sont calculées de manière à ce que l'effet produit soit équivalent à celui du dispositif en question [27].

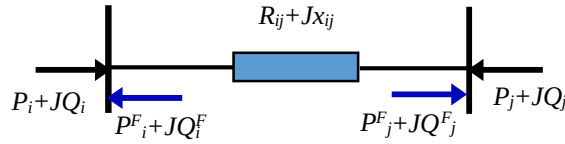


Figure II.11 : Connexion de FACTS avec l'injection de puissances aux deux extrémités.

Les injections de puissances active et réactive au nœud i sont données par :

$$\begin{cases} P_{iF} = P_{ij} - P_{ijF} \\ Q_{iF} = Q_{ij} - Q_{ijF} \end{cases} \quad (II.4)$$

Les injections de puissances active et réactive au nœud j sont données par :

$$\begin{cases} P_{jF} = P_{ij} - P_{ijF} \\ Q_{jF} = Q_{ij} - Q_{ijF} \end{cases} \quad (II.5)$$

Avec

- P_{iF}, Q_{iF} Injections équivalentes de puissances active au nœud i et nœud j .
- P_{ij}, Q_{ij} Transits de puissances active et réactive sans dispositif FACTS.
- P_{ijF}, Q_{ijF} Transits de puissances active et réactive avec le FACTS dans la ligne.

Les puissances actives et les puissances réactives aux bus i et bus j , sont traitées comme des charges ou des générations.

Les injections de puissances actives et réactives aux noeuds PV et PQ s'écrivent :

$$P_i + P_i^F = V_i \sum_{i=1}^{Nb} V_j [G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)] \quad (II.6)$$

$$P_j + P_j^F = V_j \sum_{i=1}^{Nb} V_i [G_{ji} \cos(\delta_j - \delta_i) + B_{ji} \sin(\delta_j - \delta_i)] \quad (II.7)$$

$$Q_i + Q_i^F = V_i \sum_{j=1}^{Nb} V_j [G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (II.8)$$

$$Q_j + Q_j^F = V_j \sum_{i=1}^{Nb} V_i [G_{ji} \sin(\delta_j - \delta_i) + B_{ji} \cos(\delta_j - \delta_i)] \quad (II.9)$$

II.6.1.2. Création d'un noeud fictif :

Une modélisation de FACTS basée sur la création d'un noeud fictif est présentée dans [26]. Le modèle d'un dispositif de type UPFC, permettant de contrôler les transits de puissances active et réactive, est illustré à la figure (II.12)

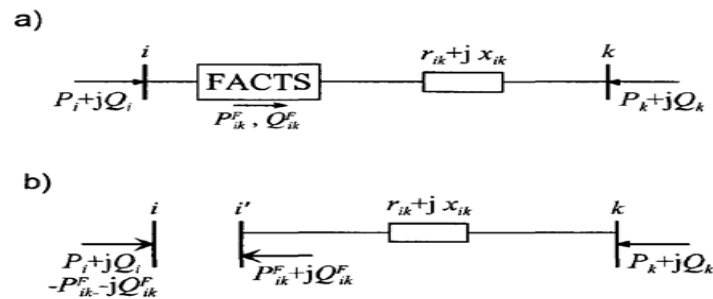


Figure II.12 : Modélisation avec noeud fictif : a) ligne avec FACTS, b) représentation équivalente.

Les valeurs de consigne des dispositifs sont directement exprimées en terme de puissances circulant dans les lignes ou injectées aux noeuds (Fig. II.12.a). Un noeud fictif i' dans lequel la ou les puissances contrôlées sont injectées, est temporairement crée. Pour conserver le bilan de puissance, la puissance injectée au nœud i' est soustraite au nœud (fig. II.12.b). Le nouveau noeud est pris en compte dans le calcul de répartition des puissances en modifiant la matrice jacobienne. Dans le cas du modèle de l'UPFC, deux lignes et deux colonnes supplémentaires apparaissent. Elles proviennent des deux nouvelles équations dues au nœud i' , de type PQ. Les types de FACTS pouvant être modélisés selon cette technique, ainsi que les grandeurs contrôlées correspondantes, sont résumés dans le (tableau II.1).

Types de FACTS	Grandeurs contrôlées
SVC	Puissance réactive $Q_i F$ injectée au nœud
TCPAR	Puissance active $P_{ik} F$ transmise dans la ligne
TCVR	Puissance réactive $Q_{ik} F$ transmise dans la ligne
UPFC	Puissances active $P_{ik} F$ et réactive $Q_{ik} F$ transmises dans la ligne

Tableau II.1. Types de FACTS modélisables par la création d'un noeud fictif.

II.6.1.3. Modification de la matrice d'admittance nodale :

Les FACTS sont envisagés comme des éléments venant modifier directement la matrice d'admittance nodale du réseau. Ils sont insérés dans la ligne selon la représentation de la figure (II.13). Selon le type de FACTS modélisé, le dispositif peut être placé au milieu ou à une extrémité de la ligne.

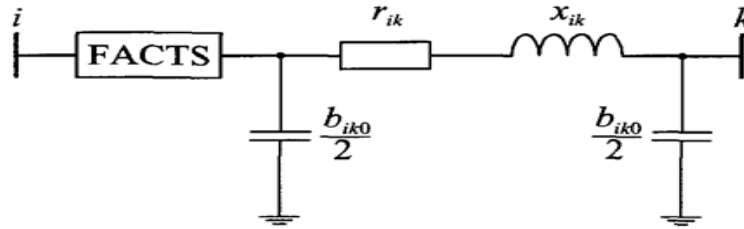


Figure II.13: Intégration du dispositif FACTS dans une ligne

II.7. Modélisation du STATCOM :

Le STATCOM appartient à la deuxième génération des dispositifs FACTS. Selon l'IEEE, Le STATCOM est un moyen de compensation dynamique connecté en parallèle au système électrique, il est basé sur l'injection d'un courant AC contrôlé à travers un transformateur de couplage. La structure de base d'un STATCOM est donnée par le schéma de la figure (II.14) [28].

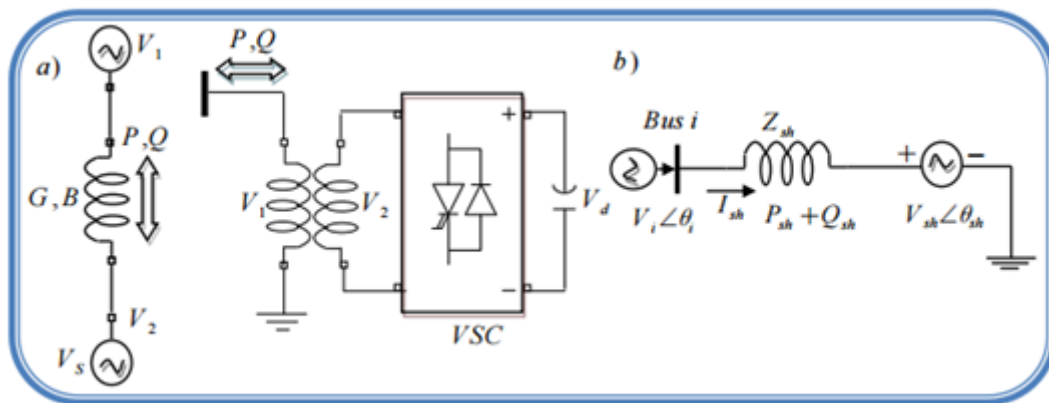


Figure II.14 : Représentation schématique de STATCOM[28].

En général la tension du STATCOM V_{sh} est injectée en phase avec la tension V_r de la ligne et dans ce cas il n'y a pas d'échange de l'énergie active avec le réseau mais seulement la

puissance réactive qui sera injectée (ou absorbée) par le STATCOM. Le STATCOM a le même rôle qu'un SVC mais avec plus de robustesse, ce dispositif capable de délivrer la puissance réactive même si la tension de jeu de barre de connexion est faible. Avec l'hypothèse d'un STATCOM idéal (convertisseur sans pertes), la contrainte de fonctionnement que doit satisfaire le STATCOM est de ne pas échanger la puissance active avec le réseau.

La tension du STATCOM est donné par:

$$E_{sh} = V_{sh}(\cos\delta_{sh} + j\sin\delta_{sh}) \quad (\text{II.11})$$

Le courant injectée par le STATCOM est donné par :

$$I_{sh} = \frac{V_{sh}-V_i}{jX_i} \quad (\text{II.12})$$

La puissance de transmission entre les deux systèmes peut être représentée par :

La puissance active transmise :

$$P = \frac{V_i V_{sh}}{X} \sin(\delta_i - \delta_{sh}) \quad (\text{II.13})$$

La puissance réactive transmise :

$$Q = \frac{V_i^2}{X} - \frac{V_i V_{sh}}{X} \cos(\delta_i - \delta_{sh}) \quad (\text{II.14})$$

Où $V_i V_{sh}$ est la tension aux nœuds, $(\delta_i - \delta_{sh})$ l'angle entre la tension et X est l'impédance de la ligne. Après l'exécution de quelques opérations complexes, les équations de puissance active et réactive sont obtenues comme suit :

$$P_{sh} = V_i^2 g_{sh} - V_i V_{sh} (g_{sh} \cos(\theta_i - \theta_{sh}) + b_{sh} \sin(\theta_i - \theta_{sh})) \quad (\text{II.15})$$

$$Q_{sh} = -V_i^2 b_{sh} - V_i V_{sh} (g_{sh} \sin(\theta_i - \theta_{sh}) - b_{sh} \cos(\theta_i - \theta_{sh})) \quad (\text{II.16})$$

Avec : $g_{sh} + jb_{sh} = 1/Z_{sh}$

g_{sh} : Conductance équivalente du STATCOM

b_{sh} : Susceptance équivalente du STATCOM

Z_{sh} : Impédance équivalente du STATCOM

II.7.Coût des dispositifs FACTS :

La construction d'un FACTS permettant d'améliorer le transfert de puissance, il permet par la même occasion d'acheter de la puissance plus économique plus loin en lieu et place d'une puissance chère et proche. Il permet ainsi de réduire les coûts d'exploitation. L'estimation de la valeur de ce type de gain doit se faire au cas par cas (Tableau II.2)[29].

Prix approximatif des différents FACTS								
	SVC	STATCOM	CSC	TCSC	Transformateur déphaseur	UPFC	SSSC	TCTST
Prix selon CIGRÉ(\$/kVA ou \$/kVAr)	35- 80	48-80	10- 20	32,5- 40	10-30	48-80	50- 80	50- 100
Prix selon Siemens(\$/kVA ou \$/kVAr)	60- 100	60-130	10- 80	55- 130		90- 170		

Tableau II.2: Prix approximatif des différents FACTS

Note: Pour l'UPFC, il faut payer pour la compensation série et parallèle.

Globalement le coût du kVAR diminue avec la puissance de l'installation. Le prix des FACTS n'est cependant pas influencé que par la puissance de ceux-ci : le niveau de redondance, les conditions atmosphériques, sismiques, le choix du système de communication avec les dispatchings, le coût de l'acquisition du terrain, le coût de construction des bâtiments et les coûts d'adaptation des stations électriques existantes jouent également un rôle important.

II.8. FACTS au monde :

En 2005, la puissance cumulée des FACTS installés dans le monde était d'environ 90 000 MVAR, répartie comme suit (Tableau II.3) [30]:

FACTS installés dans le monde en 2005		
Type	Nombre	Puissance cumulée en MVA
SVC	600	90 000
STATCOM	15	1 200
Compensation série	700	350 000
TCSC	10	2 000
HVDC tête bêche	41	14 000
UPFC	2-3	250

II.3:FACTS installés dans le monde en 2005

II.9. Conclusion:

Les systèmes FACTS ont la capacité de contrôler la puissance active et réactive transmissible de la ligne par la compensation série et la compensation parallèle ou par la compensation hybride.

Dans ce chapitre, nous avons d'abord introduit le concept de FACTS, puis fourni une brève description et des définitions des différents types d'appareils FACTS.

Cette description a été adoptée comme classification globale pour les systèmes FACTS. La plupart d'entre eux sont déjà utilisés dans la pratique. Si aujourd'hui les dispositifs FACTS sont encore sous-utilisés par rapport à leur potentiel, les évolutions techniques dans le domaine de l'électronique de puissance rendront les solutions FACTS plus compétitives face aux renforcements du réseau, le contexte algérien a été abordé

Le STATCOM sera considéré dans le chapitre 3 comme dispositif FACTS pour contrôler et améliorer l'efficacité d'un réseau de transport.

Chapitre III :
Amélioration de
l'efficacité d'un réseau
réel IEEE par
l'intégration des En.R
et les FACTS

III.1.Introduction :

Le transfert de puissance dans un réseau électrique entraîne naturellement des chutes de tension entre les sites de production et ceux de consommation. En conditions normales, ces variations de tension restent limitées à quelques pourcents de la tension nominale. Toutefois, l'un des enjeux majeurs pour les planificateurs et les exploitants de réseaux est de maintenir les tensions aux différents jeux de barres dans des plages acceptables, même en période de forte demande ou à la suite d'incidents prévisibles.

Dans certains cas, cependant, une perturbation peut provoquer, en quelques secondes ou minutes, une chute brutale des tensions, compromettant la capacité du réseau à alimenter correctement les charges et mettant en péril la stabilité du système. Ce phénomène est lié à un mécanisme appelé instabilité de tension, dont l'issue critique est **l'effondrement de tension** [31].

De manière simplifiée, l'instabilité de tension résulte d'un comportement des charges qui tendent à maintenir une consommation de puissance supérieure à ce que peuvent fournir les générateurs et le réseau de transport combinés. Aujourd'hui, dans de nombreux réseaux à travers le monde, cette forme d'instabilité est reconnue comme une menace majeure pour la sécurité d'alimentation, comparable aux surcharges thermiques (et au risque de déclenchements en cascade) ou à l'instabilité angulaire (perte de synchronisme des générateurs).

Plusieurs facteurs expliquent cette vulnérabilité croissante:

- La construction de nouvelles lignes électriques est de plus en plus complexe, souvent ralentie, voire impossible.
- La concentration de la production dans de grandes centrales a réduit le nombre de points de régulation de tension dans le réseau, tout en augmentant la distance électrique entre les centres de production et les zones de consommation. Même si la production décentralisée tend à rapprocher ces deux pôles, encore faut-il que ces unités participent activement à la régulation de tension et à la fourniture de puissance réactive.

- L'usage intensif de condensateurs shunt pour soutenir les profils de tension permet de transporter davantage de puissance, mais réduit la marge de sécurité vis-à-vis de l'instabilité.
- Les incidents provoquant l'instabilité de tension (pertes d'équipements de transport ou de production) sont relativement fréquents, davantage que certaines perturbations plus classiques comme le court-circuit triphasé.
- Enfin, la libéralisation du marché de l'électricité pousse à exploiter les réseaux au plus près de leurs limites physiques, pour des raisons économiques. Cette situation rend d'autant plus cruciales l'évaluation et la gestion du risque d'instabilité de tension.

III.2.Outils 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 transport.

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 (Figure III.1) [32]:

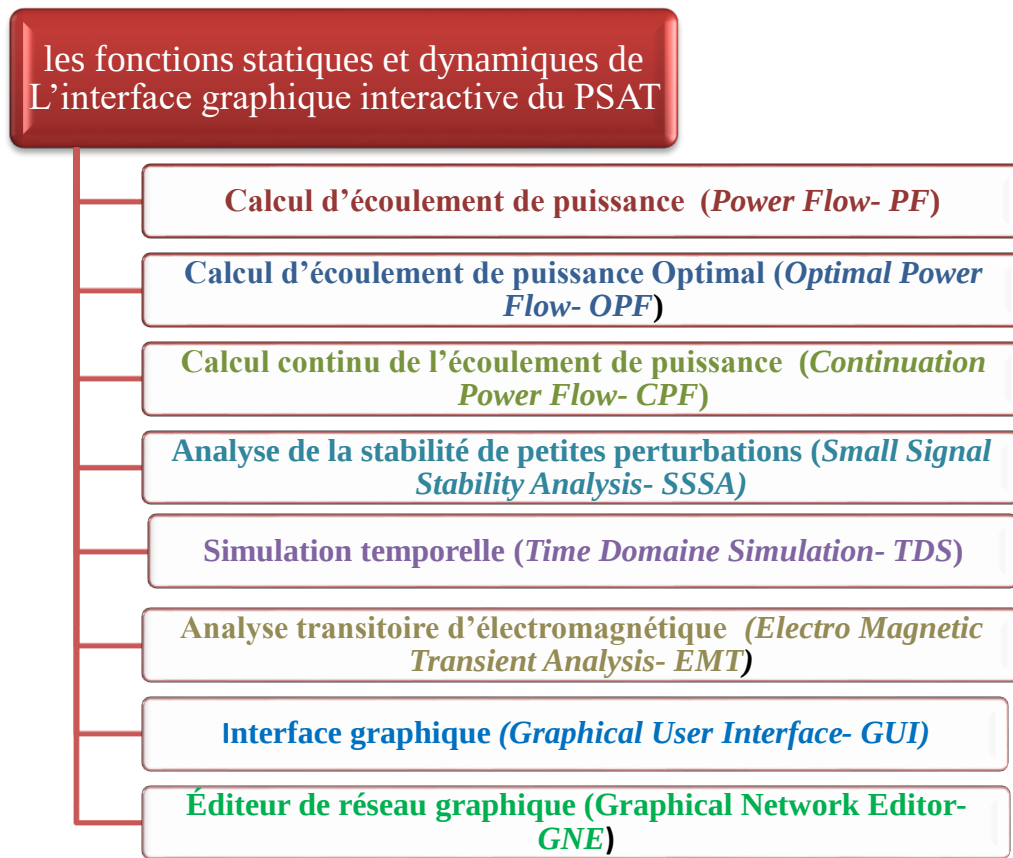


Figure III.1 : Les fonctions statiques et dynamiques de l'interface graphique interactive du PSAT

Toutes les opérations de PSAT peuvent être réparties en deux genres d'analyse:

- La première analyse est de résoudre les problèmes de l'écoulement de puissance. Cette application s'effectue dans une page de commande ou un éditeur comme montre la figure (III.2).
- La seconde analyse est d'implanter le réseau à étudier en utilisant une bibliothèque de Simulink qui contient de nombreux modèles pour l'implantation des systèmes électriques, comme montré dans la figure (III.3)

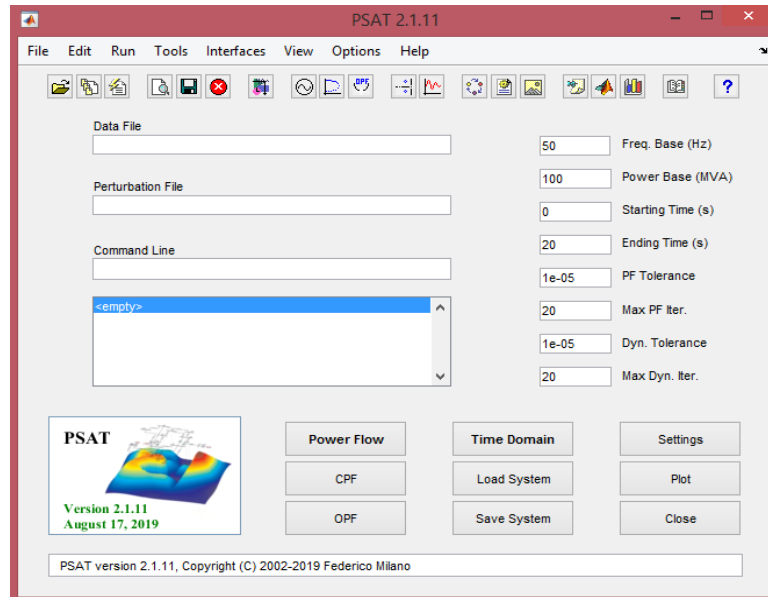


Figure III.2 : L'éditeur de PSAT

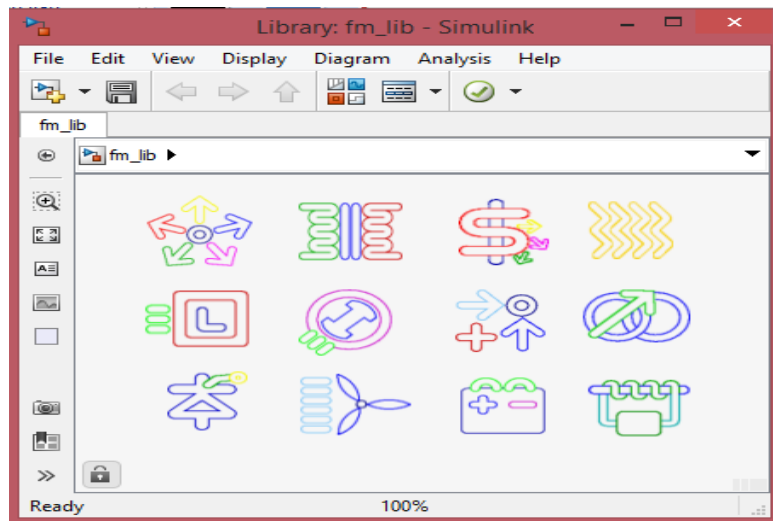


Figure III.3 : Bibliothèque de Simulink

III.3. Stabilité des réseaux électriques :

La stabilité d'un réseau électrique de HT est une propriété d'un système de puissance qui lui permet de rester dans un état d'équilibre dans des conditions normales de fonctionnement et de retrouver un état acceptable d'équilibre après avoir été soumis à une perturbation [33].

Une perturbation sur un réseau peut être une manœuvre prévue, comme l'enclenchement d'une inductance shunt, ou non prévue comme un court-circuit causé par la foudre entre une phase

et la terre par exemple. Lors de la perturbation, l'amplitude de la tension aux différents jeux de barres du réseau peut varier ainsi que la fréquence. La variation de la fréquence est due aux variations de la vitesse des rotors des alternateurs [34].

III.3.1. Classification de la stabilité des réseaux électriques :

La stabilité peut être étudiée en considérant la topologie du réseau sous différents angles. L'état de fonctionnement d'un réseau électrique est décrit selon des grandeurs physiques, telles que l'amplitude et l'angle de phase de la tension à chaque noeud, et la puissance active / réactive circulant dans chaque ligne et la vitesse de rotation de la génératrice synchrone. Si elles ne sont pas constantes, le réseau électrique est considéré comme étant en perturbations [35].

La stabilité peut être classifiée selon la nature de la perturbation :

- ❖ Stabilité de l'angle du rotor
- ❖ Stabilité de la fréquence.
- ❖ Stabilité de la tension

Durant les dernières décennies, la stabilité de tension dans les systèmes d'alimentation est devenue un vaste champ de recherches. Les phénomènes d'instabilité en tension peuvent s'étendre dans une plage de temps allant de quelques secondes à quelques heures et ont été étudiés en utilisant une variété de modèles statiques et dynamiques, y compris les régulateurs et les dispositifs électroniques de puissance.

Les sujets pertinents pour le marché de l'électricité et pour les techniques optimales d'écoulement de puissance sont généralement les phénomènes d'effondrement de tension résultant des variations de charge et des opérations de commutation. L'effondrement de tension est généralement la conséquence de l'augmentation de la charge dans les systèmes caractérisés par des conditions de chargement lourd et / ou lorsque survient une modification dans le système, comme une ligne hors service. Le résultat est, généralement, que le point de fonctionnement actuel, qui est stable, «disparaît» et le système transitoire suivant conduit à une rapide, irrécupérable, baisse de tension.

III.3.2. Facteur de charge et les directions de puissance:

L'outil analytique le plus accepté pour l'étude des phénomènes de l'effondrement de

tension est la théorie de la bifurcation, qui est une théorie mathématique générale capable de classer les instabilités, d'étudier le comportement du système dans le voisinage d'effondrement ou des points instables et de donner une information quantitative sur les actions correctives pour éviter les conditions critiques[31].

Dans la théorie de la bifurcation, il est supposé que les équations du système dépendent d'un ensemble de paramètres avec des variables d'état, comme suit:

$$0 = f(x, \lambda) \quad (\text{III.1})$$

avec :

f : Équation de l'écoulement de puissance.

x : Variables dépendantes.

λ : Facteur de charge.

Alors, les propriétés de la stabilité / instabilité sont évaluées en variant "lentement" les paramètres. Dans ce mémoire, le paramètre utilisé pour étudier la proximité du système de l'effondrement de tension est le soi-disant facteur de charge $\lambda (\lambda \in \mathcal{R})$, ce qui modifie les puissances du générateur et la charge comme suit:

$$\begin{aligned} P_{G1} &= (1 + \lambda)(P_{G0} + P_S) \\ P_{L1} &= (1 + \lambda)(P_{L0} + P_D) \end{aligned} \quad (\text{III.2})$$

Avec :

P_{G0} : Puissance active du générateur

P_{L0} : Puissance active de la charge

P_S : Fourniture de l'offre (Supply bids)

P_D : Demande d'offre (Demand bids)

Les puissances qui multiplient λ sont appelées les puissances de direction. Les équations (III.2) diffèrent du modèle généralement utilisé dans l'analyse du calcul continu de l'écoulement de puissance (CPF), c'est-à-dire.

$$\begin{aligned} P_{G2} &= (P_{G0} + \lambda P_S) \\ P_{L2} &= (P_{L0} + \lambda P_D) \end{aligned} \quad (\text{III.3})$$

Où le facteur de charge touche uniquement les variables puissances P_S et P_D . Dans les diagrammes typiques de bifurcation, les tensions sont tracées en fonction de λ , c'est à dire la

mesure de la capacité de charge du système, obtenant ainsi les courbes $V(p)$.

Les indices 0, 1 et 2 dénotent le cas de base, le premier point et le deuxième point de directions des puissances respectivement.

III.3.3. Calcul Continu de l'écoulement de puissance (Continuation power flow- CPF) :

Les techniques du calcul continu de l'écoulement de puissance [31] sont largement reconnues comme un outil précieux pour déterminer les courbes $V(P)$ du système de puissance et permettent d'estimer les conditions de chargement maximal et des solutions «critiques» (par exemple, saddle-node et limites induites de points de bifurcation). Malgré que les grands systèmes nécessitent un calcul numérique exigeant, le CPF n'est pas affecté par des instabilités numériques. En fait, il est capable de déterminer la partie stable et instable des courbes $V(p)$ et peut fournir des informations supplémentaires, telles que les facteurs de sensibilité de la solution actuelle à l'égard des paramètres pertinents.

D'un point de vue mathématique, le CPF est une technique d'homotopie et permet d'explorer la stabilité des équations du système électrique en faisant varier un paramètre du système, qui, dans les études de stabilité statique et dynamique typique de tension, est le paramètre de charge λ . De manière générale, le CPF consiste en un pas prédictif réalisé par le calcul du vecteur tangent et un pas correcteur qui peut être obtenu soit par l'intermédiaire d'un paramétrage local ou à une intersection perpendiculaire.

a) Pas prédictif

Au point d'équilibre générique p , la relation suivante s'applique:

$$\text{Et le ve } f(x_p, \lambda_p) = 0 \Rightarrow \left. \frac{df}{d\lambda} \right|_p = D_x f|_p \left. \frac{dx}{d\lambda} \right|_p + \left. \frac{df}{d\lambda} \right|_p = 0 \quad (\text{III.4})$$

$$\tau_p = \left. \frac{dx}{d\lambda} \right|_p \approx \frac{\Delta x_p}{\Delta \lambda_p} \quad (\text{III.5})$$

À partir de l'équation (III.4) et (III.5) on a:

$$\begin{aligned} \tau_p &= -D_x f|_p^{-1} \left. \frac{\partial f}{\partial \lambda} \right|_p \\ \Delta x_p &= \tau_p \Delta \lambda_p \end{aligned} \quad (\text{III.6})$$

À ce point un pas de grandeur k de contrôle doit être choisi pour déterminer la quantité Δx_p

et $\Delta\lambda_p$, avec une normalisation afin d'éviter de grands pas quand $\|\tau_p\|$ est grand.

$$\Delta\lambda_p \triangleq \frac{k}{\|\tau_p\|} \Delta x_p \triangleq \frac{k \tau_p}{\|\tau_p\|} \quad (\text{III.7})$$

Où $\|\cdot\|$ est la norme euclidienne et $k = \pm 1$. Le signe de k détermine l'augmentation ou la diminution de λ . La figure (III.4) présente une représentation graphique du pas prédicteur.

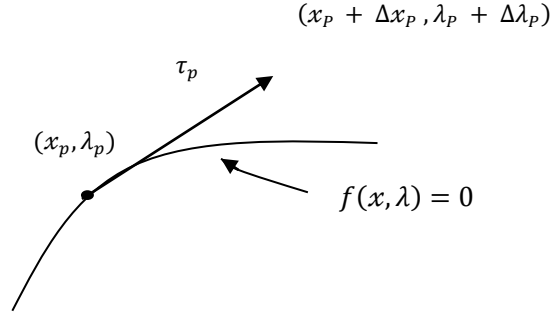


Figure III.4: Calcul continu de l'écoulement de puissance:
pas prédicteur obtenu par les moyens de la tangente

b) Pas correcteur

Pour le pas correcteur, l'ensemble des équations $n+1$ est résolu:

$$\begin{aligned} f(x, \lambda) &= 0 \\ \eta(x, \lambda) &= 0 \end{aligned} \quad (\text{III.8})$$

Où la solution de f doit être dans le collecteur de bifurcation et η est une équation additionnelle pour garantir un ensemble non singulier au point de bifurcation. Pour le choix de η il y'a deux options: l'intersection perpendiculaire et la paramétrisation locale.

Dans le cas de l'intersection perpendiculaire, dont la représentation est donnée par la figure (III.5), l'expression de η devient (équation III.9):

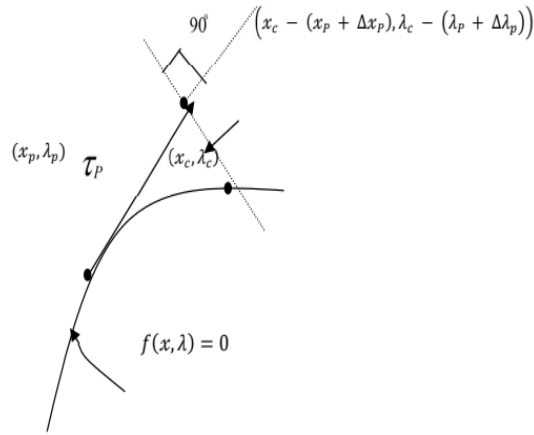


Figure III.5: Calcul continu de l'écoulement de puissance : pas correcteur

$$\eta(x, \lambda) = \begin{bmatrix} \Delta x_p \\ \Delta \lambda_p \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} x_c - (x_p + \Delta x_p) \\ \lambda_c - (\lambda_p + \Delta \lambda_p) \end{bmatrix} = 0 \quad (\text{III.9})$$

Tandis que pour la paramétrisation locale, soit, le paramètre λ soit la variable x_i est forcée d'être une valeur fixe.

$$\eta(x, \lambda) = \lambda_c - \lambda_p - \Delta \lambda_p \quad (\text{III.10})$$

Où

$$\eta(x, \lambda) = x_{ci} - x_{pi} - \Delta x_{pi} \quad (\text{III.11})$$

Le choix pour que la variable soit fixe dépend du collecteur de bifurcation de f , comme c'est présenté à la figure (III.6).

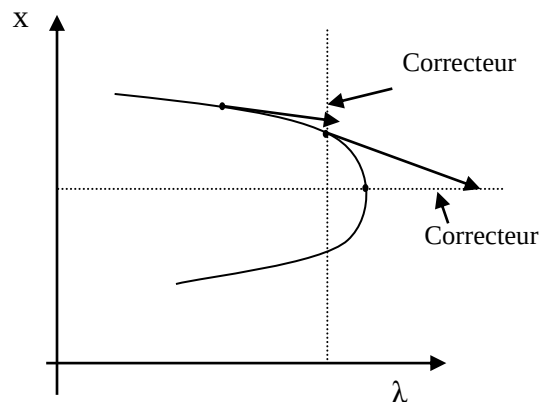


Figure III.6: Calcul continu de l'écoulement de puissance: pas correcteur obtenu par les moyens de la paramétrisation locale

III.4. Simulation relatives au réseau standard IEEE 39 nœuds :

III.4.1. Présentation du réseau :

Le réseau test IEEE 39-nœuds, est un réseau de transport standard IEEE New England 39 nœuds sera utilisé pour les différents scénarios de nos simulations. Ce réseau représente une simplification du réseau de transport de la région Nouvelle Angleterre (nord-est des Etats-Unis).

Il s'agit donc d'une part d'un réseau réel américain. Ce réseau fonctionne à 100 kV et comporte 10 générateurs ($P_{G_{totale}} = 6.19$ Gw, $Q_{G_{totale}} = 1.13$ Gvar) et 39 nœuds dont 19 nœuds de charge et 48 lignes. Un schéma complet de ce réseau est présenté par la figure III.7) [36].

Les données des jeux de barres ainsi que les caractéristiques des branches sont indiquées dans l'annexe A1.

Le réseau de transport IEEE-39 nœuds est constitué de 3 régions (figure III.8). Chaque région contient des nœuds PV et des nœuds PQ ainsi des générateurs synchrones.

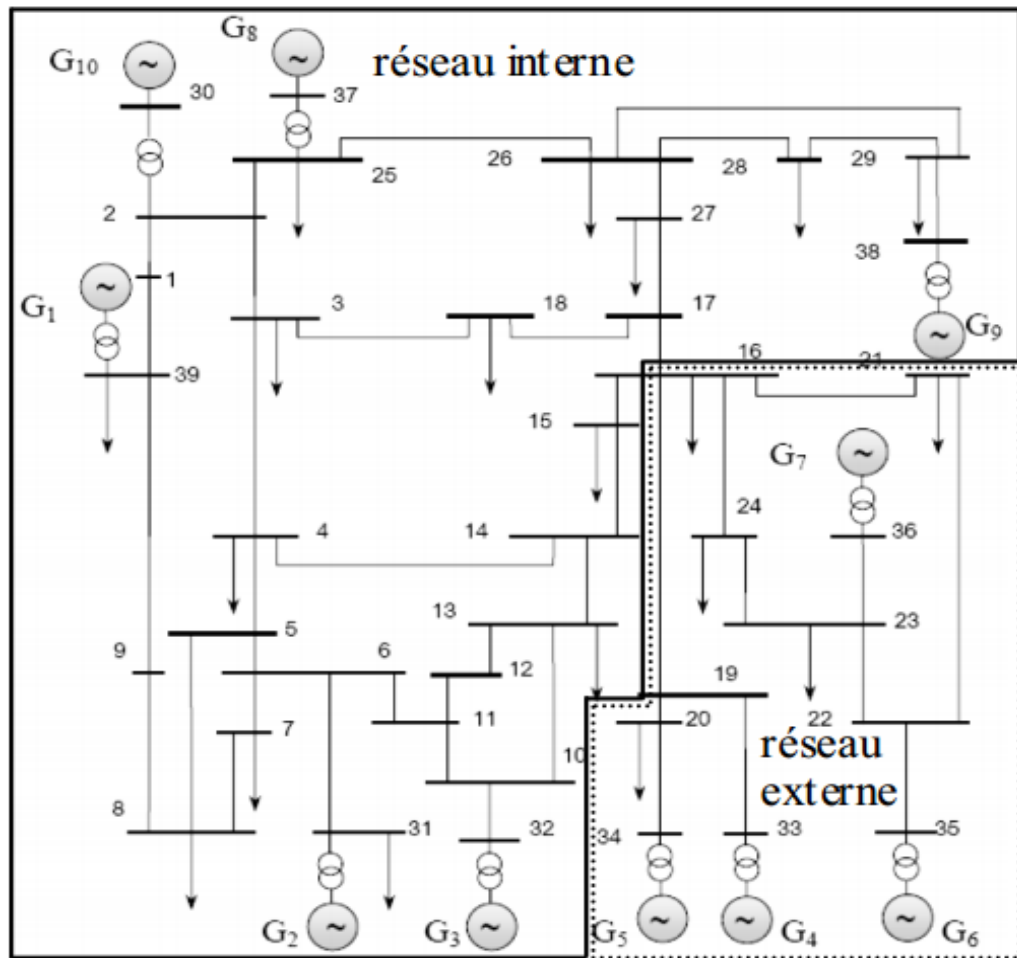


Figure III.7 : Le réseau test IEEE 39-nœuds

En utilisant la technique du CPF, la stabilité de tension est étudiée. Le comportement du système test considéré avec et sans le FACTS et le photovoltaïque sous différentes conditions de charge est étudié. L'emplacement du FACTS et le photovoltaïque est déterminé à travers le CPF.

Un modèle classique PQ est utilisé pour les charges. Les limites des générateurs sont ignorées. L'analyse de la stabilité de tension est effectuée en commençant à partir d'un point de fonctionnement stable initiale et en augmentant ensuite les charges par le facteur λ jusqu'à atteindre le point de singularité de la linéarisation de l'écoulement de puissance.

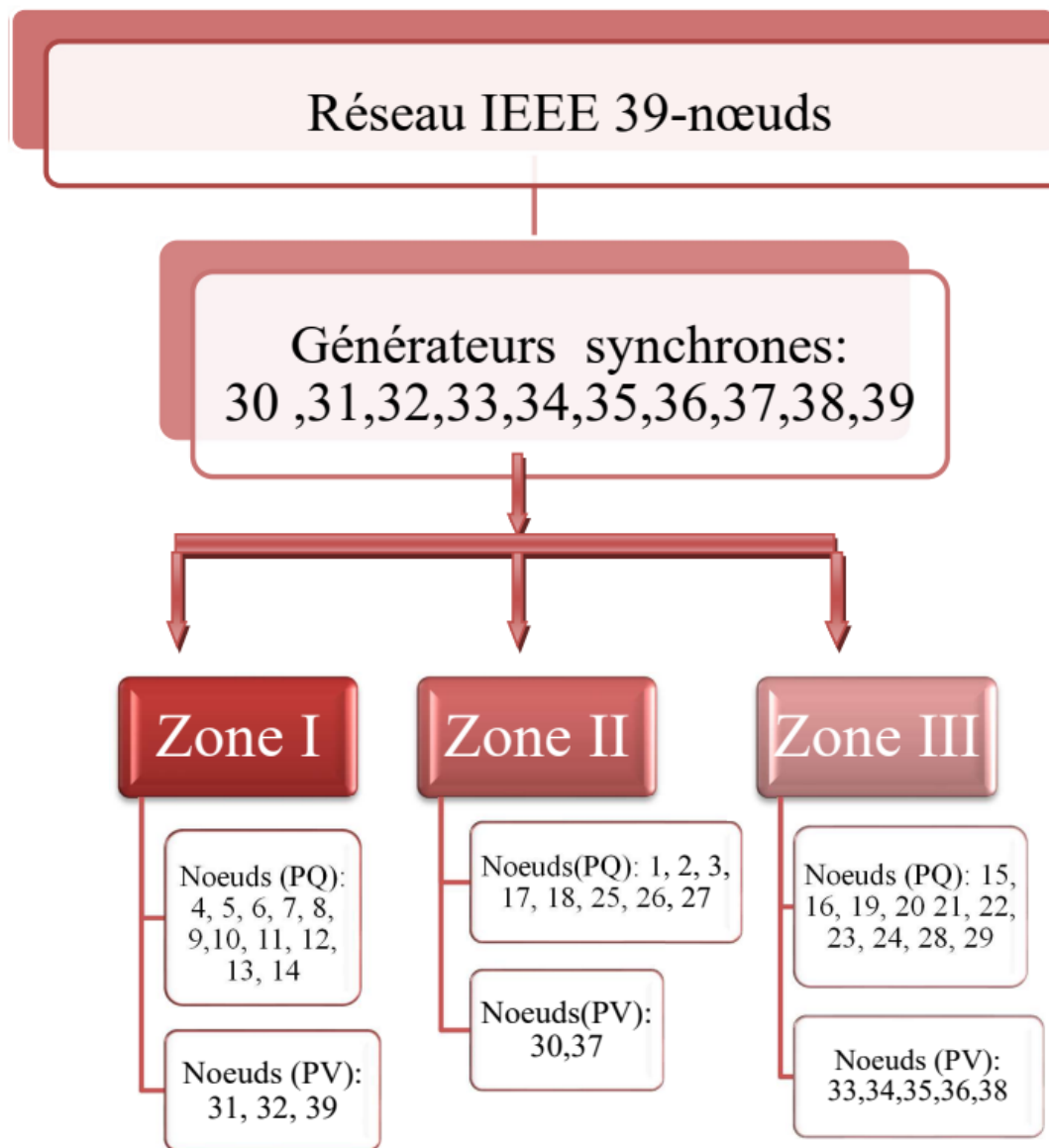


Figure III.8 :La structure du réseau test IEEE 39-nœuds

III.5.Emplacement du STATCOM

Le profil de la tension à l'état de base ainsi la présentation des nœuds fragiles et leurs courbes $V(p)$ obtenues par la méthode du CPF sont illustrés respectivement aux figures (III.9, III.10, III.11, III.12 et III.13).

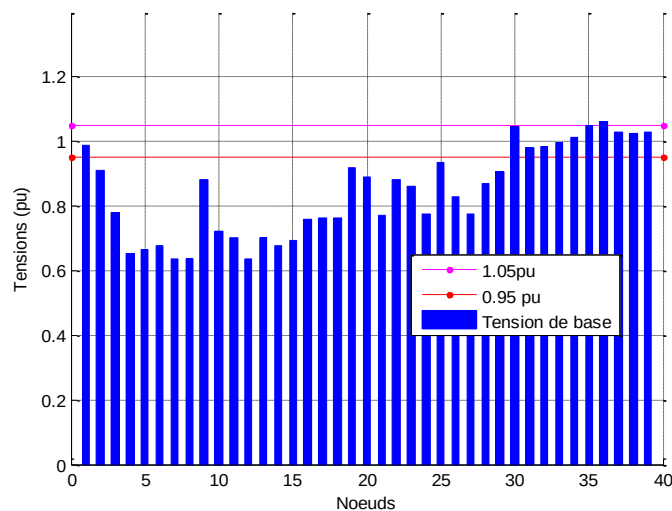


Figure III.9: Profil des tensions du réseau IEEE 39-nœuds

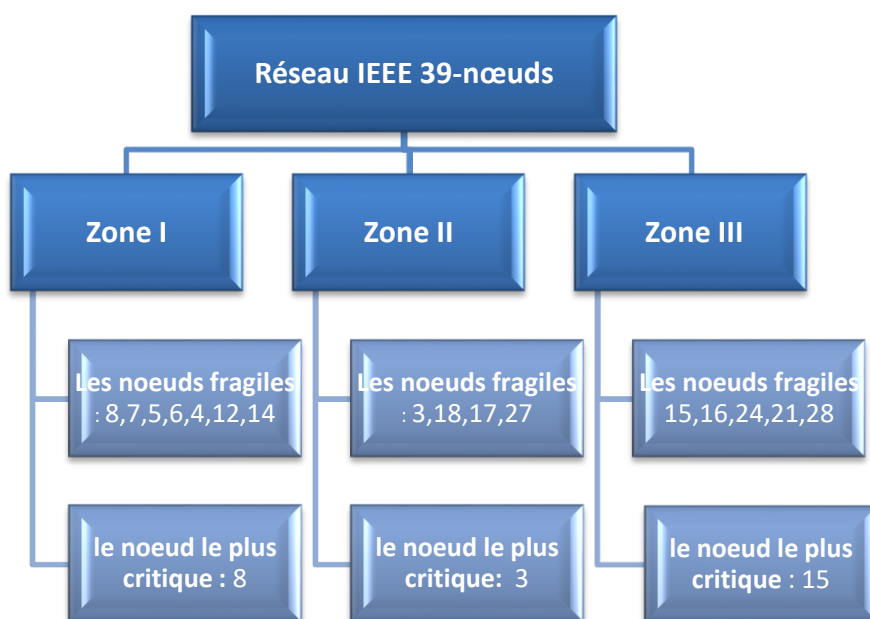


Figure III.10 : Présentation des nœuds fragiles de chaque zone

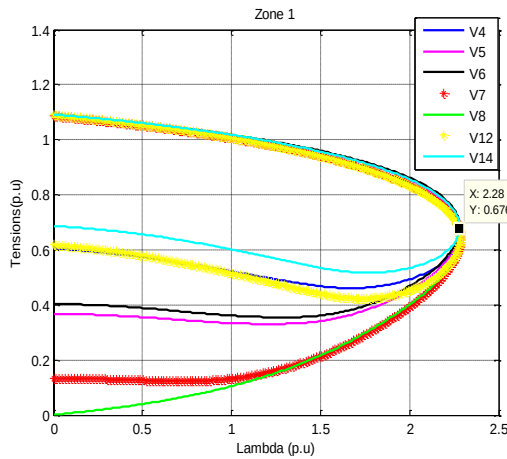


Figure III.11: Courbe V(P) de la zone 1 du système (état de base)

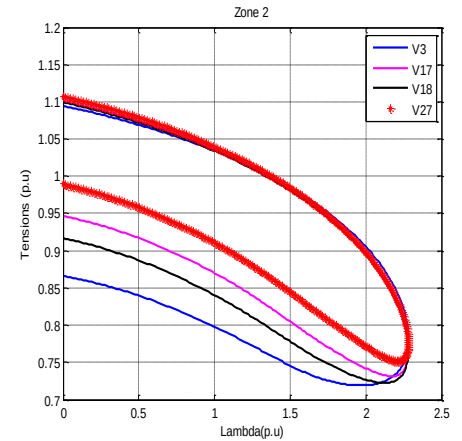


Figure III.12: Courbe V(P) de la zone 2 du système (état de base)

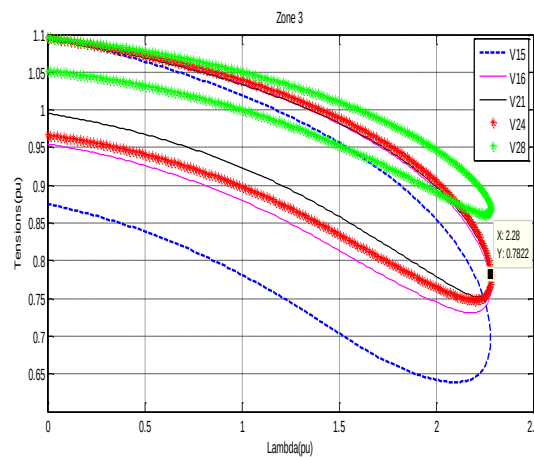


Figure III.13: Courbe V(P) de la zone 3 du système (état de base)

III.5.1. Impact du STATCOM :

Dans les travaux réalisés à la référence [18], l'emplacement du FACTS choisis le STATCOM a été déterminé par son implantation sur le nœud de charge le plus fragile.

Dans le cadre de notre mémoire de fin d'études, notre objectif est d'insérer un système photovoltaïque dans le réseau IEEE 39. Les résultats des travaux présentés dans la référence [18], concernant l'intégration de STATCOM dans le réseau cité, nous ont permis de constater que le nœud fragile de ce réseau est le nœud 15, les résultats obtenus des courbes V(p) ainsi les profils des tensions et les pertes de puissances actives et réactives sont montrés sur les figures

III.14 et III.15 respectivement [18].

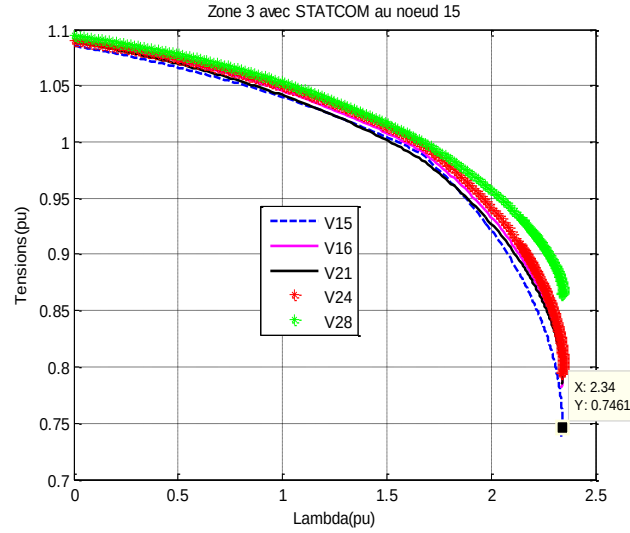


Figure III.14: Courbe V(P) avec STATCOM au nœud 15

Il est évident à partir de cette figure que le STATCOM améliore le paramètre de charge au point d'effondrement de tension ($\lambda = 2.34 \text{ p.u.}$) comparé à l'état de base ($\lambda = 2.28 \text{ p.u.}$). Cela est dû au fait que le STATCOM est installé au nœud le plus faible.

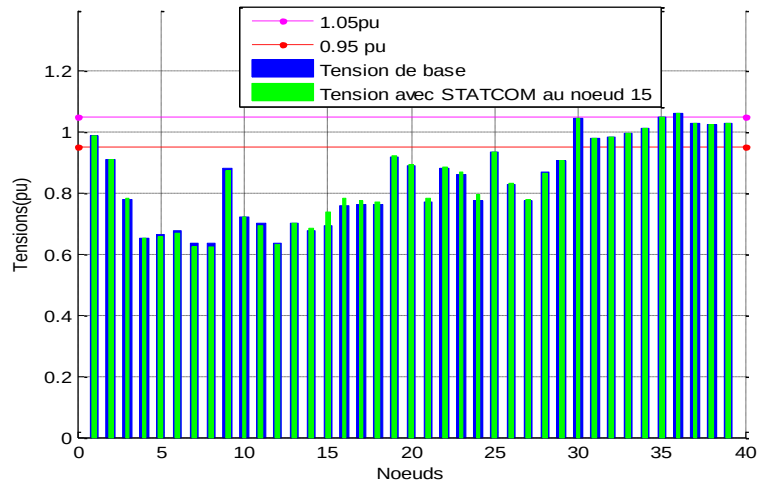


Figure III.15: Profils des tensions du système avec STATCOM au nœud 15

Les profils des pertes de puissance actives et réactives sont montrés sur les figures

(III.16) et la figure (III.17) respectivement. L'augmentation des pertes au voisinage du point d'effondrement est faible dans le cas du STATCOM placé au nœud 15.

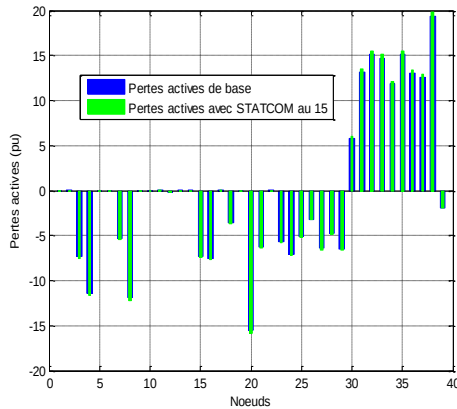


Figure III.16: Profils de pertes de puissance actives avec STATCOM au nœud 15

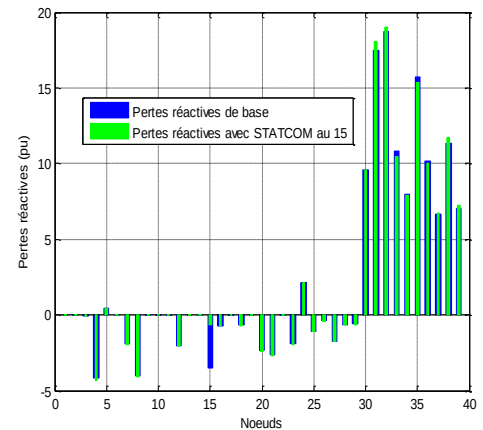


Figure III.17: Profils de pertes de puissance réactives avec STATCOM au nœud 15

III.6. Emplacement du SPQ:

Le SPQ (Système Photovoltaïque) est une source d'énergie renouvelable injectant de la puissance active-réactive dans le réseau. Lorsqu'il est correctement intégré, il peut également participer au soutien de la tension.

L'organigramme de la stabilité de tension avec le SPQ en utilisant la méthode CPF est illustré par la figure (III.18).

D'après la figure (III.18), on peut observer que les équations du dispositif SPQ sont ajoutées aux équations de l'écoulement de puissance. Les nouvelles équations de l'écoulement de puissance sont ensuite utilisées dans le pas correcteur du processus CPF.

Pour trouver la position appropriée du SPQ, nous nous sommes appuyés sur l'étude des nœuds fragiles, nous avons donc choisi les nœuds suivants: nœud 3 (zone 2), nœud 8 (zone 1) et nœud 18 (zone 2).

III.6.1. SPQ sur le nœud 3 :

Lorsque le SPQ est connecté au nœud 3, on observe une amélioration notable du facteur de charge maximal $\lambda = 2.31$ p.u. ainsi qu'un renforcement du profil de tension au niveau du réseau Figure (III.19).

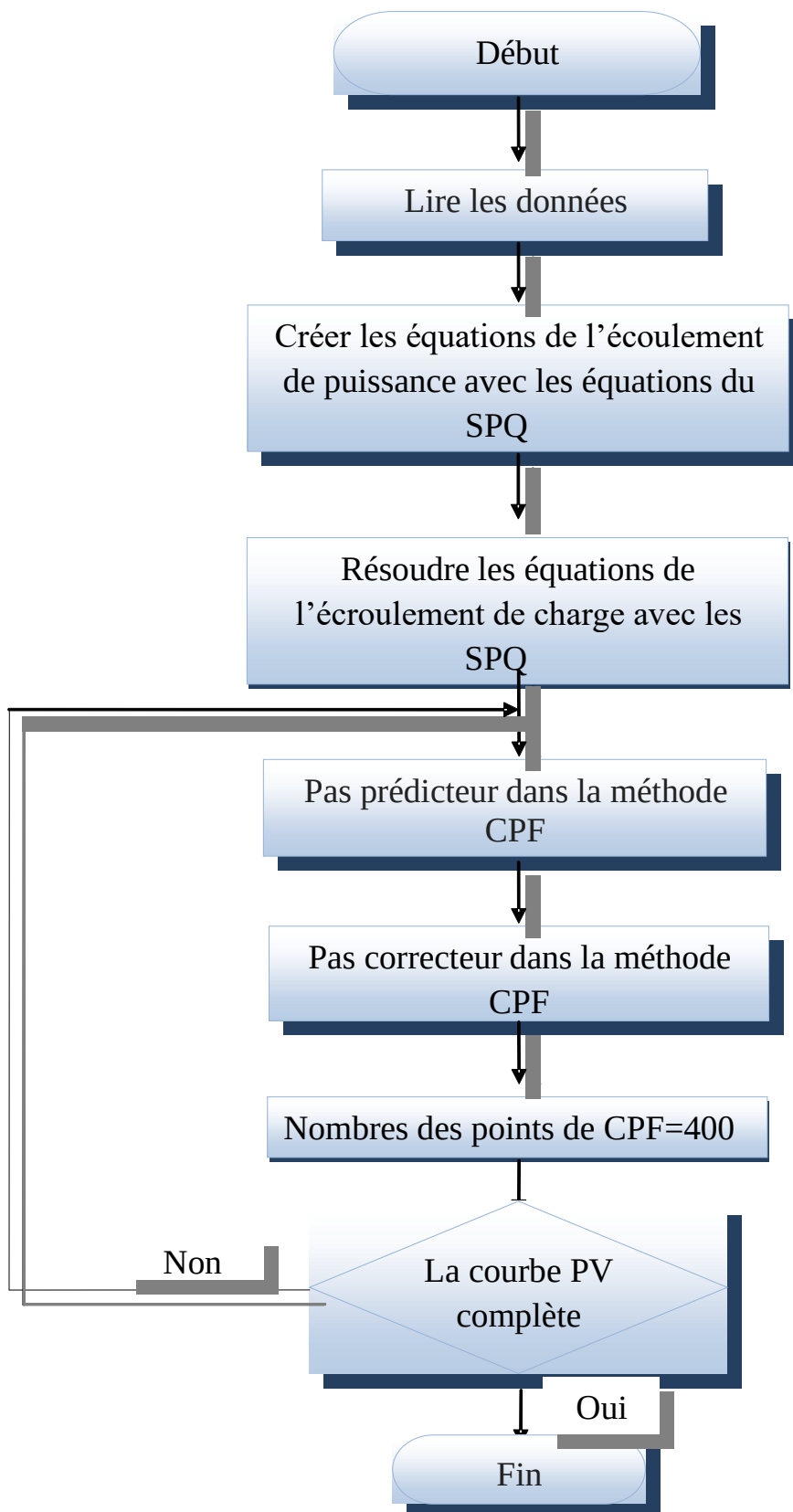


Figure III.18 :Organigramme du processus CPF avec le SPQ

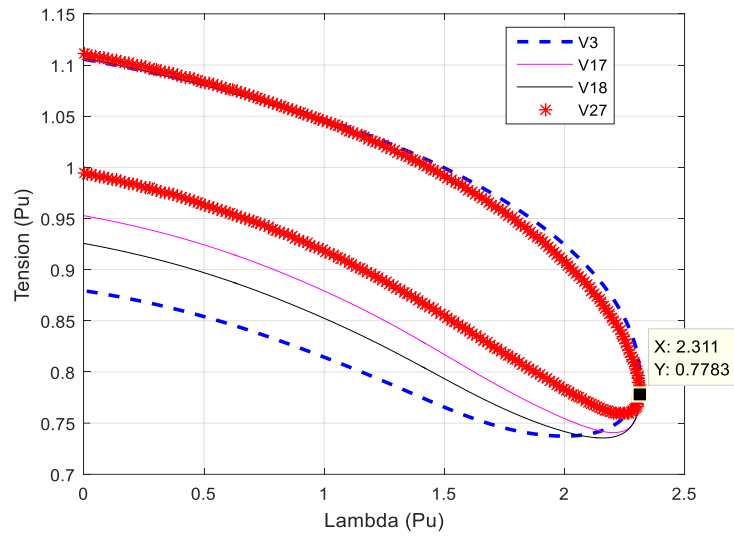


Figure III.19: Courbe $V(P)$ avec SPQ au nœud 3

III.6.1.1. Profils des tensions et les pertes de puissances dans le système :

Les profils des tensions du cas de base et du système avec SPQ sur le nœud 3 sont illustrés à la figure (III.20) ainsi les profils des pertes actives et réactives sont donnés par les Figures (III.21) et (III.22) .

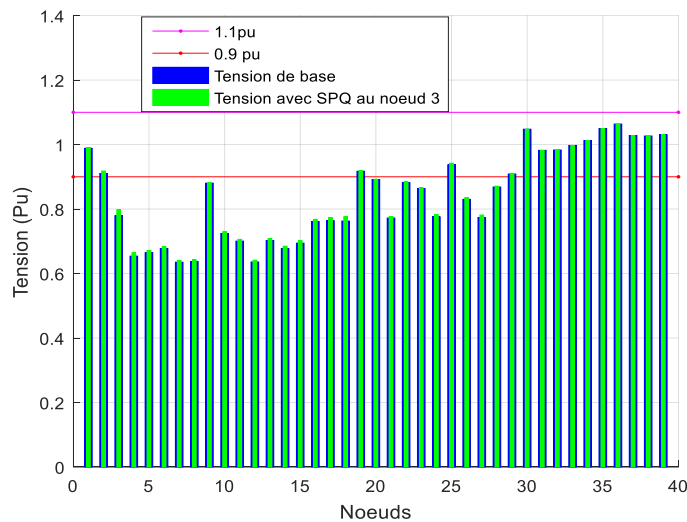


Figure III.20: Profils des tensions du système avec SPQ au nœud 3

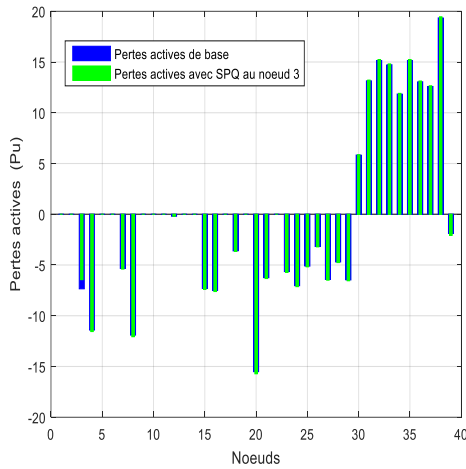


Figure III.21 : Profils de pertes de puissance actives avec SPQ au nœud 3

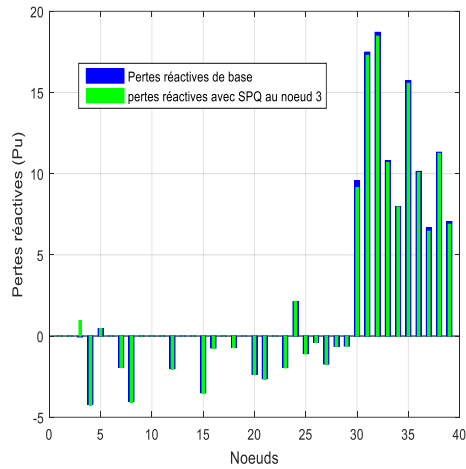


Figure III.22 : Profils de pertes de puissance réactives avec SPQ au nœud 3

La figure (III.23) illustre le paramètre de charge pour différents emplacements du SPQ sur les nœuds les plus critiques des 3 zones selon les courbes $V(p)$ des figures (III.11, III.12 et III.13).

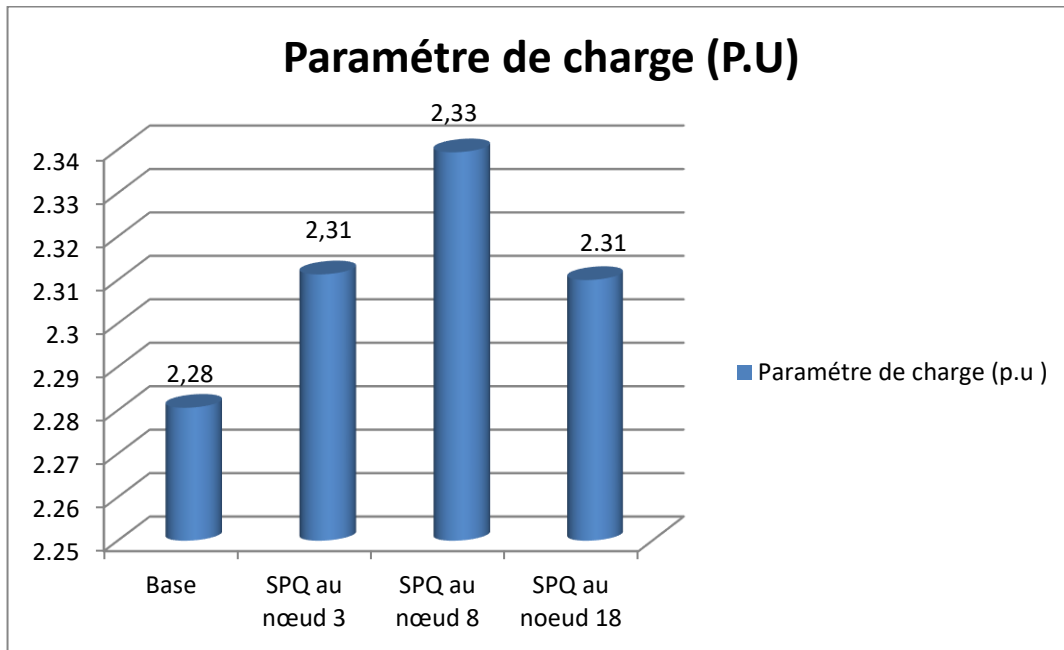


Figure III.23: Maximum du facteur de charge avec SPQ [Extrait de l'annexe: B3, B4, B5]

III.6.2. SPQ nœud 8 :

L'intégration du SPQ au nœud 8 permet une nette amélioration de la stabilité du réseau, avec un facteur de charge maximal de $\lambda_{\text{max}} = 2.337$ (p.u), Figure (III.24).

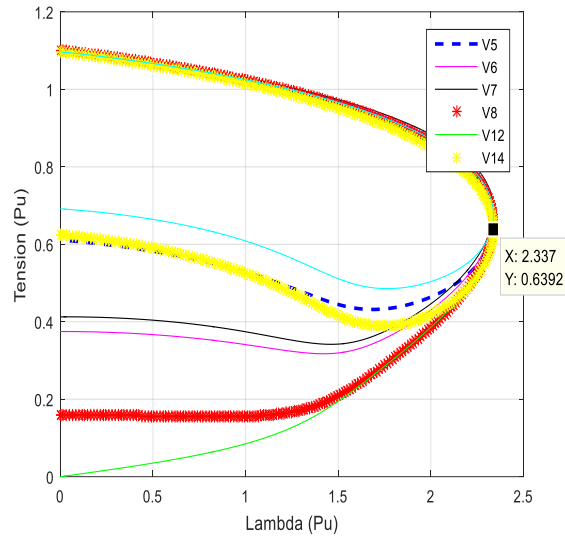


Figure III.24: Courbe V(P) avec SPQ au nœud 8

III.6.2.1. Profils des tensions et les pertes de puissances dans le système :

La figure (III.25) illustre les profils de tension pour le cas de base ainsi que pour le système équipé d'un SPQ au nœud 8. Il est évident à partir de cette figure que le SPQ n'a pas fourni un meilleur profil de tension au point d'effondrement de tension comparé à l'état de base.

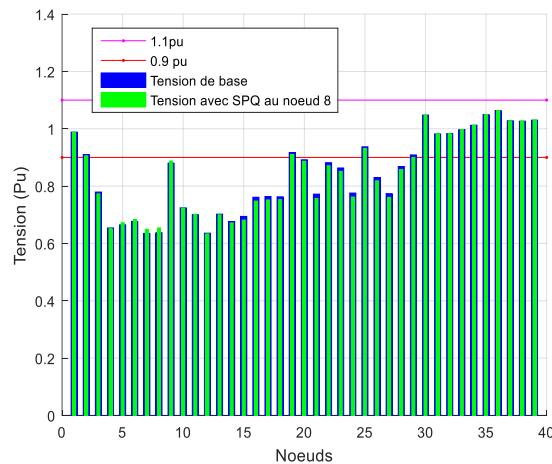


Figure III.25: Profils des tensions du système avec SPQ au nœud 8

Les profils des pertes de puissance actives et réactives sont montrés sur la figure (III.26) et la figure (III.27) respectivement. L'augmentation des pertes au voisinage du point d'effondrement est constaté dans le cas du SPQ placé au nœud 8.

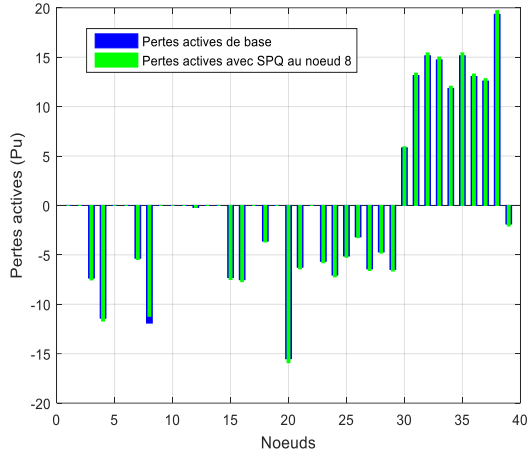


Figure III.26: Profils de pertes de puissance actives avec SPQ au nœud 8

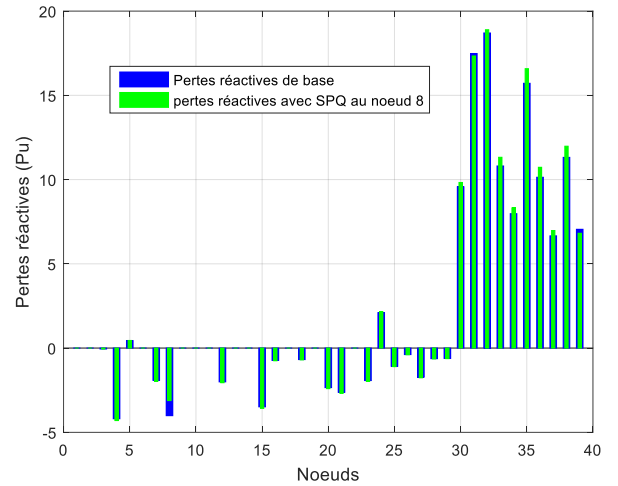


Figure III.27 : Profils de pertes de puissance réactives avec SPQ au nœud 8

III.6.3.SPQ au nœud 18 :

Lorsque le SPQ est connecté au nœud 18, le facteur de charge maximal atteint $\lambda_{\max} = 2.31(\text{p.u.})$, indiquant une amélioration modérée de la stabilité du réseau grâce à l'injection de puissance active en ce point. Figure (III.28)

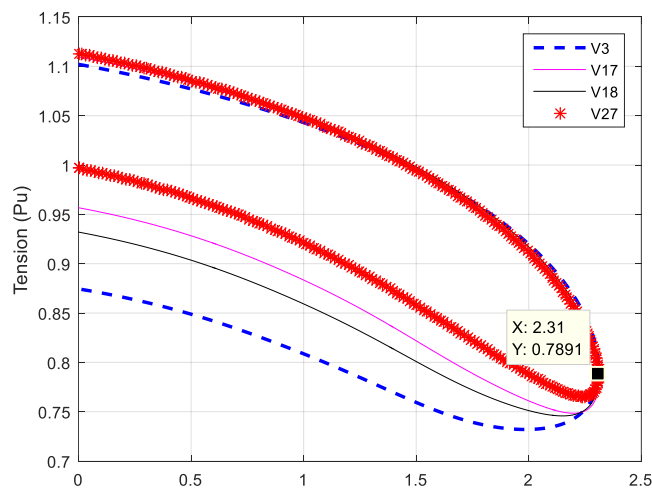


Figure III.28: Courbe V(P) avec SPQ au nœud18

III.6.3.1.Profils des tensions et les pertes de puissances dans le système :

Les profils des tensions du cas de base et du système avec le SPQ sont illustrés à la figure (III.29) ainsi les profils des pertes de puissance actives et réactives sont montrés à la figure (III.30) et la figure (III.31)respectivement.

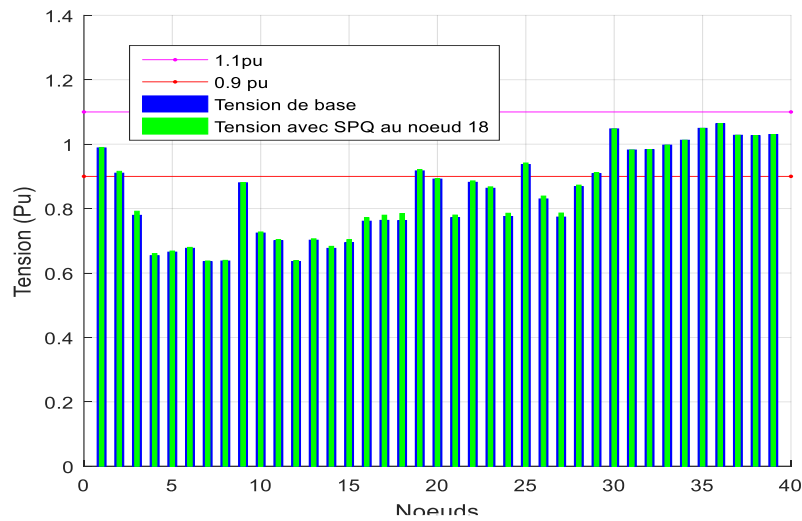


Figure III.29: Profils des tensions du système avec SPQ au nœud 18

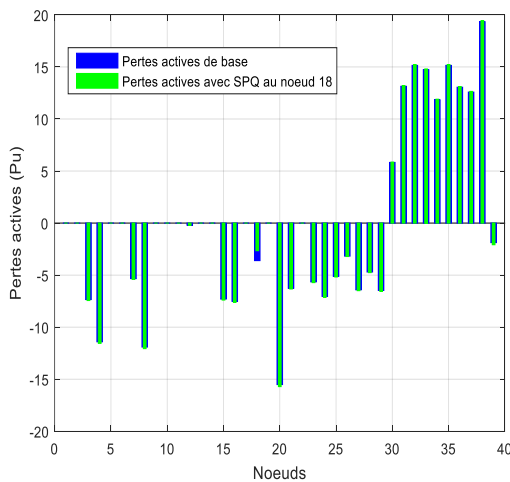


Figure III.30: Profils de pertes de puissance actives avec SPQ au nœud 18

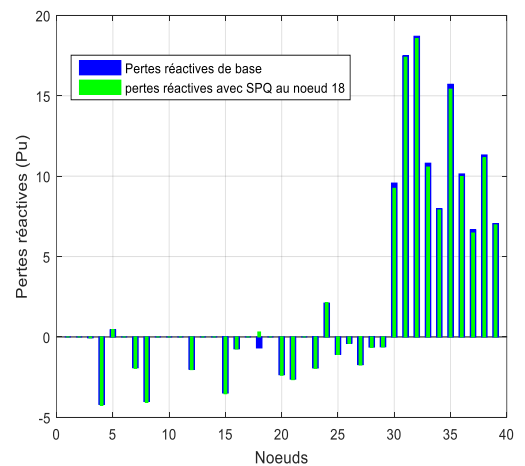


Figure III.31: Profils de pertes de puissance réactives avec SPQ au nœud 18

III.6.4.Synthèse :

Les différents emplacements du SPQ présentés pour le réseau de transport IEEE 39 nœuds possèdent tous leurs propres avantages et désavantages. Les figures (III.32) et (III.33) synthétisent les différents emplacements du SPQ en qualité de pertes actives, réactives et tensions.

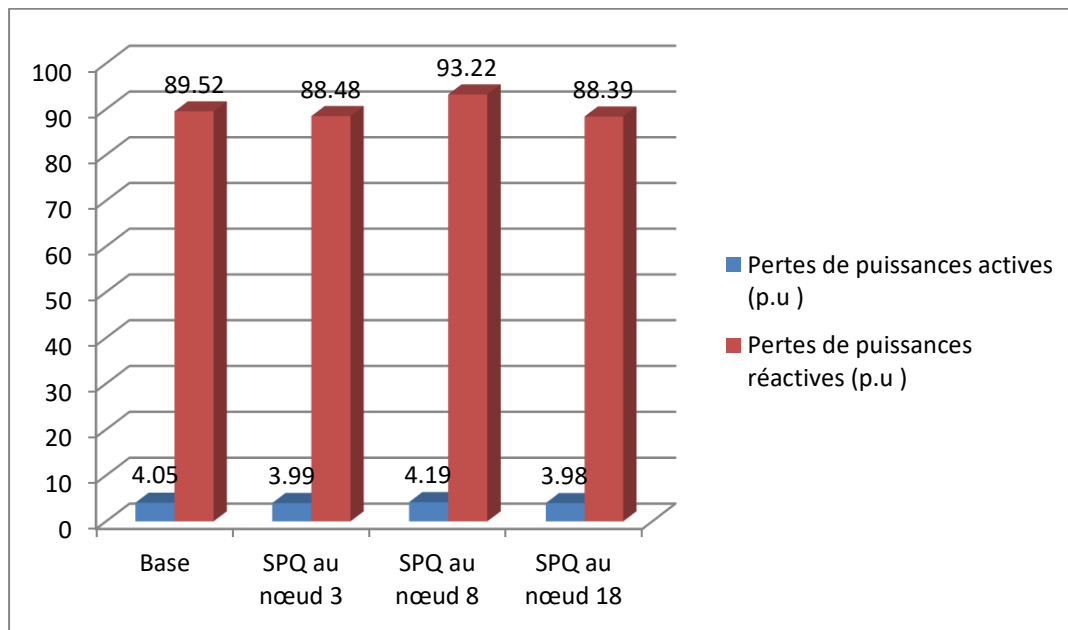


Figure III.32: Pertes de puissances actives et réactives totales pour les différents emplacements du SPQ [Extrait de l'annexe: B3, B4, B5].

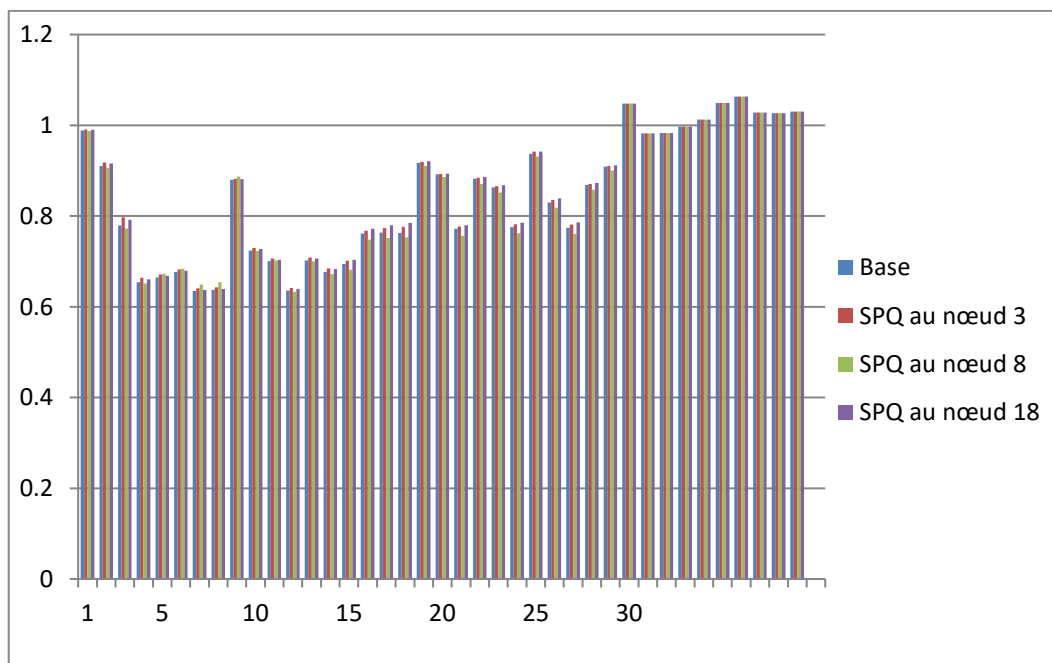


Figure III.33: Rapport global des tensions pour les différents emplacements du SPQ [Extrait de l'annexe: B3, B4, B5]

III.7. Système hybride STATCOM + SPQ :

L'intégration simultanée du STATCOM et du SPQ dans le réseau vise à combiner les avantages respectifs de ces deux technologies: d'une part, la régulation rapide de la tension et l'injection de puissance réactive du STATCOM, et d'autre part, la contribution active en puissance ainsi qu'une certaine souplesse de fonctionnement offerte par le SPQ. Le système hybride STATCOM + SPQ est conçu pour agir de manière coordonnée afin de maximiser la marge de stabilité de tension, tout en minimisant les pertes dans le réseau.

Dans ce cadre, le SPQ est installé sur le nœud 8, identifié précédemment comme l'un des plus critiques, tandis que le STATCOM est placé sur le nœud 15. Cette configuration permet de bénéficier d'un double effet: un soutien local en puissance active et réactive au niveau du nœud 8, et un renforcement supplémentaire de la stabilité grâce à l'action rapide du STATCOM au nœud 15. Les courbes V(P) issues des simulations montrent une amélioration notable de la capacité de charge maximale du système, traduite par une augmentation du facteur $\lambda = 2.3779 \text{ p.u.}$, et un meilleur profil de tension sur l'ensemble du réseau.

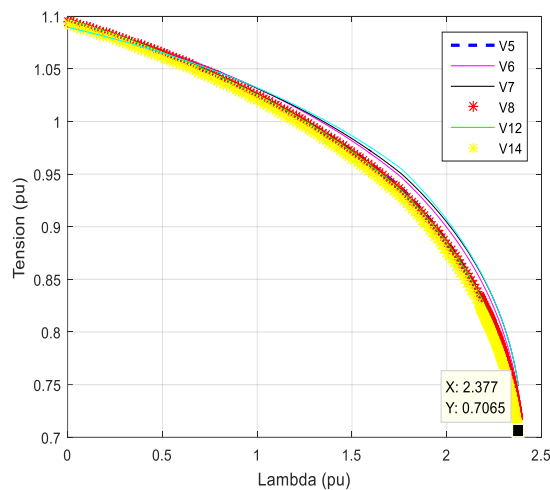


Figure III.34: Courbe V(P) de la zone 1 avec SPQ et STATCOM

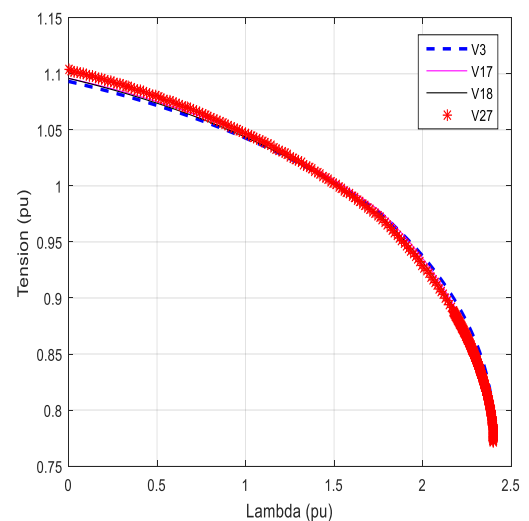


Figure III.35: Courbe V(P) de la zone 2 avec SPQ et STATCOM

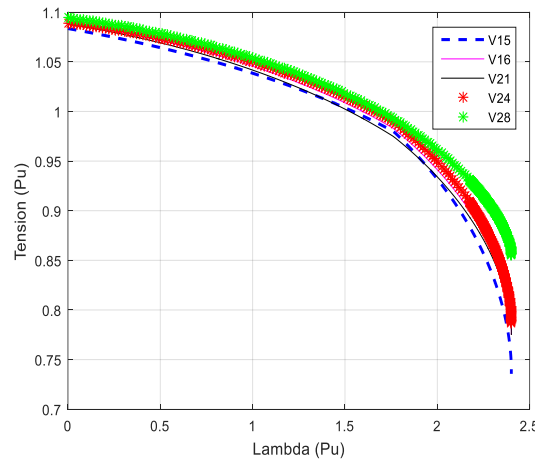


Figure III.36: Courbe V(P) de la zone 3 avec SPQ et STATCOM

III.7.1. Profils des tensions et les pertes de puissances dans le système :

Les figures III.37, III.38 et III.39 montrent respectivement les profils de tension et des pertes actives et réactives (cas de base et cas avec STATCOM et SPQ).

Les résultats de simulation montrent une amélioration des profils des tensions ainsi ne diminution significative des pertes de puissances réactives, confirmant l'efficacité du couplage des deux dispositifs. Ce système hybride s'avère donc particulièrement pertinent dans le contexte des réseaux modernes, caractérisés par une forte variabilité des charges et une intégration croissante des sources renouvelables.

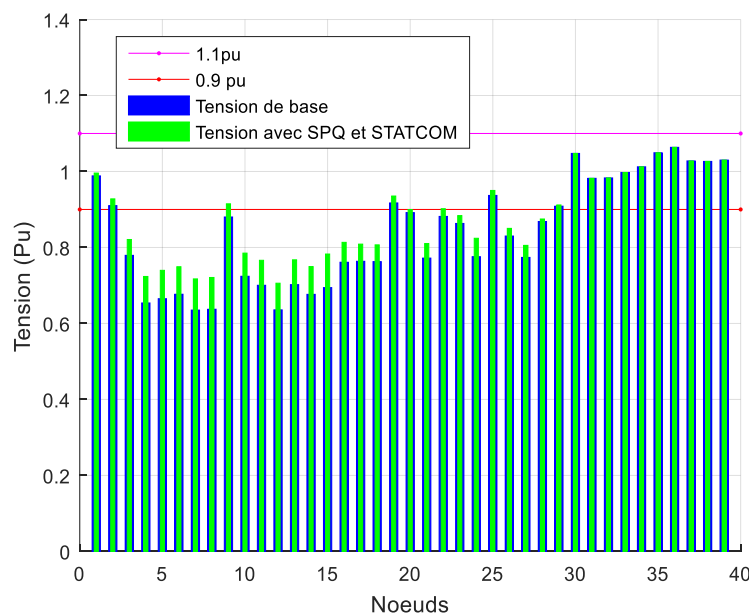


Figure III.37: Profils des tensions du système avec SPQ et STATCOM

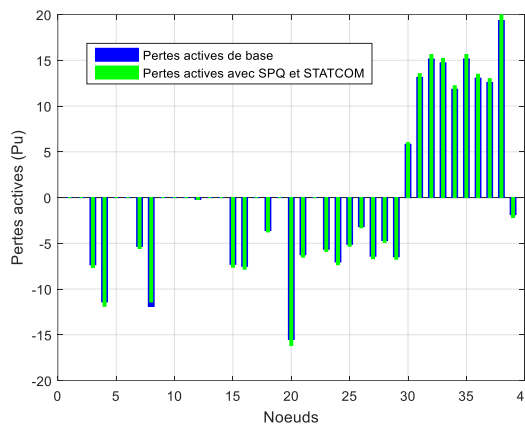


Figure III.38: Profils de pertes de puissance actives avec SPQ et STATCOM

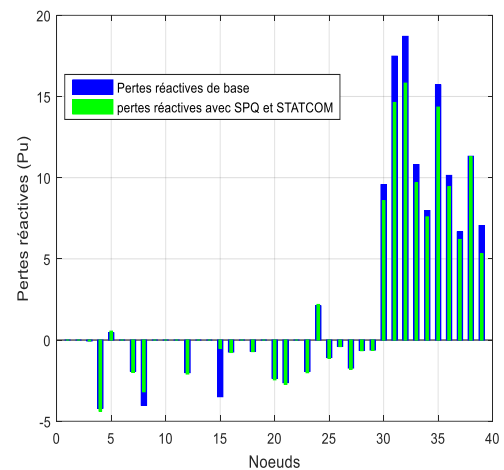


Figure III.39: Profils de pertes de puissance réactives avec SPQ et STATCOM

III.8. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre une étude de l'amélioration de l'efficacité des Réseaux Electriques par l'Optimisation del'intégration des énergies renouvelables le photovoltaïque et les systèmes FACTS le STATCOM. Le réseau utilisé pour les simulations est le réseau réel de transport IEEE_39 nœuds. L'analyse des performances du réseau porte sur le support du profil de tension, l'augmentation de la stabilité en tension et la diminutiondes pertes actives et réactives et ce, pour l'effondrement de tension. Le programme utilisé est un logiciel de calcul d'écoulement de puissance (PF) et le calcul continu de l'écoulement de puissance (CPF) le PSAT.

L'un des défis des énergies renouvelables «En.R»telles que le solaire ou l'éolien réside dans le risque d'interruption de leur production dont la stabilité est menacée par leur caractère aléatoire.

Les systèmes FACTS«Flexible AC Transmission Systems» apportent une solution à ce problème de capacité et de stabilité du réseau, le quell intègreune part croissante d'énergie renouvelable.

Cependant, et pour des considerations économiques, l'emplacement des En.R et des FATCS dans un réseau devra être optimisé.

Les tests effectués ont montré plusieurs résultats intéressants. Tout d'abord, le système photovoltaïque et le système FACTS shunt (le STATCOM) assure une stabilisation globale du réseau. En effet, dans tous les cas, les deux systèmes tendent soit à stabiliser tous les nœuds, soit en à stabiliser certains, sans affecter les autres. En tout état de cause, ces systèmes n'ont jamais déstabilisé un nœud quel qu'il soit. En fait, le photovoltaïque et le STATCOM améliorent les performances du réseau électrique (surtout en termes de stabilité et de soutien de tension) en fournissant de la puissance réactive dans la zone de charge.

Les résultats obtenus pour la stabilité de tension restent valables pour le support du profil de tension. On peut, toutefois, noter que la stabilité d'un nœud ne dépend pas uniquement de son niveau de tension, c'est-à-dire qu'un nœud à tension élevée peut malgré tout être instable.

Grâce à l'insertion de ces deux systèmes En.RetFACTS, on pourra, suivant les cas, éviter un effondrement de tension du réseau. Les deux technologies ont donc un apport bénéfique en termes de sécurité et efficacité du réseau électrique.

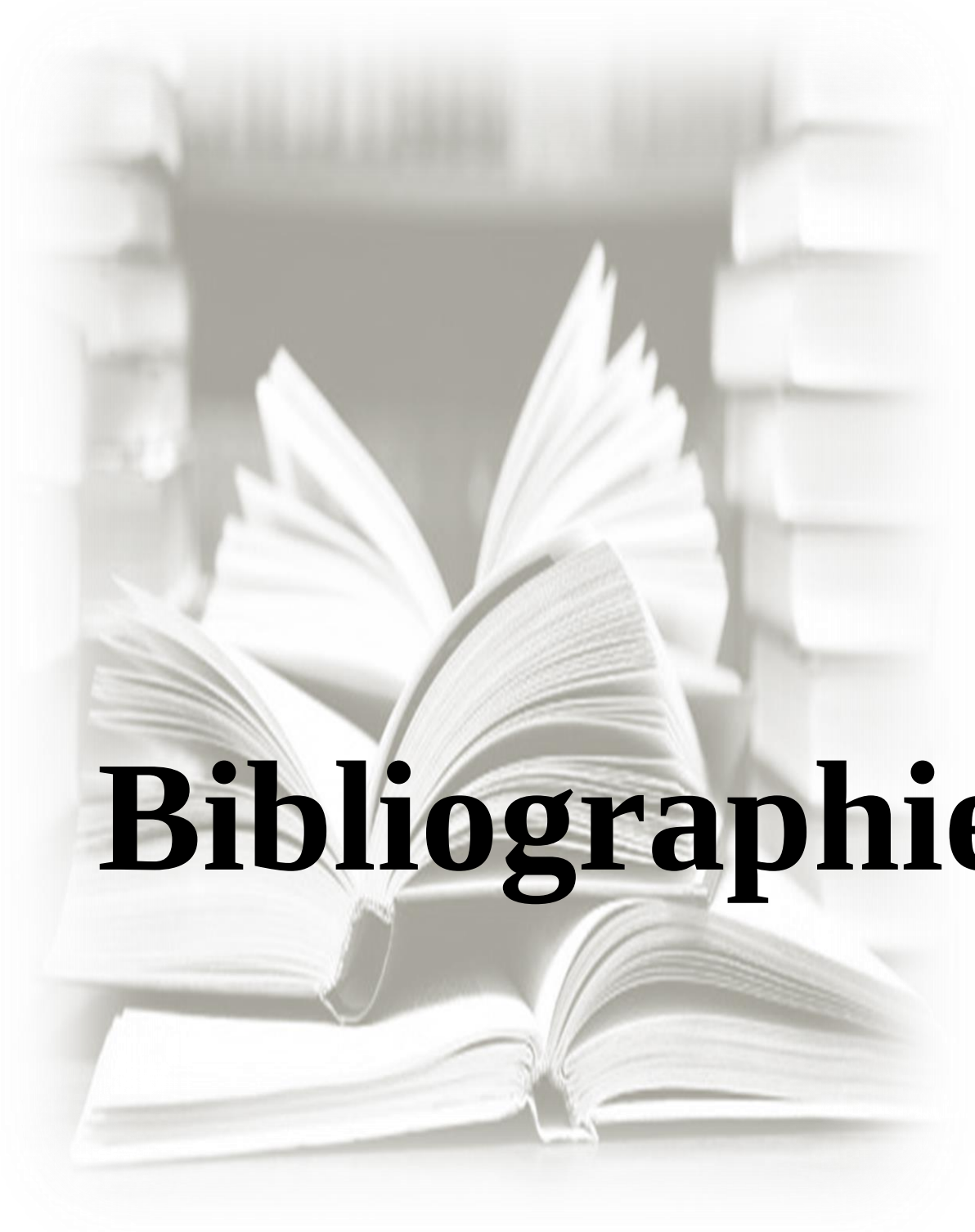
Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

L'étude menée a mis en évidence l'importance stratégique d'une intégration coordonnée des énergies renouvelables, notamment le photovoltaïque, et les dispositifs FACTS, tels que le STATCOM, dans les réseaux électriques modernes. À travers l'analyse du réseau IEEE à 39 nœuds, les simulations réalisées sous l'environnement PSAT ont démontré que l'injection de sources photovoltaïques, couplée à la régulation dynamique apportée par le STATCOM, permet non seulement d'améliorer la stabilité de tension mais aussi de réduire sensiblement les pertes actives et réactives, contribuant ainsi à une meilleure efficacité énergétique du système. Le PSAT s'est révélé être un outil performant pour modéliser ces interactions complexes, en tenant compte des comportements dynamiques du réseau. Cette approche hybride se présente comme une solution particulièrement prometteuse pour accompagner la transition énergétique vers un mix plus vert, tout en assurant la fiabilité et la résilience des réseaux électriques face aux fluctuations inhérentes aux énergies renouvelables.

Dans cette optique, plusieurs perspectives peuvent être envisagées. D'une part, l'optimisation des paramètres de commande des dispositifs FACTS via des techniques d'intelligence artificielle, telles que les algorithmes génétiques ou les réseaux de neurones, pourrait permettre une adaptation en temps réel aux variations de charge et de production.

D'autre part, l'élargissement de l'étude à des scénarios multi-énergies, intégrant l'éolien, le stockage par batteries, ou encore l'hydrogène, offrirait une vision plus globale de la gestion énergétique décentralisée. Enfin, l'intégration de ces modèles dans des plateformes de simulation temps réel permettrait de tester leur robustesse dans un environnement proche des conditions opérationnelles, en vue d'une application concrète dans les futurs réseaux intelligents (smart grids). Ces perspectives ouvrent la voie à une planification plus durable et intelligente des infrastructures électriques, répondant aux enjeux environnementaux.



Bibliographie

- [1] Site d'internet : <http://www.futura-sciences.com/>
- [2] FEDDAOUI Omar, «Contribution à l'Etude des Systèmes Hybrides de Génération, Application aux Energies Renouvelables», Mémoire de magister, Université Mohamed Chérif Messaadia de Souk-Ahras, 2014.
- [3] CHAROUAT Ahmed, BOULAKHRAS Morsli, «Etude et calcul du rendement d'un capteur solaire plan à air», Mémoire de Master, Université IBN-KHALDOUN de TIARET, 2017.
- [4] JULIEN Fosse- Président Centre INRAE Hauts-de-France – par le CPE de l'Académie des sciences le 20 mars 2023.
- [5] HORRI Rabah, HEMAID Khaled, «Étude et modélisation d'un système photovoltaïque d'une pompe immergée», Mémoire de Master, Université ibn khaldoun de TIARET, 2020.
- [6] ERIN Neave, «Production d'électricité et de chaleur à partir de la biomasse», Un guide pour les communautés rurales au Canada, Réseau canadien de forêts modèles, 2013.
- [7] DHAKE Rabbes, «Energie renouvelables», 2023.
- [8] CELSO Penche, Petite hydroélectricité, « Guide technique pour la réalisation de projet», Association Européenne de la Petite Hydroélectricité (ESHA), p11-18, 2005.
- [9] BELAKEHAL Soltane, « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables », Thèse de doctorat, Université de Constantine, 2010.
- [10] POITIERS Frederic, «Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-Machine asynchrone à cage autonome-Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau», Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 2003.
- [11] HNEINI Mema Babe, «Etude de la centrale photovoltaïque de Skhouna (Saida)», Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf, M'SILA, 2019.
- [12] CHABANI Zeyneb, «La part des énergies renouvelables dans le bilan énergétique national à l'horizon 2030», Mémoire de Magister, Université Mohamed Bougara-Boumerdes, 2014.
- [13] « Des énergies décarbonées pour un futur durable » - 19, Énergies du XXI^e siècle, CEA.
- [14] ZITOUNI Hamza, BELHAMDOU Med Abdenour, «Utilisation de la méthode du plan d'expériences pour un choix optimal des paramètres géométriques d'une cheminée solaire», Mémoire de Master, Université KASDI Merbah, Ouargla, 2019.
- [15] FERKOUS Khaled, «Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne», Mémoire de Magister, université de Constantine, 2009.

- [16] MEGHNI Hicham , «Etude et simulation D'un system Eolien», Mémoire de Master, Université de Saïda ,2017.
- [17] GHERBI Fatima Zohra, LAKDJAFatiha, BERBER Redouane, BOUDJELLA Houari, « Dispatching Economique au Moyen du Dispositif FACTS » ,*Mediamira Science Publisher*. Vol 51, 2010.
- [18] OUDAYA Mohamed, DRISSI Mohamed, « Amélioration de la stabilité de tension par l'emplacement optimal des dispositifs FACTS »,Mémoire de Master, Université de Saïda, 2017.
- [19] BEN HAKKOUM Med abdelilah, LEGOUGUI Ali, « Compensation de l'énergie réactive d'un réseau IEEE par système FACTS», Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah, Ourgla, 2016.
- [20] HAMADOU Zakaria.M, « Optimisation des paramètres d'un FACTS shunt pour l'amélioration de la stabilité transitoire d'un système électrique», Mémoire de Magister, Université Sétif 1, 2012.
- [21] HADJI Boubakeur, « Contribution à l'Amélioration de l'Efficacité des Réseaux Electriques par l'Intégration et le Contrôle Flexible de l'Energie Eolienne et des Systèmes FACTS »,Thèse de doctorat, 2017.
- [22] DERDOURI Abdelghani, BOUSKAYA Sofiane, «Compensation dynamique de la puissance réactive (Etude comparative SVC et TCSC) », Mémoire de Master, Université Hamma Lakhdar El oued, 2019.
- [23] AMMARI Sami , « Interaction des dispositifs FACTS avec les charges dynamiques dans les réseaux de transport et d'interconnexion », thèse de doctorat, spécialité : génie électrique, institue national polytechnique de Grenoble, soutenu le 10 Novembre 2000.
- [24] ALIBI Abdelaali, « Contrôle des réseaux électrique par les systèmes FACTS :Flexible AC Transmission Systems », Mémoire Magister, université de Batna, 2009.
- [25] NOROOZIAN Maryam, GERHARD Andersson, « Damping of power system oscillations by use of controllable components », IEEE Transactions on Power Delivery, vol 9, no 4, octobre 1994, 2046–2054, Systems AB SE-721 64 Västerås Suède.
- [26] MAGNOUN Youness ,« Placement optimal de dispositif FACTS dans un réseau de puissance », Energie électrique ,2014. dumas-01224006f.
- [27] GERBEX Stéphane , « Métaheuristiques appliquées au placement optimal de dispositifs FACTS dans un réseau électrique »,Thèse de doctorat n° 2742 Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (2003).

- [28] BENRAS Med Amine, LAROUÏ Souleymane, «Utilisation d'un dispositif STATCOM pour l'amélioration du transit de puissance d'un réseau de transport d'énergie alternatif», Mémoire de Master, Université KasdiMerbah Ourglà, 09 Juin 2015.
- [29] page d'internet: (en) Task Force 38.01.06, « *Load flow control in high voltage power systems using FACTS controllers* », vol. 51, CIGRÉ, coll. « Brochure », janvier 1996.
- [30] XIAO-PING Zhang, CHRISTIAN Rehtanz, BIKASH Pal, « Flexible AC transmission Systems : Modelling and Control », Heidelberg, Springer, 2012, 552 p.
- [31] BEKRI Oum el Fadhel Loubaba, «Contribution à l'étude des systèmes FACTS (Flexible AC Transmission Systems) et leurs emplacements optimaux dans les réseaux électriques», Thèse de Doctorat en Électrotechnique, Université Djilali Liabes de Sidi-Bel-Abbès, 2013
- [32] FEDERICO Milano, « Power System Analysis Toolbox Documentation for PSAT » version 2.1.8, Janvier 6, 2013
- [33] RABAH Benahid, BOUDOUR Mohamed, «Amélioration de la stabilité de tension dans les réseaux électrique», Ouvrage, édition universitaires européennes, 2014.
- [34] BOUTABA Samira, «Amélioration de la stabilité d'un réseau électrique par l'utilisation d'un ASVC», Mémoire de Magister, Université Hassiba Ben Bouali Chlef, 09 juin 2009.
- [35] Bulletin sur la qualité de l'électricité, «Le déséquilibre de tension et de courant», N° G1546F, Hydro Quebec 2014.
- [36] IULIANA Craciun Diana, « Modélisation des équivalents dynamiques des réseaux électriques », Thèse de Doctorat, 15 Décembre 2010.

Annexes

Lines	Power rating (MVA)	Voltage Rating (kV)	Frequency rating (Hz)	Trnasfo- magnitude	Resistance (p.u)	Reactance (p.u)	Supstance (p.u)
1-2	100	100	60	0.00000	0.00350	0.04110	0.69870
1-39	100	100	60	0.00000	0.0010	0.02500	0.75000
1-39	100	100	60	0.00000	0.00200	0.05000	0.37500
2-3	100	100	60	0.00000	0.00130	0.01510	0.25720
2-25	100	100	60	0.00000	0.00700	0.00860	0.14600
3-4	100	100	60	0.00000	0.00130	0.02130	0.22140
3-18	100	100	60	0.00000	0.00110	0.01330	0.21380
4-15	100	100	60	0.00000	0.00080	0.01280	0.13420
4-14	100	100	60	0.00000	0.00080	0.01290	0.13820
5-6	100	100	60	0.00000	0.00020	0.00260	0.04340
5-8	100	100	60	0.00000	0.00080	0.01120	0.14760
6-7	100	100	60	0.00000	0.00060	0.00920	0.11300
6-11	100	100	60	0.00000	0.00070	0.00820	0.13890
7-8	100	100	60	0.00000	0.00040	0.00460	0.07800
8-9	100	100	60	0.00000	0.00230	0.03630	0.38040
9-39	100	100	60	0.00000	0.00100	0.02500	1.20000
10-11	100	100	60	0.00000	0.00040	0.00430	0.07290
10-13	100	100	60	0.00000	0.00040	0.00430	0.07290
13-14	100	100	60	0.00000	0.00090	0.01010	0.17230
14-15	100	100	60	0.00000	0.00180	0.02170	0.36600
15-16	100	100	60	0.00000	0.00090	0.00940	0.17100
16-17	100	100	60	0.00000	0.00070	0.00890	0.13420
16-19	100	100	60	0.00000	0.00160	0.01950	0.30400
16-21	100	100	60	0.00000	0.00080	0.01350	0.25480
16-24	100	100	60	0.00000	0.00030	0.00590	0.06800
17-18	100	100	60	0.00000	0.00070	0.00820	0.13190
17-27	100	100	60	0.00000	0.00130	0.01730	0.32160
21-22	100	100	60	0.00000	0.00080	0.01400	0.25650
22-23	100	100	60	0.00000	0.00060	0.00960	0.18460
23-24	100	100	60	0.00000	0.00220	0.03500	0.36100
25-26	100	100	60	0.00000	0.00320	0.03230	0.51300
26-27	100	100	60	0.00000	0.00140	0.01470	0.23960
26-28	100	100	60	0.00000	0.00430	0.04740	0.78020
26-29	100	100	60	0.00000	0.00570	0.06250	1.02900
28-29	100	100	60	0.00000	0.00140	0.01510	0.24900
2-30	100	100	60	1.02500	0.00000	0.01810	0.00000
6-31	100	100	60	1.07000	0.00000	0.02500	0.00000
6-31	100	100	60	1.07000	0.00000	0.05000	0.00000
10-32	100	100	60	1.07000	0.00000	0.02000	0.00000
12-11	100	100	60	1.00600	0.00160	0.04350	0.00000
12-13	100	100	60	1.00600	0.00160	0.04350	0.00000
19-20	100	100	60	1.06000	0.00070	0.01380	0.00000
19-33	100	100	60	1.07000	0.00070	0.01420	0.00000
20-34	100	100	60	1.00900	0.00090	0.01800	0.00000
22-35	100	100	60	1.02500	0.00000	0.01430	0.00000
23-36	100	100	60	1.00000	0.00050	0.02720	0.00000
25-37	100	100	60	1.02500	0.00060	0.02320	0.00000
29-38	100	100	60	1.02500	0.00080	0.01560	0.00000

N° du générateur	H (sec)	R_a	X'_d	X'_q	X_d	X_q	T'_{do}	T'_{qo}	X_l
1	500.00	0	0.0006	0.008	0.02	0.019	7	0.7	0.003
2	30.3	0	0.0697	0.170	0.295	0.282	6.56	1.5	0.035
3	35.3	0	0.0531	0.0876	0.2495	0.237	5.7	1.5	0.0304
4	28.6	0	0.0436	0.166	0.262	0.258	5.69	1.5	0.0295
5	26.0	0	0.132	0.166	0.67	0.62	5.4	0.44	0.054
6	34.8	0	0.05	0.0814	0.254	0.241	7.3	0.4	0.0224
7	26.4	0	0.049	0.186	0.295	0.292	5.66	1.5	0.0322
8	24.3	0	0.057	0.0911	0.2920	0.280	6.7	0.41	0.028
9	34.5	0	0.057	0.0587	0.2106	0.205	4.79	1.96	0.0298
10	42.0	0	0.031	0.008	0.1	0.069	10.2	0	0.0125

N° du générateur	K_A	T_A	V_{RMIN}	V_{RMAX}	K_E	T_E	K_F	T_F	C_1	C_2
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	6.2	0.05	-1.0	1.0	-0.633	.0405	0.57	0.5	0.66	0.88
3	5.0	0.06	-1.0	1.0	-	0.5	0.08	1.0	0.13	0.34

					0.0198					
4	5.0	0.06	-1.0	1.0	-	0.5	0.08	1.0	0.08	0.314
					0.0525					
5	40.0	0.02	-10.0	-10.0	-1.0	0.785	0.03	1.0	0.07	0.91
6	5.0	0.02	-1.0	1.0	-	0.417	0.0754	1.246	0.064	0.251
					0.0419					
7	40.0	0.02	-6.5	6.5	-1.0	0.73	0.03	1.0	0.53	0.74
8	5.0	0.02	-1.0	1.0	-0.047	0.528	0.0854	1.26	0.072	0.282
9	40.0	0.02	-10.5	10.5	-1.0	1.4	0.03	1.0	0.62	0.85
10	5.0	0.06	-1.0	1.0	-0.0485	0.25	0.04	1	0.08	0.26

A. Données du réseau IEEE 39 noeuds

B. Résultats du power flow avec le PSAT

CONTINUATION POWER FLOW REPORT

P S A T 2.1.11

Author: Federico Milano, (c) 2002-2019
e-mail: federico.milano@ucd.ie

website: faraday1.ucd.ie/psat.html

File: C:\Program Files\MATLAB\R2015b\toolbox\psat\tests\PFE-25\Nouveau dossier\b_d_Ieee39

Date: 23-May-2025 19:34:21

NETWORK STATISTICS

Buses: 39
Lines: 48
Generators: 10
Loads: 19

SOLUTION STATISTICS

Number of Iterations: 337
Maximum P mismatch [p.u.] 0
Maximum Q mismatch [p.u.] 0
Power rate [MVA] 100

POWER FLOW RESULTS

Bus	V [p.u.]	phase [rad]	P gen [p.u.]	Q gen [p.u.]	P load [p.u.]	Q load [p.u.]
BUS01	0.98837	-0.66635	0	0	0	0
BUS02	0.91007	-0.52232	0	0	0	0
BUS03	0.77924	-0.68701	0	0	7.3428	0.05473
BUS04	0.65385	-0.74122	0	0	11.4019	4.1959
BUS05	0.66496	-0.62088	0	0	0	-0.44217
BUS06	0.67682	-0.55724	0	0	0	0
BUS07	0.63518	-0.7578	0	0	5.3315	1.9155
BUS08	0.63731	-0.80455	0	0	11.9035	4.0135
BUS09	0.88016	-0.76257	0	0	0	0
BUS10	0.72414	-0.36303	0	0	0	0
BUS11	0.70043	-0.42663	0	0	0	0
BUS12	0.63569	-0.43042	0	0	0.19383	2.0067
BUS13	0.70204	-0.42245	0	0	0	0
BUS14	0.67659	-0.57193	0	0	0	0
BUS15	0.69422	-0.62942	0	0	7.2972	3.489
BUS16	0.76104	-0.52743	0	0	7.5116	0.73656
BUS17	0.76356	-0.60644	0	0	0	0
BUS18	0.76264	-0.66831	0	0	3.603	0.68411
BUS19	0.91709	-0.24485	0	0	0	0
BUS20	0.89167	-0.31561	0	0	15.5065	2.3488
BUS21	0.77199	-0.35331	0	0	6.2482	2.6224
BUS22	0.88171	-0.06877	0	0	0	0
BUS23	0.86321	-0.08056	0	0	5.6439	1.9292
BUS24	0.7756	-0.51796	0	0	7.0372	-2.1025
BUS25	0.93695	-0.45068	0	0	5.108	1.0763
BUS26	0.83005	-0.50209	0	0	3.1697	0.38766
BUS27	0.77377	-0.62834	0	0	6.4079	1.7217

BUS28	0.86833	-0.29065	0	0	4.6976	0.62938
BUS29	0.90865	-0.13955	0	0	6.4649	0.61342
BUS30	1.0475	-0.4087	5.8254	9.5686	0	0
BUS31	0.98193	0	13.3488	17.5863	0.20979	0.1049
BUS32	0.98303	0.10972	15.1461	18.7014	0	0
BUS33	0.99716	-0.00678	14.7267	10.807	0	0
BUS34	1.0123	-0.08336	11.8373	7.9733	0	0
BUS35	1.0492	0.17356	15.1459	15.7144	0	0
BUS36	1.0635	0.31043	13.049	10.1381	0	0
BUS37	1.0278	-0.13919	12.5829	6.659	0	0
BUS38	1.0265	0.18789	19.3404	11.3176	0	0
BUS39	1.03	-0.74024	23.3017	12.7501	25.1753	5.7009

STATE VARIABLES

delta_Syn_1	-0.7402
omega_Syn_1	1
e1q_Syn_1	1.03
delta_Syn_2	0.00039
omega_Syn_2	1
e1q_Syn_2	0.98206
e1d_Syn_2	0.00015
delta_Syn_3	0.11009
omega_Syn_3	1
e1q_Syn_3	0.98313
e1d_Syn_3	0.00028
delta_Syn_4	-0.0064
omega_Syn_4	1
e1q_Syn_4	0.9972
e1d_Syn_4	0.00032
delta_Syn_5	-0.08265
omega_Syn_5	1
e1q_Syn_5	1.0124
e1d_Syn_5	0.00057
delta_Syn_6	0.17388
omega_Syn_6	1
e1q_Syn_6	1.0493
e1d_Syn_6	0.00028
delta_Syn_7	0.31077
omega_Syn_7	1
e1q_Syn_7	1.0635
e1d_Syn_7	0.0003
delta_Syn_8	-0.13886
omega_Syn_8	1
e1q_Syn_8	1.0278
e1d_Syn_8	0.00027
delta_Syn_9	0.18826
omega_Syn_9	1
e1q_Syn_9	1.0265
e1d_Syn_9	0.00028
delta_Syn_10	-0.40867
omega_Syn_10	1
e1q_Syn_10	1.0475

e1d_Syn_10	2e-05
vm_Exc_1	1.03
vr1_Exc_1	1.05
vr2_Exc_1	-0.30901
vf_Exc_1	1.03
vm_Exc_2	0.98193
vr1_Exc_2	1.0001
vr2_Exc_2	-1.179
vf_Exc_2	0.98246
vm_Exc_3	0.98303
vr1_Exc_3	1.0012
vr2_Exc_3	-0.7868
vf_Exc_3	0.9835
vm_Exc_4	0.99716
vr1_Exc_4	1.0158
vr2_Exc_4	-0.79795
vf_Exc_4	0.99744
vm_Exc_5	1.0123
vr1_Exc_5	1.0319
vr2_Exc_5	-0.30385
vf_Exc_5	1.0128
vm_Exc_6	1.0492
vr1_Exc_6	1.0706
vr2_Exc_6	-0.67176
vf_Exc_6	1.0496
vm_Exc_7	1.0635
vr1_Exc_7	1.0855
vr2_Exc_7	-0.31913
vf_Exc_7	1.0638
vm_Exc_8	1.0278
vr1_Exc_8	1.0478
vr2_Exc_8	-0.73425
vf_Exc_8	1.028
vm_Exc_9	1.0265
vr1_Exc_9	1.0465
vr2_Exc_9	-0.30801
vf_Exc_9	1.0267
vm_Exc_10	1.0475
vr1_Exc_10	1.0684
vr2_Exc_10	-0.41903
vf_Exc_10	1.0476
tg1_Tg_1	10
tg2_Tg_1	10
tg3_Tg_1	7.6
tg1_Tg_2	5.7287
tg2_Tg_2	5.7287
tg3_Tg_2	4.3538
tg1_Tg_3	6.5
tg2_Tg_3	6.5
tg3_Tg_3	4.94
tg1_Tg_4	6.32
tg2_Tg_4	6.32
tg3_Tg_4	4.8032

tg1_Tg_5	5.08
tg2_Tg_5	5.08
tg3_Tg_5	3.8608
tg1_Tg_6	6.5
tg2_Tg_6	6.5
tg3_Tg_6	4.94
tg1_Tg_7	5.6
tg2_Tg_7	5.6
tg3_Tg_7	4.256
tg1_Tg_8	5.4
tg2_Tg_8	5.4
tg3_Tg_8	4.104
tg1_Tg_9	8.3
tg2_Tg_9	8.3
tg3_Tg_9	6.308
tg1_Tg_10	2.5
tg2_Tg_10	2.5
tg3_Tg_10	1.9

OTHER ALGEBRAIC VARIABLES

vf_Syn_1	1.03
pm_Syn_1	23.3017
p_Syn_1	23.3017
q_Syn_1	12.7501
vf_Syn_2	0.98246
pm_Syn_2	13.3489
p_Syn_2	13.3488
q_Syn_2	17.5863
vf_Syn_3	0.9835
pm_Syn_3	15.1461
p_Syn_3	15.1461
q_Syn_3	18.7014
vf_Syn_4	0.99744
pm_Syn_4	14.7267
p_Syn_4	14.7267
q_Syn_4	10.807
vf_Syn_5	1.0128
pm_Syn_5	11.8373
p_Syn_5	11.8373
q_Syn_5	7.9733
vf_Syn_6	1.0496
pm_Syn_6	15.1462
p_Syn_6	15.1459
q_Syn_6	15.7144
vf_Syn_7	1.0638
pm_Syn_7	13.049
p_Syn_7	13.049
q_Syn_7	10.1381
vf_Syn_8	1.028
pm_Syn_8	12.5829
p_Syn_8	12.5829
q_Syn_8	6.659

vf_Syn_9	1.0267
pm_Syn_9	19.3404
p_Syn_9	19.3404
q_Syn_9	11.3176
vf_Syn_10	1.0476
pm_Syn_10	5.8254
p_Syn_10	5.8254
q_Syn_10	9.5686
vref_Exc_1	1.0563
vref_Exc_2	1.1432
vref_Exc_3	1.1833
vref_Exc_4	1.2003
vref_Exc_5	1.0381
vref_Exc_6	1.2634
vref_Exc_7	1.0906
vref_Exc_8	1.2373
vref_Exc_9	1.2358
vref_Exc_10	1.2612
wref_Tg_1	1
wref_Tg_2	1
wref_Tg_3	1
wref_Tg_4	1
wref_Tg_5	1
wref_Tg_6	1
wref_Tg_7	1
wref_Tg_8	1
wref_Tg_9	1
wref_Tg_10	1

LINE FLOWS

From Bus	To Bus	Line	P Flow	Q Flow	P Loss	Q Loss
		[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	
BUS01	BUS02	1	-2.9402	2.0187	0.05093	-0.03257
BUS01	BUS39	2	1.4701	-1.0093	0.00582	-0.23653
BUS01	BUS39	3	1.4701	-1.0093	0.00582	-0.23653
BUS02	BUS03	4	8.3713	7.6933	0.20549	2.2022
BUS02	BUS25	5	-5.537	1.8564	0.29017	0.23195
BUS03	BUS04	6	1.5723	4.4591	0.04916	0.69085
BUS03	BUS18	7	-0.7493	0.97723	0.00298	-0.091
BUS04	BUS05	8	-4.0818	-0.09527	0.03119	0.44062
BUS04	BUS14	9	-5.7969	-0.33235	0.06305	0.95555
BUS05	BUS06	10	-11.1502	-1.8364	0.05774	0.73114
BUS05	BUS08	11	7.0371	1.7427	0.0953	1.2716
BUS06	BUS07	12	9.5297	3.3531	0.1339	2.0045
BUS06	BUS11	13	-7.5986	-0.83911	0.08922	0.97932
BUS07	BUS08	14	4.0642	-0.56691	0.01668	0.16022
BUS08	BUS09	15	-0.91415	-4.2695	0.10425	1.4208
BUS09	BUS39	16	-1.0184	-5.6903	0.03659	-0.18671
BUS10	BUS11	17	7.823	3.4845	0.05605	0.56551
BUS10	BUS13	18	7.3231	3.2305	0.04896	0.48928
BUS13	BUS14	19	7.1513	1.6135	0.0984	1.0223

BUS14	BUS15	20	1.193	-0.69671	0.00707	-0.08669
BUS15	BUS16	21	-6.1113	-4.099	0.10049	0.95887
BUS16	BUS17	22	5.1209	-0.45295	0.0319	0.32762
BUS16	BUS19	23	-10.2938	-3.9142	0.33316	3.8445
BUS16	BUS21	24	-7.5106	0.41206	0.07824	1.1706
BUS16	BUS24	25	-1.0399	-1.8394	0.00228	0.0046
BUS17	BUS18	26	4.3783	-0.19098	0.02304	0.19313
BUS17	BUS27	27	0.71071	-0.58958	0.00167	-0.16774
BUS21	BUS22	28	-13.837	-3.381	0.27167	4.578
BUS22	BUS23	29	1.0372	1.5681	0.00291	-0.09404
BUS23	BUS24	30	8.3187	3.3043	0.23923	3.5628
BUS25	BUS26	31	1.5326	2.7558	0.04095	0.01147
BUS26	BUS27	32	5.7848	2.892	0.08598	0.7485
BUS26	BUS28	33	-3.195	-0.31065	0.06372	0.13951
BUS26	BUS29	34	-4.2678	-0.22476	0.15083	0.87458
BUS28	BUS29	35	-7.9563	-1.0795	0.11934	1.0905
BUS02	BUS30	36	-5.8254	-7.4984	0	2.0702
BUS06	BUS31	37	-6.5695	-2.5408	0	6.1999
BUS06	BUS31	38	-6.5695	-2.5408	0	6.1999
BUS10	BUS32	39	-15.1461	-6.715	0	11.9864
BUS12	BUS11	40	-0.07516	-0.99262	0.00397	0.10795
BUS12	BUS13	41	-0.11868	-1.0141	0.00418	0.11357
BUS19	BUS20	42	3.8649	-1.7168	0.01672	0.32972
BUS19	BUS33	43	-14.4918	-6.0419	0.2349	4.7652
BUS20	BUS34	44	-11.6584	-4.3953	0.1789	3.578
BUS22	BUS35	45	-15.1459	-9.5271	0	6.1873
BUS23	BUS36	46	-12.9283	-3.5713	0.12071	6.5668
BUS25	BUS37	47	-12.4678	-2.2077	0.11512	4.4514
BUS29	BUS38	48	-18.9592	-3.8828	0.38127	7.4347

LINE FLOWS

From Bus	To Bus	Line	P Flow	Q Flow	P Loss	Q Loss
		[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	
BUS02	BUS01	1	2.9911	-2.0513	0.05093	-0.03257
BUS39	BUS01	2	-1.4643	0.77281	0.00582	-0.23653
BUS39	BUS01	3	-1.4643	0.77281	0.00582	-0.23653
BUS03	BUS02	4	-8.1658	-5.4911	0.20549	2.2022
BUS25	BUS02	5	5.8272	-1.6244	0.29017	0.23195
BUS04	BUS03	6	-1.5231	-3.7683	0.04916	0.69085
BUS18	BUS03	7	0.75229	-1.0682	0.00298	-0.091
BUS05	BUS04	8	4.113	0.53589	0.03119	0.44062
BUS14	BUS04	9	5.8599	1.2879	0.06305	0.95555
BUS06	BUS05	10	11.2079	2.5676	0.05774	0.73114
BUS08	BUS05	11	-6.9418	-0.47112	0.0953	1.2716
BUS07	BUS06	12	-9.3958	-1.3486	0.1339	2.0045
BUS11	BUS06	13	7.6878	1.8184	0.08922	0.97932
BUS08	BUS07	14	-4.0476	0.72713	0.01668	0.16022
BUS09	BUS08	15	1.0184	5.6903	0.10425	1.4208
BUS39	BUS09	16	1.055	5.5035	0.03659	-0.18671
BUS11	BUS10	17	-7.7669	-2.919	0.05605	0.56551
BUS13	BUS10	18	-7.2742	-2.7412	0.04896	0.48928

BUS14	BUS13	19	-7.0529	-0.59119	0.0984	1.0223
BUS15	BUS14	20	-1.1859	0.61002	0.00707	-0.08669
BUS16	BUS15	21	6.2118	5.0579	0.10049	0.95887
BUS17	BUS16	22	-5.089	0.78056	0.0319	0.32762
BUS19	BUS16	23	10.6269	7.7587	0.33316	3.8445
BUS21	BUS16	24	7.5888	0.75852	0.07824	1.1706
BUS24	BUS16	25	1.0422	1.844	0.00228	0.0046
BUS18	BUS17	26	-4.3553	0.38412	0.02304	0.19313
BUS27	BUS17	27	-0.70903	0.42184	0.00167	-0.16774
BUS22	BUS21	28	14.1087	7.959	0.27167	4.578
BUS23	BUS22	29	-1.0343	-1.6621	0.00291	-0.09404
BUS24	BUS23	30	-8.0794	0.25853	0.23923	3.5628
BUS26	BUS25	31	-1.4917	-2.7443	0.04095	0.01147
BUS27	BUS26	32	-5.6988	-2.1435	0.08598	0.7485
BUS28	BUS26	33	3.2587	0.45016	0.06372	0.13951
BUS29	BUS26	34	4.4187	1.0993	0.15083	0.87458
BUS29	BUS28	35	8.0756	2.1701	0.11934	1.0905
BUS30	BUS02	36	5.8254	9.5686	0	2.0702
BUS31	BUS06	37	6.5695	8.7407	0	6.1999
BUS31	BUS06	38	6.5695	8.7407	0	6.1999
BUS32	BUS10	39	15.1461	18.7014	0	11.9864
BUS11	BUS12	40	0.07913	1.1006	0.00397	0.10795
BUS13	BUS12	41	0.12285	1.1277	0.00418	0.11357
BUS20	BUS19	42	-3.8482	2.0465	0.01672	0.32972
BUS33	BUS19	43	14.7267	10.807	0.2349	4.7652
BUS34	BUS20	44	11.8373	7.9733	0.1789	3.578
BUS35	BUS22	45	15.1459	15.7144	0	6.1873
BUS36	BUS23	46	13.049	10.1381	0.12071	6.5668
BUS37	BUS25	47	12.5829	6.659	0.11512	4.4514
BUS38	BUS29	48	19.3404	11.3176	0.38127	7.4347

GLOBAL SUMMARY REPORT

TOTAL GENERATION

REAL POWER [p.u.] 144.3043
 REACTIVE POWER [p.u.] 121.2158
 TOTAL LOAD
 REAL POWER [p.u.] 140.2543
 REACTIVE POWER [p.u.] 31.686
 TOTAL LOSSES
 REAL POWER [p.u.] 4.05
 REACTIVE POWER [p.u.] 89.5298

AnnexeB.1 : Résultats de simulation du réseau IEEE 39-nœuds (état de base)

CON

P S A T 2.1.11

Author: Federico Milano, (c) 2002-2019
 e-mail: federico.milano@ucd.ie
 website: faraday1.ucd.ie/psat.html

File: C:\Program Files\MATLAB\R2015b\toolbox\psat\tests\PFE-25\Nouveau
dossier\b_d_Ieee39STATCOM
Date: 23-May-2025 19:47:12

NETWORK STATISTICS

Buses: 39
Lines: 48
Generators: 10
Loads: 19

SOLUTION STATISTICS

Number of Iterations: 400
Maximum P mismatch [p.u.] 0
Maximum Q mismatch [p.u.] 0
Power rate [MVA] 100

POWER FLOW RESULTS

Bus	V [p.u.]	phase [rad]	P gen [p.u.]	Q gen [p.u.]	P load [p.u.]	Q load [p.u.]
BUS01	0.99475	-0.61494	0	0	0	0
BUS02	0.9262	-0.47531	0	0	0	0
BUS03	0.81565	-0.63465	0	0	7.5018	0.05591
BUS04	0.70893	-0.68412	0	0	11.6488	4.2868
BUS05	0.71666	-0.58109	0	0	0	-0.51359
BUS06	0.72684	-0.52511	0	0	0	0
BUS07	0.68772	-0.70167	0	0	5.447	1.957
BUS08	0.68894	-0.74276	0	0	12.1613	4.1004
BUS09	0.90152	-0.70805	0	0	0	0
BUS10	0.77107	-0.35195	0	0	0	0
BUS11	0.74925	-0.40902	0	0	0	0
BUS12	0.69051	-0.41235	0	0	0.19803	2.0502
BUS13	0.75395	-0.40536	0	0	0	0
BUS14	0.73787	-0.53638	0	0	0	0
BUS15	0.7794	-0.58352	0	1e-05	7.4552	0.44694
BUS16	0.813	-0.49202	0	0	7.6742	0.75251
BUS17	0.8077	-0.56187	0	0	0	0
BUS18	0.8042	-0.61808	0	0	3.681	0.69893
BUS19	0.93626	-0.22539	0	0	0	0
BUS20	0.90143	-0.29537	0	0	15.8424	2.3997
BUS21	0.81232	-0.33317	0	0	6.3835	2.6792
BUS22	0.90419	-0.06346	0	0	0	0
BUS23	0.88641	-0.07488	0	0	5.7662	1.971
BUS24	0.82424	-0.48342	0	0	7.1896	-2.148
BUS25	0.95012	-0.40325	0	0	5.2187	1.0997
BUS26	0.85228	-0.45755	0	0	3.2384	0.39606
BUS27	0.80675	-0.58	0	0	6.5466	1.759
BUS28	0.8784	-0.25024	0	0	4.7993	0.64301
BUS29	0.91499	-0.09887	0	0	6.6049	0.62671

BUS30	1.0475	-0.36155	5.9362	8.6647	0	0
BUS31	0.98194	0	13.5896	15.5893	0.21434	0.10717
BUS32	0.98303	0.09891	15.434	16.4371	0	0
BUS33	0.99716	0.01341	15.0066	9.5815	0	0
BUS34	1.0123	-0.06057	12.0623	7.4621	0	0
BUS35	1.0493	0.17731	15.4338	14.1289	0	0
BUS36	1.0635	0.31357	13.297	9.2615	0	0
BUS37	1.0278	-0.08976	12.8221	6.1361	0	0
BUS38	1.0265	0.23313	19.708	10.9997	0	0
BUS39	1.03	-0.68809	23.7446	11.732	25.7205	5.8244

STATE VARIABLES

delta_Syn_1	-0.68805
omega_Syn_1	1
e1q_Syn_1	1.03
delta_Syn_2	0.00039
omega_Syn_2	1
e1q_Syn_2	0.98205
e1d_Syn_2	0.00015
delta_Syn_3	0.09929
omega_Syn_3	1
e1q_Syn_3	0.98312
e1d_Syn_3	0.00029
delta_Syn_4	0.0138
omega_Syn_4	1
e1q_Syn_4	0.9972
e1d_Syn_4	0.00032
delta_Syn_5	-0.05984
omega_Syn_5	1
e1q_Syn_5	1.0124
e1d_Syn_5	0.00058
delta_Syn_6	0.17764
omega_Syn_6	1
e1q_Syn_6	1.0493
e1d_Syn_6	0.00028
delta_Syn_7	0.31391
omega_Syn_7	1
e1q_Syn_7	1.0635
e1d_Syn_7	0.0003
delta_Syn_8	-0.08942
omega_Syn_8	1
e1q_Syn_8	1.0278
e1d_Syn_8	0.00028
delta_Syn_9	0.23351
omega_Syn_9	1
e1q_Syn_9	1.0265
e1d_Syn_9	0.00028
delta_Syn_10	-0.36151
omega_Syn_10	1
e1q_Syn_10	1.0475
e1d_Syn_10	2e-05
vm_Exc_1	1.03

vr1_Exc_1	1.05
vr2_Exc_1	-0.30901
vf_Exc_1	1.03
vm_Exc_2	0.98194
vr1_Exc_2	1.0001
vr2_Exc_2	-1.1789
vf_Exc_2	0.98241
vm_Exc_3	0.98303
vr1_Exc_3	1.0012
vr2_Exc_3	-0.78676
vf_Exc_3	0.98345
vm_Exc_4	0.99716
vr1_Exc_4	1.0158
vr2_Exc_4	-0.79793
vf_Exc_4	0.99741
vm_Exc_5	1.0123
vr1_Exc_5	1.0319
vr2_Exc_5	-0.30384
vf_Exc_5	1.0128
vm_Exc_6	1.0493
vr1_Exc_6	1.0705
vr2_Exc_6	-0.67174
vf_Exc_6	1.0496
vm_Exc_7	1.0635
vr1_Exc_7	1.0854
vr2_Exc_7	-0.31913
vf_Exc_7	1.0638
vm_Exc_8	1.0278
vr1_Exc_8	1.0478
vr2_Exc_8	-0.73425
vf_Exc_8	1.0279
vm_Exc_9	1.0265
vr1_Exc_9	1.0465
vr2_Exc_9	-0.30801
vf_Exc_9	1.0267
vm_Exc_10	1.0475
vr1_Exc_10	1.0684
vr2_Exc_10	-0.41903
vf_Exc_10	1.0476
tg1_Tg_1	10
tg2_Tg_1	10
tg3_Tg_1	7.6
tg1_Tg_2	5.7233
tg2_Tg_2	5.7233
tg3_Tg_2	4.3497
tg1_Tg_3	6.5
tg2_Tg_3	6.5
tg3_Tg_3	4.94
tg1_Tg_4	6.32
tg2_Tg_4	6.32
tg3_Tg_4	4.8032
tg1_Tg_5	5.08
tg2_Tg_5	5.08

tg3_Tg_5	3.8608
tg1_Tg_6	6.5
tg2_Tg_6	6.5
tg3_Tg_6	4.94
tg1_Tg_7	5.6
tg2_Tg_7	5.6
tg3_Tg_7	4.256
tg1_Tg_8	5.4
tg2_Tg_8	5.4
tg3_Tg_8	4.104
tg1_Tg_9	8.3
tg2_Tg_9	8.3
tg3_Tg_9	6.308
tg1_Tg_10	2.5
tg2_Tg_10	2.5
tg3_Tg_10	1.9
ist_Statcom_1	4

OTHER ALGEBRAIC VARIABLES

vf_Syn_1	1.03
pm_Syn_1	23.7446
p_Syn_1	23.7446
q_Syn_1	11.732
vf_Syn_2	0.98241
pm_Syn_2	13.5898
p_Syn_2	13.5896
q_Syn_2	15.5893
vf_Syn_3	0.98345
pm_Syn_3	15.434
p_Syn_3	15.434
q_Syn_3	16.4371
vf_Syn_4	0.99741
pm_Syn_4	15.0066
p_Syn_4	15.0066
q_Syn_4	9.5815
vf_Syn_5	1.0128
pm_Syn_5	12.0623
p_Syn_5	12.0623
q_Syn_5	7.4621
vf_Syn_6	1.0496
pm_Syn_6	15.4341
p_Syn_6	15.4338
q_Syn_6	14.1289
vf_Syn_7	1.0638
pm_Syn_7	13.297
p_Syn_7	13.297
q_Syn_7	9.2615
vf_Syn_8	1.0279
pm_Syn_8	12.8221
p_Syn_8	12.8221
q_Syn_8	6.1361
vf_Syn_9	1.0267

pm_Syn_9	19.708
p_Syn_9	19.708
q_Syn_9	10.9997
vf_Syn_10	1.0476
pm_Syn_10	5.9362
p_Syn_10	5.9362
q_Syn_10	8.6647
vref_Exc_1	1.0563
vref_Exc_2	1.1432
vref_Exc_3	1.1833
vref_Exc_4	1.2003
vref_Exc_5	1.0381
vref_Exc_6	1.2634
vref_Exc_7	1.0906
vref_Exc_8	1.2373
vref_Exc_9	1.2358
vref_Exc_10	1.2612
wref_Tg_1	1
wref_Tg_2	1
wref_Tg_3	1
wref_Tg_4	1
wref_Tg_5	1
wref_Tg_6	1
wref_Tg_7	1
wref_Tg_8	1
wref_Tg_9	1
wref_Tg_10	1
vref_Statcom_1	1.0695

LINE FLOWS

From Bus	To Bus	Line [p.u.]	P Flow [p.u.]	Q Flow [p.u.]	P Loss [p.u.]	Q Loss [p.u.]
BUS01	BUS02	1	-2.9388	1.7818	0.04656	-0.09867
BUS01	BUS39	2	1.4694	-0.8909	0.00537	-0.25022
BUS01	BUS39	3	1.4694	-0.8909	0.00537	-0.25022
BUS02	BUS03	4	8.5136	6.5713	0.17749	1.8658
BUS02	BUS25	5	-5.5628	2.1541	0.2926	0.23096
BUS03	BUS04	6	1.588	3.9495	0.03655	0.46966
BUS03	BUS18	7	-0.75369	0.70007	0.00192	-0.11701
BUS04	BUS05	8	-4.0802	0.00373	0.0265	0.35585
BUS04	BUS14	9	-6.0172	-0.81065	0.05859	0.87246
BUS05	BUS06	10	-11.3335	-1.6324	0.05104	0.64095
BUS05	BUS08	11	7.2269	1.7938	0.08658	1.1392
BUS06	BUS07	12	9.7583	3.269	0.12051	1.7912
BUS06	BUS11	13	-7.7676	-0.91357	0.08096	0.87277
BUS07	BUS08	14	4.1909	-0.47925	0.01503	0.13593
BUS08	BUS09	15	-0.84525	-4.0609	0.07986	1.0155
BUS09	BUS39	16	-0.9251	-5.0764	0.02696	-0.45015
BUS10	BUS11	17	7.9783	3.3675	0.05055	0.50129
BUS10	BUS13	18	7.4557	2.5479	0.04184	0.40739
BUS13	BUS14	19	7.2878	0.97399	0.08575	0.86639

BUS14	BUS15	20	1.1262	-1.5755	0.01139	-0.07343
BUS15	BUS16	21	-6.3404	-1.949	0.06489	0.56932
BUS16	BUS17	22	5.1692	0.21284	0.02837	0.27256
BUS16	BUS19	23	-10.5228	-2.9969	0.28835	3.2806
BUS16	BUS21	24	-7.6727	1.0275	0.07275	1.0594
BUS16	BUS24	25	-1.0532	-1.5143	0.00151	-0.0158
BUS17	BUS18	26	4.458	0.04607	0.02133	0.16422
BUS17	BUS27	27	0.68284	-0.10579	0.00093	-0.19719
BUS21	BUS22	28	-14.129	-2.7111	0.25039	4.1924
BUS22	BUS23	29	1.0544	1.5384	0.00273	-0.10434
BUS23	BUS24	30	8.4664	2.6184	0.22204	3.2679
BUS25	BUS26	31	1.6333	2.5218	0.03633	-0.05117
BUS26	BUS27	32	5.9441	2.3365	0.07942	0.66892
BUS26	BUS28	33	-3.2362	-0.12136	0.06215	0.10076
BUS26	BUS29	34	-4.3494	-0.03823	0.14933	0.83292
BUS28	BUS29	35	-8.0976	-0.86513	0.12005	1.0945
BUS02	BUS30	36	-5.9362	-6.8449	0	1.8198
BUS06	BUS31	37	-6.6876	-2.3144	0	5.4267
BUS06	BUS31	38	-6.6876	-2.3144	0	5.4267
BUS10	BUS32	39	-15.434	-5.9154	0	10.5217
BUS12	BUS11	40	-0.07578	-0.98901	0.00334	0.09084
BUS12	BUS13	41	-0.12225	-1.0612	0.00388	0.10535
BUS19	BUS20	42	3.9723	-1.223	0.0155	0.30557
BUS19	BUS33	43	-14.7834	-5.0544	0.22317	4.5271
BUS20	BUS34	44	-11.8856	-3.9283	0.17669	3.5339
BUS22	BUS35	45	-15.4338	-8.4419	0	5.687
BUS23	BUS36	46	-13.1809	-2.9466	0.11608	6.3149
BUS25	BUS37	47	-12.7073	-1.6983	0.11477	4.4378
BUS29	BUS38	48	-19.3212	-3.4575	0.38678	7.5422

LINE FLOWS

From Bus	To Bus	Line	P Flow	Q Flow	P Loss	Q Loss
		[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	
BUS02	BUS01	1	2.9853	-1.8805	0.04656	-0.09867
BUS39	BUS01	2	-1.464	0.64068	0.00537	-0.25022
BUS39	BUS01	3	-1.464	0.64068	0.00537	-0.25022
BUS03	BUS02	4	-8.3361	-4.7055	0.17749	1.8658
BUS25	BUS02	5	5.8554	-1.9232	0.2926	0.23096
BUS04	BUS03	6	-1.5514	-3.4798	0.03655	0.46966
BUS18	BUS03	7	0.75562	-0.81708	0.00192	-0.11701
BUS05	BUS04	8	4.1067	0.35212	0.0265	0.35585
BUS14	BUS04	9	6.0758	1.6831	0.05859	0.87246
BUS06	BUS05	10	11.3846	2.2733	0.05104	0.64095
BUS08	BUS05	11	-7.1403	-0.65468	0.08658	1.1392
BUS07	BUS06	12	-9.6378	-1.4778	0.12051	1.7912
BUS11	BUS06	13	7.8486	1.7863	0.08096	0.87277
BUS08	BUS07	14	-4.1758	0.61518	0.01503	0.13593
BUS09	BUS08	15	0.9251	5.0764	0.07986	1.0155
BUS39	BUS09	16	0.95207	4.6262	0.02696	-0.45015
BUS11	BUS10	17	-7.9277	-2.8662	0.05055	0.50129
BUS13	BUS10	18	-7.4139	-2.1405	0.04184	0.40739

BUS14	BUS13	19	-7.202	-0.1076	0.08575	0.86639
BUS15	BUS14	20	-1.1148	1.5021	0.01139	-0.07343
BUS16	BUS15	21	6.4053	2.5183	0.06489	0.56932
BUS17	BUS16	22	-5.1408	0.05972	0.02837	0.27256
BUS19	BUS16	23	10.8111	6.2774	0.28835	3.2806
BUS21	BUS16	24	7.7455	0.0319	0.07275	1.0594
BUS24	BUS16	25	1.0548	1.4985	0.00151	-0.0158
BUS18	BUS17	26	-4.4366	0.11815	0.02133	0.16422
BUS27	BUS17	27	-0.68191	-0.0914	0.00093	-0.19719
BUS22	BUS21	28	14.3794	6.9035	0.25039	4.1924
BUS23	BUS22	29	-1.0517	-1.6428	0.00273	-0.10434
BUS24	BUS23	30	-8.2444	0.64956	0.22204	3.2679
BUS26	BUS25	31	-1.597	-2.573	0.03633	-0.05117
BUS27	BUS26	32	-5.8647	-1.6676	0.07942	0.66892
BUS28	BUS26	33	3.2983	0.22212	0.06215	0.10076
BUS29	BUS26	34	4.4987	0.87114	0.14933	0.83292
BUS29	BUS28	35	8.2177	1.9596	0.12005	1.0945
BUS30	BUS02	36	5.9362	8.6647	0	1.8198
BUS31	BUS06	37	6.6876	7.7411	0	5.4267
BUS31	BUS06	38	6.6876	7.7411	0	5.4267
BUS32	BUS10	39	15.434	16.4371	0	10.5217
BUS11	BUS12	40	0.07912	1.0799	0.00334	0.09084
BUS13	BUS12	41	0.12612	1.1665	0.00388	0.10535
BUS20	BUS19	42	-3.9568	1.5286	0.0155	0.30557
BUS33	BUS19	43	15.0066	9.5815	0.22317	4.5271
BUS34	BUS20	44	12.0623	7.4621	0.17669	3.5339
BUS35	BUS22	45	15.4338	14.1289	0	5.687
BUS36	BUS23	46	13.297	9.2615	0.11608	6.3149
BUS37	BUS25	47	12.8221	6.1361	0.11477	4.4378
BUS38	BUS29	48	19.708	10.9997	0.38678	7.5422

GLOBAL SUMMARY REPORT

TOTAL GENERATION

REAL POWER [p.u.] 147.0341

REACTIVE POWER [p.u.] 109.9929

TOTAL LOAD

REAL POWER [p.u.] 143.2918

REACTIVE POWER [p.u.] 29.1928

TOTAL LOSSES

REAL POWER [p.u.] 3.7422

REACTIVE POWER [p.u.] 80.8001

Annexe B.2 : Résultats de simulation du réseau IEEE 39-nœuds avec l'insertion du
CC STATCOM au nœud 15 (Zone 3)

P S A T 2.1.11

Author: Federico Milano, (c) 2002-2019

e-mail: federico.milano@ucd.ie

website: faraday1.ucd.ie/psat.html

File: C:\Program Files\MATLAB\R2015b\toolbox\psat\tests\PFE-25\Nouveau
dossier\b_d_Ieee39SPQselm
Date: 01-Jun-2025 22:34:03

NETWORK STATISTICS

Buses: 39
Lines: 48
Generators: 10
Loads: 19

SOLUTION STATISTICS

Number of Iterations: 337
Maximum P mismatch [p.u.] 0
Maximum Q mismatch [p.u.] 0
Power rate [MVA] 100

POWER FLOW RESULTS

Bus	V [p.u.]	phase [rad]	P gen [p.u.]	Q gen [p.u.]	P load [p.u.]	Q load [p.u.]
BUS01	0.99069	-0.66276	0	0	0	0
BUS02	0.91785	-0.51273	0	0	0	0
BUS03	0.79741	-0.66804	1	1	7.4422	0.05547
BUS04	0.6639	-0.73227	0	0	11.5563	4.2527
BUS05	0.6713	-0.61812	0	0	0	-0.45064
BUS06	0.68257	-0.55549	0	0	0	0
BUS07	0.64048	-0.75537	0	0	5.4037	1.9415
BUS08	0.64248	-0.80196	0	0	12.0647	4.0678
BUS09	0.88232	-0.76215	0	0	0	0
BUS10	0.72954	-0.3627	0	0	0	0
BUS11	0.70597	-0.42587	0	0	0	0
BUS12	0.64126	-0.42953	0	0	0.19646	2.0339
BUS13	0.70823	-0.42145	0	0	0	0
BUS14	0.68457	-0.56855	0	0	0	0
BUS15	0.70136	-0.62773	0	0	7.396	3.5362
BUS16	0.76793	-0.52716	0	0	7.6133	0.74653
BUS17	0.77346	-0.60078	0	0	0	0
BUS18	0.77592	-0.65705	0	0	3.6518	0.69338
BUS19	0.91938	-0.24899	0	0	0	0
BUS20	0.89233	-0.32197	0	0	15.7165	2.3806
BUS21	0.77669	-0.35593	0	0	6.3328	2.6579
BUS22	0.88408	-0.07242	0	0	0	0
BUS23	0.86556	-0.08446	0	0	5.7203	1.9553
BUS24	0.78205	-0.5185	0	0	7.1325	-2.131
BUS25	0.94198	-0.44174	0	0	5.1772	1.0909
BUS26	0.83574	-0.49772	0	0	3.2126	0.39291
BUS27	0.78135	-0.62312	0	0	6.4946	1.745
BUS28	0.87087	-0.28996	0	0	4.7612	0.63791
BUS29	0.91023	-0.13882	0	0	6.5524	0.62173

BUS30	1.0475	-0.39942	5.8595	9.1301	0	0
BUS31	0.98193	0	13.4259	17.3856	0.21264	0.10632
BUS32	0.98303	0.10923	15.2347	18.4681	0	0
BUS33	0.99716	-0.00993	14.8129	10.6711	0	0
BUS34	1.0123	-0.08845	11.9065	7.9485	0	0
BUS35	1.0492	0.17069	15.2345	15.5618	0	0
BUS36	1.0635	0.3079	13.1253	10.0693	0	0
BUS37	1.0278	-0.12993	12.6566	6.4542	0	0
BUS38	1.0265	0.19014	19.4536	11.2445	0	0
BUS39	1.03	-0.74066	23.4381	12.6631	25.5162	5.7781

STATE VARIABLES

delta_Syn_1	-0.74062
omega_Syn_1	1
e1q_Syn_1	1.03
delta_Syn_2	0.00039
omega_Syn_2	1
e1q_Syn_2	0.98206
e1d_Syn_2	0.00015
delta_Syn_3	0.1096
omega_Syn_3	1
e1q_Syn_3	0.98313
e1d_Syn_3	0.00028
delta_Syn_4	-0.00955
omega_Syn_4	1
e1q_Syn_4	0.9972
e1d_Syn_4	0.00032
delta_Syn_5	-0.08773
omega_Syn_5	1
e1q_Syn_5	1.0124
e1d_Syn_5	0.00057
delta_Syn_6	0.17102
omega_Syn_6	1
e1q_Syn_6	1.0493
e1d_Syn_6	0.00028
delta_Syn_7	0.30824
omega_Syn_7	1
e1q_Syn_7	1.0635
e1d_Syn_7	0.0003
delta_Syn_8	-0.1296
omega_Syn_8	1
e1q_Syn_8	1.0278
e1d_Syn_8	0.00027
delta_Syn_9	0.19052
omega_Syn_9	1
e1q_Syn_9	1.0265
e1d_Syn_9	0.00028
delta_Syn_10	-0.39938
omega_Syn_10	1
e1q_Syn_10	1.0475
e1d_Syn_10	2e-05
vm_Exc_1	1.03

vr1_Exc_1	1.05
vr2_Exc_1	-0.30901
vf_Exc_1	1.03
vm_Exc_2	0.98193
vr1_Exc_2	1.0001
vr2_Exc_2	-1.179
vf_Exc_2	0.98246
vm_Exc_3	0.98303
vr1_Exc_3	1.0012
vr2_Exc_3	-0.7868
vf_Exc_3	0.9835
vm_Exc_4	0.99716
vr1_Exc_4	1.0158
vr2_Exc_4	-0.79795
vf_Exc_4	0.99744
vm_Exc_5	1.0123
vr1_Exc_5	1.0319
vr2_Exc_5	-0.30384
vf_Exc_5	1.0128
vm_Exc_6	1.0492
vr1_Exc_6	1.0706
vr2_Exc_6	-0.67176
vf_Exc_6	1.0496
vm_Exc_7	1.0635
vr1_Exc_7	1.0855
vr2_Exc_7	-0.31913
vf_Exc_7	1.0638
vm_Exc_8	1.0278
vr1_Exc_8	1.0478
vr2_Exc_8	-0.73425
vf_Exc_8	1.028
vm_Exc_9	1.0265
vr1_Exc_9	1.0465
vr2_Exc_9	-0.30801
vf_Exc_9	1.0267
vm_Exc_10	1.0475
vr1_Exc_10	1.0684
vr2_Exc_10	-0.41903
vf_Exc_10	1.0476
tg1_Tg_1	10
tg2_Tg_1	10
tg3_Tg_1	7.6
tg1_Tg_2	5.7283
tg2_Tg_2	5.7283
tg3_Tg_2	4.3535
tg1_Tg_3	6.5
tg2_Tg_3	6.5
tg3_Tg_3	4.94
tg1_Tg_4	6.32
tg2_Tg_4	6.32
tg3_Tg_4	4.8032
tg1_Tg_5	5.08
tg2_Tg_5	5.08

tg3_Tg_5	3.8608
tg1_Tg_6	6.5
tg2_Tg_6	6.5
tg3_Tg_6	4.94
tg1_Tg_7	5.6
tg2_Tg_7	5.6
tg3_Tg_7	4.256
tg1_Tg_8	5.4
tg2_Tg_8	5.4
tg3_Tg_8	4.104
tg1_Tg_9	8.3
tg2_Tg_9	8.3
tg3_Tg_9	6.308
tg1_Tg_10	2.5
tg2_Tg_10	2.5
tg3_Tg_10	1.9
id_Spq_1	1.7613
iq_Spq_1	0.20765

OTHER ALGEBRAIC VARIABLES

vf_Syn_1	1.03
pm_Syn_1	23.4381
p_Syn_1	23.4381
q_Syn_1	12.6631
vf_Syn_2	0.98246
pm_Syn_2	13.4261
p_Syn_2	13.4259
q_Syn_2	17.3856
vf_Syn_3	0.9835
pm_Syn_3	15.2348
p_Syn_3	15.2347
q_Syn_3	18.4681
vf_Syn_4	0.99744
pm_Syn_4	14.8129
p_Syn_4	14.8129
q_Syn_4	10.6711
vf_Syn_5	1.0128
pm_Syn_5	11.9065
p_Syn_5	11.9065
q_Syn_5	7.9485
vf_Syn_6	1.0496
pm_Syn_6	15.2348
p_Syn_6	15.2345
q_Syn_6	15.5618
vf_Syn_7	1.0638
pm_Syn_7	13.1253
p_Syn_7	13.1253
q_Syn_7	10.0693
vf_Syn_8	1.028
pm_Syn_8	12.6566
p_Syn_8	12.6566
q_Syn_8	6.4542

vf_Syn_9	1.0267
pm_Syn_9	19.4536
p_Syn_9	19.4536
q_Syn_9	11.2445
vf_Syn_10	1.0476
pm_Syn_10	5.8595
p_Syn_10	5.8595
q_Syn_10	9.1301
vref_Exc_1	1.0563
vref_Exc_2	1.1432
vref_Exc_3	1.1833
vref_Exc_4	1.2003
vref_Exc_5	1.0381
vref_Exc_6	1.2634
vref_Exc_7	1.0906
vref_Exc_8	1.2373
vref_Exc_9	1.2358
vref_Exc_10	1.2612
wref_Tg_1	1
wref_Tg_2	1
wref_Tg_3	1
wref_Tg_4	1
wref_Tg_5	1
wref_Tg_6	1
wref_Tg_7	1
wref_Tg_8	1
wref_Tg_9	1
wref_Tg_10	1

LINE FLOWS

From Bus	To Bus	Line	P Flow	Q Flow	P Loss	Q Loss
		[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	
BUS01	BUS02	1	-3.1138	1.9266	0.05294	-0.0155
BUS01	BUS39	2	1.5569	-0.96327	0.00618	-0.22853
BUS01	BUS39	3	1.5569	-0.96327	0.00618	-0.22853
BUS02	BUS03	4	8.1184	7.0974	0.18183	1.9219
BUS02	BUS25	5	-5.4256	2.0333	0.28106	0.21902
BUS03	BUS04	6	1.8963	4.8635	0.05712	0.8167
BUS03	BUS18	7	-0.40192	1.2566	0.00331	-0.09226
BUS04	BUS05	8	-3.9602	0.06059	0.02848	0.39587
BUS04	BUS14	9	-5.757	-0.26654	0.06026	0.9088
BUS05	BUS06	10	-11.1615	-1.7156	0.05658	0.71567
BUS05	BUS08	11	7.1729	1.8309	0.09751	1.3014
BUS06	BUS07	12	9.6591	3.4126	0.13538	2.0263
BUS06	BUS11	13	-7.6639	-0.83301	0.08921	0.97807
BUS07	BUS08	14	4.12	-0.55519	0.01684	0.16151
BUS08	BUS09	15	-0.8862	-4.2549	0.10157	1.3764
BUS09	BUS39	16	-0.98777	-5.6313	0.03551	-0.21584
BUS10	BUS11	17	7.8877	3.4848	0.05599	0.5643
BUS10	BUS13	18	7.347	3.1207	0.04798	0.47809
BUS13	BUS14	19	7.173	1.4944	0.09656	1.0001

BUS14	BUS15	20	1.2592	-0.68097	0.00745	-0.08596
BUS15	BUS16	21	-6.1443	-4.1312	0.09967	0.94847
BUS16	BUS17	22	4.8555	-0.71759	0.02853	0.28303
BUS16	BUS19	23	-10.2481	-3.8211	0.32273	3.7151
BUS16	BUS21	24	-7.4931	0.51662	0.07664	1.1414
BUS16	BUS24	25	-0.97139	-1.8041	0.0021	0.00044
BUS17	BUS18	26	4.0767	-0.50386	0.0197	0.1516
BUS17	BUS27	27	0.75024	-0.49676	0.00157	-0.17345
BUS21	BUS22	28	-13.9026	-3.2827	0.26995	4.5465
BUS22	BUS23	29	1.062	1.5724	0.00294	-0.09422
BUS23	BUS24	30	8.3431	3.1992	0.23705	3.5256
BUS25	BUS26	31	1.6581	2.7444	0.04177	0.01485
BUS26	BUS27	32	5.8308	2.8023	0.08484	0.734
BUS26	BUS28	33	-3.1674	-0.27434	0.06176	0.11248
BUS26	BUS29	34	-4.2598	-0.19133	0.14831	0.8406
BUS28	BUS29	35	-7.9903	-1.0247	0.11945	1.0908
BUS02	BUS30	36	-5.8595	-7.1886	0	1.9415
BUS06	BUS31	37	-6.6066	-2.5054	0	6.1342
BUS06	BUS31	38	-6.6066	-2.5054	0	6.1342
BUS10	BUS32	39	-15.2347	-6.6055	0	11.8627
BUS12	BUS11	40	-0.07463	-1.0014	0.00397	0.10796
BUS12	BUS13	41	-0.12183	-1.0325	0.00426	0.11571
BUS19	BUS20	42	4.0074	-1.6249	0.0174	0.34303
BUS19	BUS33	43	-14.5782	-5.9113	0.23464	4.7598
BUS20	BUS34	44	-11.7265	-4.3485	0.18	3.6
BUS22	BUS35	45	-15.2345	-9.4015	0	6.1603
BUS23	BUS36	46	-13.0043	-3.4879	0.12098	6.5814
BUS25	BUS37	47	-12.5419	-2.021	0.11465	4.4332
BUS29	BUS38	48	-19.0702	-3.7692	0.38335	7.4753

LINE FLOWS

From Bus	To Bus	Line	P Flow	Q Flow	P Loss	Q Loss
		[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	
BUS02	BUS01	1	3.1667	-1.9421	0.05294	-0.0155
BUS39	BUS01	2	-1.5507	0.73475	0.00618	-0.22853
BUS39	BUS01	3	-1.5507	0.73475	0.00618	-0.22853
BUS03	BUS02	4	-7.9366	-5.1755	0.18183	1.9219
BUS25	BUS02	5	5.7067	-1.8143	0.28106	0.21902
BUS04	BUS03	6	-1.8391	-4.0468	0.05712	0.8167
BUS18	BUS03	7	0.40523	-1.3488	0.00331	-0.09226
BUS05	BUS04	8	3.9886	0.33528	0.02848	0.39587
BUS14	BUS04	9	5.8172	1.1753	0.06026	0.9088
BUS06	BUS05	10	11.2181	2.4313	0.05658	0.71567
BUS08	BUS05	11	-7.0754	-0.52957	0.09751	1.3014
BUS07	BUS06	12	-9.5237	-1.3863	0.13538	2.0263
BUS11	BUS06	13	7.7531	1.8111	0.08921	0.97807
BUS08	BUS07	14	-4.1031	0.7167	0.01684	0.16151
BUS09	BUS08	15	0.98777	5.6313	0.10157	1.3764
BUS39	BUS09	16	1.0233	5.4155	0.03551	-0.21584
BUS11	BUS10	17	-7.8317	-2.9205	0.05599	0.5643
BUS13	BUS10	18	-7.2991	-2.6426	0.04798	0.47809

BUS14	BUS13	19	-7.0764	-0.49436	0.09656	1.0001
BUS15	BUS14	20	-1.2518	0.59502	0.00745	-0.08596
BUS16	BUS15	21	6.2439	5.0797	0.09967	0.94847
BUS17	BUS16	22	-4.8269	1.0006	0.02853	0.28303
BUS19	BUS16	23	10.5709	7.5362	0.32273	3.7151
BUS21	BUS16	24	7.5698	0.62475	0.07664	1.1414
BUS24	BUS16	25	0.97349	1.8046	0.0021	0.00044
BUS18	BUS17	26	-4.057	0.65546	0.0197	0.1516
BUS27	BUS17	27	-0.74866	0.32331	0.00157	-0.17345
BUS22	BUS21	28	14.1725	7.8291	0.26995	4.5465
BUS23	BUS22	29	-1.0591	-1.6666	0.00294	-0.09422
BUS24	BUS23	30	-8.106	0.32639	0.23705	3.5256
BUS26	BUS25	31	-1.6163	-2.7296	0.04177	0.01485
BUS27	BUS26	32	-5.746	-2.0683	0.08484	0.734
BUS28	BUS26	33	3.2291	0.38683	0.06176	0.11248
BUS29	BUS26	34	4.4081	1.0319	0.14831	0.8406
BUS29	BUS28	35	8.1098	2.1155	0.11945	1.0908
BUS30	BUS02	36	5.8595	9.1301	0	1.9415
BUS31	BUS06	37	6.6066	8.6397	0	6.1342
BUS31	BUS06	38	6.6066	8.6397	0	6.1342
BUS32	BUS10	39	15.2347	18.4681	0	11.8627
BUS11	BUS12	40	0.0786	1.1094	0.00397	0.10796
BUS13	BUS12	41	0.12609	1.1482	0.00426	0.11571
BUS20	BUS19	42	-3.99	1.968	0.0174	0.34303
BUS33	BUS19	43	14.8129	10.6711	0.23464	4.7598
BUS34	BUS20	44	11.9065	7.9485	0.18	3.6
BUS35	BUS22	45	15.2345	15.5618	0	6.1603
BUS36	BUS23	46	13.1253	10.0693	0.12098	6.5814
BUS37	BUS25	47	12.6566	6.4542	0.11465	4.4332
BUS38	BUS29	48	19.4536	11.2445	0.38335	7.4753

GLOBAL SUMMARY REPORT

TOTAL GENERATION

REAL POWER [p.u.] 146.1476

REACTIVE POWER [p.u.] 120.5964

TOTAL LOAD

REAL POWER [p.u.] 142.1534

REACTIVE POWER [p.u.] 32.1126

TOTAL LOSSES

REAL POWER [p.u.] 3.9942

REACTIVE POWER [p.u.] 88.4838

Annexe B.3:Résultats de simulation du réseau IEEE 39-nœuds avec l'insertion
du SPQ au nœud 3

CON

P S A T 2.1.11

Author: Federico Milano, (c) 2002-2019

e-mail: federico.milano@ucd.ie

website: faraday1.ucd.ie/psat.html

File: C:\Program Files\MATLAB\R2015b\toolbox\psat\tests\PFE-25\Nouveau
dossier\b_d_Ieee39SPQselm
Date: 01-Jun-2025 22:39:23

NETWORK STATISTICS

Buses: 39
Lines: 48
Generators: 10
Loads: 19

SOLUTION STATISTICS

Number of Iterations: 376
Maximum P mismatch [p.u.] 0
Maximum Q mismatch [p.u.] 0
Power rate [MVA] 100

POWER FLOW RESULTS

Bus	V [p.u.]	phase [rad]	P gen [p.u.]	Q gen [p.u.]	P load [p.u.]	Q load [p.u.]
BUS01	0.98697	-0.6869	0	0	0	0
BUS02	0.90572	-0.54523	0	0	0	0
BUS03	0.77282	-0.71522	0	0	7.5327	0.05614
BUS04	0.65162	-0.76041	0	0	11.6967	4.3044
BUS05	0.6721	-0.6263	0	0	0	-0.45172
BUS06	0.68363	-0.56225	0	0	0	0
BUS07	0.64894	-0.75558	0	0	5.4694	1.965
BUS08	0.65413	-0.79831	1	1	12.2113	4.1172
BUS09	0.88723	-0.77402	0	0	0	0
BUS10	0.72338	-0.36922	0	0	0	0
BUS11	0.70203	-0.43298	0	0	0	0
BUS12	0.63323	-0.43819	0	0	0.19884	2.0586
BUS13	0.69968	-0.43126	0	0	0	0
BUS14	0.67153	-0.58867	0	0	0	0
BUS15	0.6815	-0.66041	0	0	7.4859	3.5792
BUS16	0.7479	-0.55626	0	0	7.7058	0.7556
BUS17	0.75162	-0.63769	0	0	0	0
BUS18	0.75256	-0.70016	0	0	3.6962	0.7018
BUS19	0.91018	-0.26444	0	0	0	0
BUS20	0.88632	-0.33956	0	0	15.9075	2.4095
BUS21	0.75668	-0.37361	0	0	6.4098	2.6902
BUS22	0.87096	-0.0743	0	0	0	0
BUS23	0.85155	-0.0869	0	0	5.7899	1.9791
BUS24	0.76208	-0.54702	0	0	7.2192	-2.1569
BUS25	0.93152	-0.47233	0	0	5.2401	1.1042
BUS26	0.81839	-0.53	0	0	3.2517	0.39769
BUS27	0.7606	-0.66246	0	0	6.5735	1.7662
BUS28	0.85783	-0.31212	0	0	4.819	0.64566
BUS29	0.9003	-0.15517	0	0	6.632	0.62928

BUS30	1.0475	-0.42885	5.9379	9.8287	0	0
BUS31	0.98193	0	13.5928	17.4435	0.21522	0.10761
BUS32	0.98302	0.11398	15.4386	18.892	0	0
BUS33	0.99715	-0.02006	15.0111	11.3236	0	0
BUS34	1.0123	-0.10149	12.0658	8.3189	0	0
BUS35	1.0492	0.17592	15.4384	16.5812	0	0
BUS36	1.0635	0.31761	13.3009	10.7294	0	0
BUS37	1.0278	-0.15283	12.8259	6.9759	0	0
BUS38	1.0265	0.18163	19.7139	11.9819	0	0
BUS39	1.03	-0.75911	23.7517	12.6618	25.8262	5.8483

STATE VARIABLES

delta_Syn_1	-0.75906
omega_Syn_1	1
e1q_Syn_1	1.03
delta_Syn_2	0.00039
omega_Syn_2	1
e1q_Syn_2	0.98206
e1d_Syn_2	0.00015
delta_Syn_3	0.11436
omega_Syn_3	1
e1q_Syn_3	0.98312
e1d_Syn_3	0.00029
delta_Syn_4	-0.01967
omega_Syn_4	1
e1q_Syn_4	0.9972
e1d_Syn_4	0.00032
delta_Syn_5	-0.10076
omega_Syn_5	1
e1q_Syn_5	1.0124
e1d_Syn_5	0.00058
delta_Syn_6	0.17625
omega_Syn_6	1
e1q_Syn_6	1.0493
e1d_Syn_6	0.00028
delta_Syn_7	0.31795
omega_Syn_7	1
e1q_Syn_7	1.0635
e1d_Syn_7	0.0003
delta_Syn_8	-0.15249
omega_Syn_8	1
e1q_Syn_8	1.0278
e1d_Syn_8	0.00028
delta_Syn_9	0.18202
omega_Syn_9	1
e1q_Syn_9	1.0265
e1d_Syn_9	0.00028
delta_Syn_10	-0.42881
omega_Syn_10	1
e1q_Syn_10	1.0475
e1d_Syn_10	2e-05
vm_Exc_1	1.03

vr1_Exc_1	1.05
vr2_Exc_1	-0.30901
vf_Exc_1	1.03
vm_Exc_2	0.98193
vr1_Exc_2	1.0001
vr2_Exc_2	-1.179
vf_Exc_2	0.98246
vm_Exc_3	0.98302
vr1_Exc_3	1.0012
vr2_Exc_3	-0.7868
vf_Exc_3	0.9835
vm_Exc_4	0.99715
vr1_Exc_4	1.0158
vr2_Exc_4	-0.79796
vf_Exc_4	0.99745
vm_Exc_5	1.0123
vr1_Exc_5	1.0319
vr2_Exc_5	-0.30385
vf_Exc_5	1.0128
vm_Exc_6	1.0492
vr1_Exc_6	1.0706
vr2_Exc_6	-0.67177
vf_Exc_6	1.0497
vm_Exc_7	1.0635
vr1_Exc_7	1.0855
vr2_Exc_7	-0.31914
vf_Exc_7	1.0638
vm_Exc_8	1.0278
vr1_Exc_8	1.0478
vr2_Exc_8	-0.73426
vf_Exc_8	1.028
vm_Exc_9	1.0265
vr1_Exc_9	1.0465
vr2_Exc_9	-0.30801
vf_Exc_9	1.0267
vm_Exc_10	1.0475
vr1_Exc_10	1.0684
vr2_Exc_10	-0.41903
vf_Exc_10	1.0476
tg1_Tg_1	10
tg2_Tg_1	10
tg3_Tg_1	7.6
tg1_Tg_2	5.7229
tg2_Tg_2	5.7229
tg3_Tg_2	4.3494
tg1_Tg_3	6.5
tg2_Tg_3	6.5
tg3_Tg_3	4.94
tg1_Tg_4	6.32
tg2_Tg_4	6.32
tg3_Tg_4	4.8032
tg1_Tg_5	5.08
tg2_Tg_5	5.08

tg3_Tg_5	3.8608
tg1_Tg_6	6.5
tg2_Tg_6	6.5
tg3_Tg_6	4.94
tg1_Tg_7	5.6
tg2_Tg_7	5.6
tg3_Tg_7	4.256
tg1_Tg_8	5.4
tg2_Tg_8	5.4
tg3_Tg_8	4.104
tg1_Tg_9	8.3
tg2_Tg_9	8.3
tg3_Tg_9	6.308
tg1_Tg_10	2.5
tg2_Tg_10	2.5
tg3_Tg_10	1.9
id_Spq_1	2.1618
iq_Spq_1	-0.02792

OTHER ALGEBRAIC VARIABLES

vf_Syn_1	1.03
pm_Syn_1	23.7517
p_Syn_1	23.7517
q_Syn_1	12.6618
vf_Syn_2	0.98246
pm_Syn_2	13.5929
p_Syn_2	13.5928
q_Syn_2	17.4435
vf_Syn_3	0.9835
pm_Syn_3	15.4386
p_Syn_3	15.4386
q_Syn_3	18.892
vf_Syn_4	0.99745
pm_Syn_4	15.0111
p_Syn_4	15.0111
q_Syn_4	11.3236
vf_Syn_5	1.0128
pm_Syn_5	12.0659
p_Syn_5	12.0658
q_Syn_5	8.3189
vf_Syn_6	1.0497
pm_Syn_6	15.4386
p_Syn_6	15.4384
q_Syn_6	16.5812
vf_Syn_7	1.0638
pm_Syn_7	13.3009
p_Syn_7	13.3009
q_Syn_7	10.7294
vf_Syn_8	1.028
pm_Syn_8	12.8259
p_Syn_8	12.8259
q_Syn_8	6.9759

vf_Syn_9	1.0267
pm_Syn_9	19.7139
p_Syn_9	19.7139
q_Syn_9	11.9819
vf_Syn_10	1.0476
pm_Syn_10	5.9379
p_Syn_10	5.9379
q_Syn_10	9.8287
vref_Exc_1	1.0563
vref_Exc_2	1.1432
vref_Exc_3	1.1833
vref_Exc_4	1.2003
vref_Exc_5	1.0381
vref_Exc_6	1.2634
vref_Exc_7	1.0906
vref_Exc_8	1.2373
vref_Exc_9	1.2358
vref_Exc_10	1.2612
wref_Tg_1	1
wref_Tg_2	1
wref_Tg_3	1
wref_Tg_4	1
wref_Tg_5	1
wref_Tg_6	1
wref_Tg_7	1
wref_Tg_8	1
wref_Tg_9	1
wref_Tg_10	1

LINE FLOWS

From Bus	To Bus	Line	P Flow	Q Flow	P Loss	Q Loss
		[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	
BUS01	BUS02	1	-2.8655	2.0727	0.05042	-0.03477
BUS01	BUS39	2	1.4327	-1.0364	0.00571	-0.23879
BUS01	BUS39	3	1.4327	-1.0364	0.00571	-0.23879
BUS02	BUS03	4	8.5227	7.8003	0.21416	2.3052
BUS02	BUS25	5	-5.5007	1.9607	0.29303	0.23678
BUS03	BUS04	6	1.3329	4.2743	0.04487	0.62211
BUS03	BUS18	7	-0.55706	1.1646	0.00335	-0.08387
BUS04	BUS05	8	-4.6027	-0.47624	0.04029	0.58587
BUS04	BUS14	9	-5.8059	-0.17593	0.06355	0.96427
BUS05	BUS06	10	-11.4455	-1.7486	0.05934	0.75147
BUS05	BUS08	11	6.8025	1.1382	0.08438	1.1165
BUS06	BUS07	12	9.4512	2.8338	0.12518	1.8693
BUS06	BUS11	13	-7.5785	-0.43062	0.08626	0.9438
BUS07	BUS08	14	3.8567	-1.0005	0.01505	0.13994
BUS08	BUS09	15	-0.65153	-4.2359	0.09506	1.2692
BUS09	BUS39	16	-0.74659	-5.5051	0.03288	-0.28673
BUS10	BUS11	17	7.8147	3.0863	0.05405	0.54404
BUS10	BUS13	18	7.6239	3.4858	0.05382	0.54165
BUS13	BUS14	19	7.4585	1.8185	0.10863	1.1381

BUS14	BUS15	20	1.4803	-0.45984	0.00932	-0.05522
BUS15	BUS16	21	-6.0149	-3.9838	0.10025	0.95952
BUS16	BUS17	22	5.0979	-0.54183	0.03284	0.34211
BUS16	BUS19	23	-10.3627	-3.983	0.35063	4.0624
BUS16	BUS21	24	-7.5751	0.58829	0.08269	1.2512
BUS16	BUS24	25	-0.98091	-1.7624	0.00215	0.00344
BUS17	BUS18	26	4.2794	-0.35403	0.02282	0.19266
BUS17	BUS27	27	0.78564	-0.52991	0.00186	-0.15906
BUS21	BUS22	28	-14.0676	-3.3532	0.29153	4.9311
BUS22	BUS23	29	1.0793	1.6298	0.00321	-0.08564
BUS23	BUS24	30	8.458	3.4426	0.25578	3.8336
BUS25	BUS26	31	1.671	2.9138	0.04657	0.07572
BUS26	BUS27	32	5.8812	2.9479	0.09147	0.81087
BUS26	BUS28	33	-3.2051	-0.30132	0.06596	0.1788
BUS26	BUS29	34	-4.3033	-0.20625	0.15777	0.96827
BUS28	BUS29	35	-8.0901	-1.1258	0.12655	1.1724
BUS02	BUS30	36	-5.9379	-7.6535	0	2.1752
BUS06	BUS31	37	-6.6888	-2.4516	0	6.2163
BUS06	BUS31	38	-6.6888	-2.4516	0	6.2163
BUS10	BUS32	39	-15.4386	-6.5721	0	12.3199
BUS12	BUS11	40	-0.09141	-1.0467	0.00446	0.12119
BUS12	BUS13	41	-0.10743	-1.012	0.00418	0.1137
BUS19	BUS20	42	4.0488	-1.7709	0.01854	0.36553
BUS19	BUS33	43	-14.7621	-6.2744	0.2489	5.0492
BUS20	BUS34	44	-11.8772	-4.546	0.18864	3.7729
BUS22	BUS35	45	-15.4384	-9.914	0	6.6672
BUS23	BUS36	46	-13.1718	-3.7062	0.1291	7.0232
BUS25	BUS37	47	-12.7048	-2.2941	0.12108	4.6819
BUS29	BUS38	48	-19.3098	-4.102	0.4041	7.8799

LINE FLOWS

From Bus	To Bus	Line	P Flow	Q Flow	P Loss	Q Loss
		[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	
BUS02	BUS01	1	2.9159	-2.1075	0.05042	-0.03477
BUS39	BUS01	2	-1.427	0.79757	0.00571	-0.23879
BUS39	BUS01	3	-1.427	0.79757	0.00571	-0.23879
BUS03	BUS02	4	-8.3085	-5.4951	0.21416	2.3052
BUS25	BUS02	5	5.7937	-1.7239	0.29303	0.23678
BUS04	BUS03	6	-1.2881	-3.6522	0.04487	0.62211
BUS18	BUS03	7	0.56041	-1.2485	0.00335	-0.08387
BUS05	BUS04	8	4.643	1.0621	0.04029	0.58587
BUS14	BUS04	9	5.8695	1.1402	0.06355	0.96427
BUS06	BUS05	10	11.5048	2.5001	0.05934	0.75147
BUS08	BUS05	11	-6.7181	-0.02175	0.08438	1.1165
BUS07	BUS06	12	-9.3261	-0.96455	0.12518	1.8693
BUS11	BUS06	13	7.6648	1.3744	0.08626	0.9438
BUS08	BUS07	14	-3.8417	1.1404	0.01505	0.13994
BUS09	BUS08	15	0.74659	5.5051	0.09506	1.2692
BUS39	BUS09	16	0.77947	5.2183	0.03288	-0.28673
BUS11	BUS10	17	-7.7606	-2.5423	0.05405	0.54404
BUS13	BUS10	18	-7.5701	-2.9441	0.05382	0.54165

BUS14	BUS13	19	-7.3498	-0.68036	0.10863	1.1381
BUS15	BUS14	20	-1.471	0.40462	0.00932	-0.05522
BUS16	BUS15	21	6.1151	4.9433	0.10025	0.95952
BUS17	BUS16	22	-5.065	0.88394	0.03284	0.34211
BUS19	BUS16	23	10.7133	8.0454	0.35063	4.0624
BUS21	BUS16	24	7.6578	0.66292	0.08269	1.2512
BUS24	BUS16	25	0.98306	1.7659	0.00215	0.00344
BUS18	BUS17	26	-4.2566	0.54669	0.02282	0.19266
BUS27	BUS17	27	-0.78377	0.37084	0.00186	-0.15906
BUS22	BUS21	28	14.3591	8.2842	0.29153	4.9311
BUS23	BUS22	29	-1.0761	-1.7154	0.00321	-0.08564
BUS24	BUS23	30	-8.2022	0.39101	0.25578	3.8336
BUS26	BUS25	31	-1.6244	-2.838	0.04657	0.07572
BUS27	BUS26	32	-5.7898	-2.137	0.09147	0.81087
BUS28	BUS26	33	3.2711	0.48011	0.06596	0.1788
BUS29	BUS26	34	4.4611	1.1745	0.15777	0.96827
BUS29	BUS28	35	8.2167	2.2982	0.12655	1.1724
BUS30	BUS02	36	5.9379	9.8287	0	2.1752
BUS31	BUS06	37	6.6888	8.6679	0	6.2163
BUS31	BUS06	38	6.6888	8.6679	0	6.2163
BUS32	BUS10	39	15.4386	18.892	0	12.3199
BUS11	BUS12	40	0.09587	1.1679	0.00446	0.12119
BUS13	BUS12	41	0.11161	1.1257	0.00418	0.1137
BUS20	BUS19	42	-4.0303	2.1365	0.01854	0.36553
BUS33	BUS19	43	15.0111	11.3236	0.2489	5.0492
BUS34	BUS20	44	12.0658	8.3189	0.18864	3.7729
BUS35	BUS22	45	15.4384	16.5812	0	6.6672
BUS36	BUS23	46	13.3009	10.7294	0.1291	7.0232
BUS37	BUS25	47	12.8259	6.9759	0.12108	4.6819
BUS38	BUS29	48	19.7139	11.9819	0.4041	7.8799

GLOBAL SUMMARY REPORT

TOTAL GENERATION

REAL POWER [p.u.] 148.0769

REACTIVE POWER [p.u.] 125.7368

TOTAL LOAD

REAL POWER [p.u.] 143.8807

REACTIVE POWER [p.u.] 32.5072

TOTAL LOSSES

REAL POWER [p.u.] 4.1962

REACTIVE POWER [p.u.] 93.2297

CON: **Annexe B.4:**Résultats de simulation du réseau IEEE 39-nœuds avec l'insertion du SPQ au nœud 8

PSAT 2.1.11

Author: Federico Milano, (c) 2002-2019

e-mail: federico.milano@ucd.ie

website: faraday1.ucd.ie/psat.html

File: C:\Program Files\MATLAB\R2015b\toolbox\psat\tests\PFE-25\Nouveau
dossier\b_d_Ieee39SPQselm
Date: 01-Jun-2025 22:42:46

NETWORK STATISTICS

Buses: 39
Lines: 48
Generators: 10
Loads: 19

SOLUTION STATISTICS

Number of Iterations: 336
Maximum P mismatch [p.u.] 0
Maximum Q mismatch [p.u.] 0
Power rate [MVA] 100

POWER FLOW RESULTS

Bus	V [p.u.]	phase [rad]	P gen [p.u.]	Q gen [p.u.]	P load [p.u.]	Q load [p.u.]
BUS01	0.98991	-0.66699	0	0	0	0
BUS02	0.91587	-0.51648	0	0	0	0
BUS03	0.79198	-0.67475	0	0	7.4372	0.05543
BUS04	0.66061	-0.73625	0	0	11.5484	4.2498
BUS05	0.66835	-0.62075	0	0	0	-0.44669
BUS06	0.67978	-0.55756	0	0	0	0
BUS07	0.63743	-0.75915	0	0	5.4	1.9401
BUS08	0.63946	-0.80619	0	0	12.0565	4.065
BUS09	0.88107	-0.76637	0	0	0	0
BUS10	0.72762	-0.36316	0	0	0	0
BUS11	0.70371	-0.42679	0	0	0	0
BUS12	0.639	-0.4303	0	0	0.19632	2.0325
BUS13	0.70638	-0.42202	0	0	0	0
BUS14	0.683	-0.56934	0	0	0	0
BUS15	0.70367	-0.62434	0	0	7.391	3.5338
BUS16	0.7717	-0.52311	0	0	7.6081	0.74603
BUS17	0.77967	-0.59465	0	0	0	0
BUS18	0.78477	-0.64764	1	1	3.6493	0.6929
BUS19	0.92094	-0.24673	0	0	0	0
BUS20	0.89327	-0.31942	0	0	15.7058	2.379
BUS21	0.78004	-0.35347	0	0	6.3285	2.6561
BUS22	0.88613	-0.07197	0	0	0	0
BUS23	0.86772	-0.08393	0	0	5.7165	1.954
BUS24	0.78569	-0.51452	0	0	7.1277	-2.1295
BUS25	0.94173	-0.44522	0	0	5.1737	1.0902
BUS26	0.83903	-0.49711	0	0	3.2105	0.39265
BUS27	0.78633	-0.61916	0	0	6.4902	1.7438
BUS28	0.87298	-0.29066	0	0	4.7579	0.63747
BUS29	0.91176	-0.14019	0	0	6.5479	0.6213

BUS30	1.0475	-0.403	5.8555	9.2425	0	0
BUS31	0.98193	0	13.4157	17.4997	0.21249	0.10625
BUS32	0.98303	0.10976	15.2242	18.5616	0	0
BUS33	0.99716	-0.00817	14.8027	10.5646	0	0
BUS34	1.0123	-0.08626	11.8983	7.894	0	0
BUS35	1.0492	0.1704	15.2241	15.4082	0	0
BUS36	1.0635	0.30716	13.1163	9.975	0	0
BUS37	1.0278	-0.13356	12.6478	6.4627	0	0
BUS38	1.0265	0.18806	19.4402	11.1387	0	0
BUS39	1.03	-0.74492	23.4219	12.7424	25.4989	5.7742

STATE VARIABLES

delta_Syn_1	-0.74488
omega_Syn_1	1
e1q_Syn_1	1.03
delta_Syn_2	0.00039
omega_Syn_2	1
e1q_Syn_2	0.98206
e1d_Syn_2	0.00015
delta_Syn_3	0.11014
omega_Syn_3	1
e1q_Syn_3	0.98313
e1d_Syn_3	0.00028
delta_Syn_4	-0.00779
omega_Syn_4	1
e1q_Syn_4	0.9972
e1d_Syn_4	0.00032
delta_Syn_5	-0.08554
omega_Syn_5	1
e1q_Syn_5	1.0124
e1d_Syn_5	0.00057
delta_Syn_6	0.17072
omega_Syn_6	1
e1q_Syn_6	1.0493
e1d_Syn_6	0.00028
delta_Syn_7	0.30749
omega_Syn_7	1
e1q_Syn_7	1.0635
e1d_Syn_7	0.0003
delta_Syn_8	-0.13323
omega_Syn_8	1
e1q_Syn_8	1.0278
e1d_Syn_8	0.00027
delta_Syn_9	0.18844
omega_Syn_9	1
e1q_Syn_9	1.0265
e1d_Syn_9	0.00028
delta_Syn_10	-0.40296
omega_Syn_10	1
e1q_Syn_10	1.0475
e1d_Syn_10	2e-05
vm_Exc_1	1.03

vr1_Exc_1	1.05
vr2_Exc_1	-0.30901
vf_Exc_1	1.03
vm_Exc_2	0.98193
vr1_Exc_2	1.0001
vr2_Exc_2	-1.179
vf_Exc_2	0.98246
vm_Exc_3	0.98303
vr1_Exc_3	1.0012
vr2_Exc_3	-0.7868
vf_Exc_3	0.9835
vm_Exc_4	0.99716
vr1_Exc_4	1.0158
vr2_Exc_4	-0.79795
vf_Exc_4	0.99743
vm_Exc_5	1.0123
vr1_Exc_5	1.0319
vr2_Exc_5	-0.30384
vf_Exc_5	1.0128
vm_Exc_6	1.0492
vr1_Exc_6	1.0706
vr2_Exc_6	-0.67176
vf_Exc_6	1.0496
vm_Exc_7	1.0635
vr1_Exc_7	1.0855
vr2_Exc_7	-0.31913
vf_Exc_7	1.0638
vm_Exc_8	1.0278
vr1_Exc_8	1.0478
vr2_Exc_8	-0.73425
vf_Exc_8	1.028
vm_Exc_9	1.0265
vr1_Exc_9	1.0465
vr2_Exc_9	-0.30801
vf_Exc_9	1.0267
vm_Exc_10	1.0475
vr1_Exc_10	1.0684
vr2_Exc_10	-0.41903
vf_Exc_10	1.0476
tg1_Tg_1	10
tg2_Tg_1	10
tg3_Tg_1	7.6
tg1_Tg_2	5.7279
tg2_Tg_2	5.7279
tg3_Tg_2	4.3532
tg1_Tg_3	6.5
tg2_Tg_3	6.5
tg3_Tg_3	4.94
tg1_Tg_4	6.32
tg2_Tg_4	6.32
tg3_Tg_4	4.8032
tg1_Tg_5	5.08
tg2_Tg_5	5.08

tg3_Tg_5	3.8608
tg1_Tg_6	6.5
tg2_Tg_6	6.5
tg3_Tg_6	4.94
tg1_Tg_7	5.6
tg2_Tg_7	5.6
tg3_Tg_7	4.256
tg1_Tg_8	5.4
tg2_Tg_8	5.4
tg3_Tg_8	4.104
tg1_Tg_9	8.3
tg2_Tg_9	8.3
tg3_Tg_9	6.308
tg1_Tg_10	2.5
tg2_Tg_10	2.5
tg3_Tg_10	1.9
id_Spq_1	1.785
iq_Spq_1	0.24746

OTHER ALGEBRAIC VARIABLES

vf_Syn_1	1.03
pm_Syn_1	23.4219
p_Syn_1	23.4219
q_Syn_1	12.7424
vf_Syn_2	0.98246
pm_Syn_2	13.4158
p_Syn_2	13.4157
q_Syn_2	17.4997
vf_Syn_3	0.9835
pm_Syn_3	15.2243
p_Syn_3	15.2242
q_Syn_3	18.5616
vf_Syn_4	0.99743
pm_Syn_4	14.8027
p_Syn_4	14.8027
q_Syn_4	10.5646
vf_Syn_5	1.0128
pm_Syn_5	11.8983
p_Syn_5	11.8983
q_Syn_5	7.894
vf_Syn_6	1.0496
pm_Syn_6	15.2243
p_Syn_6	15.2241
q_Syn_6	15.4082
vf_Syn_7	1.0638
pm_Syn_7	13.1163
p_Syn_7	13.1163
q_Syn_7	9.975
vf_Syn_8	1.028
pm_Syn_8	12.6478
p_Syn_8	12.6478
q_Syn_8	6.4627

vf_Syn_9	1.0267
pm_Syn_9	19.4402
p_Syn_9	19.4402
q_Syn_9	11.1387
vf_Syn_10	1.0476
pm_Syn_10	5.8555
p_Syn_10	5.8555
q_Syn_10	9.2425
vref_Exc_1	1.0563
vref_Exc_2	1.1432
vref_Exc_3	1.1833
vref_Exc_4	1.2003
vref_Exc_5	1.0381
vref_Exc_6	1.2634
vref_Exc_7	1.0906
vref_Exc_8	1.2373
vref_Exc_9	1.2358
vref_Exc_10	1.2612
wref_Tg_1	1
wref_Tg_2	1
wref_Tg_3	1
wref_Tg_4	1
wref_Tg_5	1
wref_Tg_6	1
wref_Tg_7	1
wref_Tg_8	1
wref_Tg_9	1
wref_Tg_10	1

LINE FLOWS

From Bus	To Bus	Line	P Flow	Q Flow	P Loss	Q Loss
		[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	
BUS01	BUS02	1	-3.1119	1.9555	0.05345	-0.00778
BUS01	BUS39	2	1.5559	-0.97773	0.00623	-0.22696
BUS01	BUS39	3	1.5559	-0.97773	0.00623	-0.22696
BUS02	BUS03	4	8.209	7.3	0.18949	2.0124
BUS02	BUS25	5	-5.5188	1.931	0.28729	0.22699
BUS03	BUS04	6	1.8037	4.7516	0.05492	0.78203
BUS03	BUS18	7	-1.2214	0.48051	0.00314	-0.0949
BUS04	BUS05	8	-3.9702	0.04905	0.02891	0.40324
BUS04	BUS14	9	-5.8294	-0.32927	0.06246	0.94477
BUS05	BUS06	10	-11.1681	-1.7407	0.05719	0.7237
BUS05	BUS08	11	7.1691	1.8332	0.09828	1.3128
BUS06	BUS07	12	9.656	3.4274	0.13655	2.0447
BUS06	BUS11	13	-7.6782	-0.86247	0.09035	0.99189
BUS07	BUS08	14	4.1194	-0.5574	0.01699	0.16364
BUS08	BUS09	15	-0.88331	-4.2658	0.10304	1.4008
BUS09	BUS39	16	-0.98635	-5.6666	0.0361	-0.1999
BUS10	BUS11	17	7.9021	3.5324	0.05671	0.57225
BUS10	BUS13	18	7.3222	3.1015	0.04787	0.47706
BUS13	BUS14	19	7.1465	1.4727	0.09626	0.99713

BUS14	BUS15	20	1.1584	-0.79845	0.00714	-0.08991
BUS15	BUS16	21	-6.2397	-4.2424	0.10283	0.98077
BUS16	BUS17	22	4.7617	-0.93258	0.02759	0.27002
BUS16	BUS19	23	-10.2475	-3.7726	0.31856	3.663
BUS16	BUS21	24	-7.4921	0.53182	0.0759	1.1274
BUS16	BUS24	25	-0.97281	-1.7958	0.00206	-0.00063
BUS17	BUS18	26	3.8919	-0.75206	0.01803	0.13045
BUS17	BUS27	27	0.84227	-0.45055	0.00178	-0.17344
BUS21	BUS22	28	-13.8965	-3.2517	0.26715	4.4964
BUS22	BUS23	29	1.0604	1.5657	0.00291	-0.09541
BUS23	BUS24	30	8.3372	3.1519	0.23468	3.4863
BUS25	BUS26	31	1.5535	2.6459	0.0385	-0.01946
BUS26	BUS27	32	5.7306	2.7115	0.08085	0.69055
BUS26	BUS28	33	-3.1663	-0.26016	0.06124	0.10315
BUS26	BUS29	34	-4.2598	-0.17863	0.1472	0.82409
BUS28	BUS29	35	-7.9855	-1.0008	0.11865	1.0814
BUS02	BUS30	36	-5.8555	-7.2678	0	1.9748
BUS06	BUS31	37	-6.6016	-2.5146	0	6.1821
BUS06	BUS31	38	-6.6016	-2.5146	0	6.1821
BUS10	BUS32	39	-15.2242	-6.6339	0	11.9277
BUS12	BUS11	40	-0.07285	-0.99788	0.00397	0.10793
BUS12	BUS13	41	-0.12348	-1.0346	0.00431	0.11706
BUS19	BUS20	42	4.0038	-1.5941	0.01722	0.33952
BUS19	BUS33	43	-14.5698	-5.8414	0.23283	4.7232
BUS20	BUS34	44	-11.7193	-4.3126	0.17907	3.5814
BUS22	BUS35	45	-15.2241	-9.3138	0	6.0944
BUS23	BUS36	46	-12.9962	-3.4448	0.12004	6.5302
BUS25	BUS37	47	-12.5332	-2.032	0.11459	4.4308
BUS29	BUS38	48	-19.059	-3.7062	0.38116	7.4325

LINE FLOWS

From Bus	To Bus	Line	P Flow	Q Flow	P Loss	Q Loss
		[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	
BUS02	BUS01	1	3.1653	-1.9632	0.05345	-0.00778
BUS39	BUS01	2	-1.5497	0.75077	0.00623	-0.22696
BUS39	BUS01	3	-1.5497	0.75077	0.00623	-0.22696
BUS03	BUS02	4	-8.0195	-5.2876	0.18949	2.0124
BUS25	BUS02	5	5.8061	-1.704	0.28729	0.22699
BUS04	BUS03	6	-1.7488	-3.9696	0.05492	0.78203
BUS18	BUS03	7	1.2246	-0.57541	0.00314	-0.0949
BUS05	BUS04	8	3.9991	0.35419	0.02891	0.40324
BUS14	BUS04	9	5.8919	1.274	0.06246	0.94477
BUS06	BUS05	10	11.2253	2.4644	0.05719	0.7237
BUS08	BUS05	11	-7.0708	-0.52034	0.09828	1.3128
BUS07	BUS06	12	-9.5195	-1.3827	0.13655	2.0447
BUS11	BUS06	13	7.7685	1.8544	0.09035	0.99189
BUS08	BUS07	14	-4.1024	0.72104	0.01699	0.16364
BUS09	BUS08	15	0.98635	5.6666	0.10304	1.4008
BUS39	BUS09	16	1.0224	5.4667	0.0361	-0.1999
BUS11	BUS10	17	-7.8453	-2.9602	0.05671	0.57225
BUS13	BUS10	18	-7.2743	-2.6244	0.04787	0.47706

BUS14	BUS13	19	-7.0503	-0.47559	0.09626	0.99713
BUS15	BUS14	20	-1.1512	0.70855	0.00714	-0.08991
BUS16	BUS15	21	6.3426	5.2231	0.10283	0.98077
BUS17	BUS16	22	-4.7342	1.2026	0.02759	0.27002
BUS19	BUS16	23	10.566	7.4355	0.31856	3.663
BUS21	BUS16	24	7.568	0.59561	0.0759	1.1274
BUS24	BUS16	25	0.97488	1.7952	0.00206	-0.00063
BUS18	BUS17	26	-3.8739	0.88251	0.01803	0.13045
BUS27	BUS17	27	-0.84049	0.2771	0.00178	-0.17344
BUS22	BUS21	28	14.1637	7.7481	0.26715	4.4964
BUS23	BUS22	29	-1.0575	-1.6612	0.00291	-0.09541
BUS24	BUS23	30	-8.1026	0.33432	0.23468	3.4863
BUS26	BUS25	31	-1.515	-2.6653	0.0385	-0.01946
BUS27	BUS26	32	-5.6497	-2.0209	0.08085	0.69055
BUS28	BUS26	33	3.2276	0.36331	0.06124	0.10315
BUS29	BUS26	34	4.4069	1.0027	0.1472	0.82409
BUS29	BUS28	35	8.1042	2.0822	0.11865	1.0814
BUS30	BUS02	36	5.8555	9.2425	0	1.9748
BUS31	BUS06	37	6.6016	8.6967	0	6.1821
BUS31	BUS06	38	6.6016	8.6967	0	6.1821
BUS32	BUS10	39	15.2242	18.5616	0	11.9277
BUS11	BUS12	40	0.07681	1.1058	0.00397	0.10793
BUS13	BUS12	41	0.12778	1.1517	0.00431	0.11706
BUS20	BUS19	42	-3.9866	1.9336	0.01722	0.33952
BUS33	BUS19	43	14.8027	10.5646	0.23283	4.7232
BUS34	BUS20	44	11.8983	7.894	0.17907	3.5814
BUS35	BUS22	45	15.2241	15.4082	0	6.0944
BUS36	BUS23	46	13.1163	9.975	0.12004	6.5302
BUS37	BUS25	47	12.6478	6.4627	0.11459	4.4308
BUS38	BUS29	48	19.4402	11.1387	0.38116	7.4325

GLOBAL SUMMARY REPORT

TOTAL GENERATION

REAL POWER [p.u.] 146.0466

REACTIVE POWER [p.u.] 120.4895

TOTAL LOAD

REAL POWER [p.u.] 142.0569

REACTIVE POWER [p.u.] 32.0944

TOTAL LOSSES

REAL POWER [p.u.] 3.9897

REACTIVE POWER [p.u.] 88.3951

Annexe B.5:Résultats de simulation du réseau IEEE 39-nœuds avec l'insertion du SPQ au nœud 18

CONTINUATION POWER FLOW REPORT

P S A T 2.1.11

Author: Federico Milano, (c) 2002-2019

e-mail: federico.milano@ucd.ie

website: faraday1.ucd.ie/psat.html

File: C:\Program Files\MATLAB\R2015b\toolbox\psat\tests\PFE-25\Nouveau
dossier\b_d_Ieee39SPQ8
Date: 23-May-2025 19:55:52

NETWORK STATISTICS

Buses: 39
Lines: 48
Generators: 10
Loads: 19

SOLUTION STATISTICS

Number of Iterations: 400
Maximum P mismatch [p.u.] 0
Maximum Q mismatch [p.u.] 0
Power rate [MVA] 100

POWER FLOW RESULTS

Bus	V [p.u.]	phase [rad]	P gen [p.u.]	Q gen [p.u.]	P load [p.u.]	Q load [p.u.]
BUS01	0.99575	-0.61251	0	0	0	0
BUS02	0.92786	-0.47723	0	0	0	0
BUS03	0.82097	-0.63745	0	0	7.6568	0.05707
BUS04	0.72362	-0.6774	0	0	11.8895	4.3753
BUS05	0.73975	-0.56856	0	0	0	-0.54723
BUS06	0.74921	-0.51483	0	0	0	0
BUS07	0.71729	-0.67747	0	0	5.5595	1.9974
BUS08	0.721	-0.71346	1	1	12.4126	4.1851
BUS09	0.91483	-0.69572	0	0	0	0
BUS10	0.78506	-0.35035	0	0	0	0
BUS11	0.76621	-0.40509	0	0	0	0
BUS12	0.7059	-0.40943	0	0	0.20212	2.0926
BUS13	0.76738	-0.40365	0	0	0	0
BUS14	0.74967	-0.53489	0	0	0	0
BUS15	0.78269	-0.59035	0	2e-05	7.6093	0.5074
BUS16	0.81342	-0.50076	0	0	7.8328	0.76806
BUS17	0.80874	-0.56984	0	0	0	0
BUS18	0.80683	-0.62454	0	0	3.7571	0.71337
BUS19	0.93533	-0.23332	0	0	0	0
BUS20	0.89982	-0.30648	0	0	16.1697	2.4492
BUS21	0.81022	-0.34073	0	0	6.5154	2.7346
BUS22	0.90194	-0.06625	0	0	0	0
BUS23	0.88378	-0.07813	0	0	5.8853	2.0117
BUS24	0.82417	-0.4927	0	0	7.3382	-2.1924
BUS25	0.95003	-0.40503	0	0	5.3265	1.1224
BUS26	0.85024	-0.46476	0	0	3.3053	0.40424
BUS27	0.80549	-0.58942	0	0	6.6819	1.7953
BUS28	0.87488	-0.25651	0	0	4.8985	0.6563
BUS29	0.91189	-0.10226	0	0	6.7413	0.63965

BUS30	1.0475	-0.36217	6.0149	8.5791	0	0
BUS31	0.98194	0	13.7605	14.7405	0.21877	0.10938
BUS32	0.98303	0.09818	15.6386	15.8222	0	0
BUS33	0.99716	0.00898	15.2056	9.6824	0	0
BUS34	1.0123	-0.06809	12.2222	7.5837	0	0
BUS35	1.0493	0.1784	15.6384	14.3452	0	0
BUS36	1.0635	0.31696	13.4733	9.4408	0	0
BUS37	1.0278	-0.08719	12.9921	6.1911	0	0
BUS38	1.0265	0.23537	19.9693	11.2828	0	0
BUS39	1.03	-0.68347	24.0594	11.2601	26.252	5.9448

STATE VARIABLES

delta_Syn_1	-0.68342
omega_Syn_1	1
e1q_Syn_1	1.03
delta_Syn_2	0.0004
omega_Syn_2	1
e1q_Syn_2	0.98205
e1d_Syn_2	0.00016
delta_Syn_3	0.09857
omega_Syn_3	1
e1q_Syn_3	0.98312
e1d_Syn_3	0.00029
delta_Syn_4	0.00937
omega_Syn_4	1
e1q_Syn_4	0.9972
e1d_Syn_4	0.00033
delta_Syn_5	-0.06735
omega_Syn_5	1
e1q_Syn_5	1.0124
e1d_Syn_5	0.00059
delta_Syn_6	0.17873
omega_Syn_6	1
e1q_Syn_6	1.0493
e1d_Syn_6	0.00028
delta_Syn_7	0.3173
omega_Syn_7	1
e1q_Syn_7	1.0635
e1d_Syn_7	0.00031
delta_Syn_8	-0.08684
omega_Syn_8	1
e1q_Syn_8	1.0278
e1d_Syn_8	0.00028
delta_Syn_9	0.23576
omega_Syn_9	1
e1q_Syn_9	1.0265
e1d_Syn_9	0.00029
delta_Syn_10	-0.36213
omega_Syn_10	1
e1q_Syn_10	1.0475
e1d_Syn_10	2e-05
vm_Exc_1	1.03

vr1_Exc_1	1.05
vr2_Exc_1	-0.30901
vf_Exc_1	1.03
vm_Exc_2	0.98194
vr1_Exc_2	1
vr2_Exc_2	-1.1789
vf_Exc_2	0.98239
vm_Exc_3	0.98303
vr1_Exc_3	1.0011
vr2_Exc_3	-0.78675
vf_Exc_3	0.98344
vm_Exc_4	0.99716
vr1_Exc_4	1.0158
vr2_Exc_4	-0.79793
vf_Exc_4	0.99741
vm_Exc_5	1.0123
vr1_Exc_5	1.0319
vr2_Exc_5	-0.30384
vf_Exc_5	1.0128
vm_Exc_6	1.0493
vr1_Exc_6	1.0705
vr2_Exc_6	-0.67175
vf_Exc_6	1.0496
vm_Exc_7	1.0635
vr1_Exc_7	1.0855
vr2_Exc_7	-0.31913
vf_Exc_7	1.0638
vm_Exc_8	1.0278
vr1_Exc_8	1.0478
vr2_Exc_8	-0.73425
vf_Exc_8	1.0279
vm_Exc_9	1.0265
vr1_Exc_9	1.0465
vr2_Exc_9	-0.30801
vf_Exc_9	1.0267
vm_Exc_10	1.0475
vr1_Exc_10	1.0684
vr2_Exc_10	-0.41903
vf_Exc_10	1.0476
tg1_Tg_1	10
tg2_Tg_1	10
tg3_Tg_1	7.6
tg1_Tg_2	5.7194
tg2_Tg_2	5.7194
tg3_Tg_2	4.3468
tg1_Tg_3	6.5
tg2_Tg_3	6.5
tg3_Tg_3	4.94
tg1_Tg_4	6.32
tg2_Tg_4	6.32
tg3_Tg_4	4.8032
tg1_Tg_5	5.08
tg2_Tg_5	5.08

tg3_Tg_5	3.8608
tg1_Tg_6	6.5
tg2_Tg_6	6.5
tg3_Tg_6	4.94
tg1_Tg_7	5.6
tg2_Tg_7	5.6
tg3_Tg_7	4.256
tg1_Tg_8	5.4
tg2_Tg_8	5.4
tg3_Tg_8	4.104
tg1_Tg_9	8.3
tg2_Tg_9	8.3
tg3_Tg_9	6.308
tg1_Tg_10	2.5
tg2_Tg_10	2.5
tg3_Tg_10	1.9
ist_Statcom_1	4
id_Spq_1	1.9564
iq_Spq_1	0.14099

OTHER ALGEBRAIC VARIABLES

vf_Syn_1	1.03
pm_Syn_1	24.0594
p_Syn_1	24.0594
q_Syn_1	11.2601
vf_Syn_2	0.98239
pm_Syn_2	13.7606
p_Syn_2	13.7605
q_Syn_2	14.7405
vf_Syn_3	0.98344
pm_Syn_3	15.6386
p_Syn_3	15.6386
q_Syn_3	15.8222
vf_Syn_4	0.99741
pm_Syn_4	15.2056
p_Syn_4	15.2056
q_Syn_4	9.6824
vf_Syn_5	1.0128
pm_Syn_5	12.2222
p_Syn_5	12.2222
q_Syn_5	7.5837
vf_Syn_6	1.0496
pm_Syn_6	15.6387
p_Syn_6	15.6384
q_Syn_6	14.3452
vf_Syn_7	1.0638
pm_Syn_7	13.4733
p_Syn_7	13.4733
q_Syn_7	9.4408
vf_Syn_8	1.0279
pm_Syn_8	12.9921
p_Syn_8	12.9921

q_Syn_8	6.1911
vf_Syn_9	1.0267
pm_Syn_9	19.9693
p_Syn_9	19.9693
q_Syn_9	11.2828
vf_Syn_10	1.0476
pm_Syn_10	6.0149
p_Syn_10	6.0149
q_Syn_10	8.5791
vref_Exc_1	1.0563
vref_Exc_2	1.1432
vref_Exc_3	1.1833
vref_Exc_4	1.2003
vref_Exc_5	1.0381
vref_Exc_6	1.2634
vref_Exc_7	1.0906
vref_Exc_8	1.2373
vref_Exc_9	1.2358
vref_Exc_10	1.2612
wref_Tg_1	1
wref_Tg_2	1
wref_Tg_3	1
wref_Tg_4	1
wref_Tg_5	1
wref_Tg_6	1
wref_Tg_7	1
wref_Tg_8	1
wref_Tg_9	1
wref_Tg_10	1
vref_Statcom_1	1.0598

LINE FLOWS

From Bus	To Bus	Line [p.u.]	P Flow [p.u.]	Q Flow [p.u.]	P Loss	Q Loss
BUS01	BUS02	1	-2.8535	1.7468	0.04421	-0.12803
BUS01	BUS39	2	1.4267	-0.87339	0.00506	-0.25835
BUS01	BUS39	3	1.4267	-0.87339	0.00506	-0.25835
BUS02	BUS03	4	8.605	6.3631	0.17509	1.8364
BUS02	BUS25	5	-5.4878	2.2799	0.28949	0.22693
BUS03	BUS04	6	1.3393	3.6179	0.02976	0.35501
BUS03	BUS18	7	-0.56621	0.85173	0.00192	-0.11847
BUS04	BUS05	8	-4.5662	-0.41401	0.03207	0.44133
BUS04	BUS14	9	-6.0138	-0.69841	0.05592	0.82676
BUS05	BUS06	10	-11.5627	-1.5074	0.04968	0.62179
BUS05	BUS08	11	6.9644	1.1993	0.07315	0.94542
BUS06	BUS07	12	9.6373	2.7104	0.10732	1.5847
BUS06	BUS11	13	-7.708	-0.51345	0.07437	0.79146
BUS07	BUS08	14	3.9705	-0.8718	0.01282	0.10709
BUS08	BUS09	15	-0.56371	-3.9102	0.06567	0.77845
BUS09	BUS39	16	-0.62938	-4.6886	0.02142	-0.60331
BUS10	BUS11	17	7.9239	2.8914	0.04626	0.45343

BUS10	BUS13	18	7.7147	2.688	0.0434	0.42257
BUS13	BUS14	19	7.5573	1.1107	0.08935	0.90357
BUS14	BUS15	20	1.3983	-1.318	0.01099	-0.08245
BUS15	BUS16	21	-6.222	-1.743	0.06107	0.52893
BUS16	BUS17	22	5.1181	0.15646	0.02776	0.26461
BUS16	BUS19	23	-10.5427	-2.9341	0.2882	3.2788
BUS16	BUS21	24	-7.7036	1.1888	0.07371	1.076
BUS16	BUS24	25	-0.98769	-1.4511	0.00137	-0.01869
BUS17	BUS18	26	4.3454	-0.10611	0.02021	0.15071
BUS17	BUS27	27	0.74489	-0.00204	0.00112	-0.19455
BUS21	BUS22	28	-14.2927	-2.6218	0.2568	4.3055
BUS22	BUS23	29	1.0889	1.5683	0.00287	-0.10131
BUS23	BUS24	30	8.5544	2.5896	0.22711	3.3496
BUS25	BUS26	31	1.7706	2.5725	0.03899	-0.02335
BUS26	BUS27	32	6.0192	2.2901	0.0811	0.68726
BUS26	BUS28	33	-3.2272	-0.09215	0.06216	0.10465
BUS26	BUS29	34	-4.3657	-0.00627	0.15133	0.85956
BUS28	BUS29	35	-8.1879	-0.8531	0.12367	1.1351
BUS02	BUS30	36	-6.0149	-6.7682	0	1.8109
BUS06	BUS31	37	-6.7709	-2.163	0	5.1525
BUS06	BUS31	38	-6.7709	-2.163	0	5.1525
BUS10	BUS32	39	-15.6386	-5.5795	0	10.2428
BUS12	BUS11	40	-0.09176	-1.0373	0.00352	0.0958
BUS12	BUS13	41	-0.11036	-1.0553	0.00366	0.09946
BUS19	BUS20	42	4.1459	-1.1713	0.01669	0.32897
BUS19	BUS33	43	-14.9768	-5.0416	0.22877	4.6407
BUS20	BUS34	44	-12.0405	-3.9495	0.18171	3.6342
BUS22	BUS35	45	-15.6384	-8.4956	0	5.8496
BUS23	BUS36	46	-13.3536	-2.9317	0.11965	6.5091
BUS25	BUS37	47	-12.8744	-1.642	0.11765	4.5491
BUS29	BUS38	48	-19.5699	-3.4937	0.39944	7.7891

LINE FLOWS

From Bus	To Bus	Line	P Flow	Q Flow	P Loss	Q Loss
		[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	
BUS02	BUS01	1	2.8977	-1.8748	0.04421	-0.12803
BUS39	BUS01	2	-1.4217	0.61504	0.00506	-0.25835
BUS39	BUS01	3	-1.4217	0.61504	0.00506	-0.25835
BUS03	BUS02	4	-8.4299	-4.5267	0.17509	1.8364
BUS25	BUS02	5	5.7773	-2.0529	0.28949	0.22693
BUS04	BUS03	6	-1.3095	-3.2629	0.02976	0.35501
BUS18	BUS03	7	0.56813	-0.9702	0.00192	-0.11847
BUS05	BUS04	8	4.5982	0.85534	0.03207	0.44133
BUS14	BUS04	9	6.0697	1.5252	0.05592	0.82676
BUS06	BUS05	10	11.6124	2.1292	0.04968	0.62179
BUS08	BUS05	11	-6.8913	-0.25385	0.07315	0.94542
BUS07	BUS06	12	-9.53	-1.1256	0.10732	1.5847
BUS11	BUS06	13	7.7823	1.3049	0.07437	0.79146
BUS08	BUS07	14	-3.9576	0.97889	0.01282	0.10709
BUS09	BUS08	15	0.62938	4.6886	0.06567	0.77845
BUS39	BUS09	16	0.6508	4.0853	0.02142	-0.60331

BUS11	BUS10	17	-7.8776	-2.438	0.04626	0.45343
BUS13	BUS10	18	-7.6713	-2.2655	0.0434	0.42257
BUS14	BUS13	19	-7.468	-0.20716	0.08935	0.90357
BUS15	BUS14	20	-1.3873	1.2356	0.01099	-0.08245
BUS16	BUS15	21	6.2831	2.2719	0.06107	0.52893
BUS17	BUS16	22	-5.0903	0.10815	0.02776	0.26461
BUS19	BUS16	23	10.8309	6.2129	0.2882	3.2788
BUS21	BUS16	24	7.7773	-0.11279	0.07371	1.076
BUS24	BUS16	25	0.98905	1.4324	0.00137	-0.01869
BUS18	BUS17	26	-4.3252	0.25683	0.02021	0.15071
BUS27	BUS17	27	-0.74377	-0.19251	0.00112	-0.19455
BUS22	BUS21	28	14.5495	6.9273	0.2568	4.3055
BUS23	BUS22	29	-1.086	-1.6696	0.00287	-0.10131
BUS24	BUS23	30	-8.3273	0.75998	0.22711	3.3496
BUS26	BUS25	31	-1.7316	-2.5959	0.03899	-0.02335
BUS27	BUS26	32	-5.9381	-1.6028	0.0811	0.68726
BUS28	BUS26	33	3.2894	0.1968	0.06216	0.10465
BUS29	BUS26	34	4.517	0.86583	0.15133	0.85956
BUS29	BUS28	35	8.3115	1.9882	0.12367	1.1351
BUS30	BUS02	36	6.0149	8.5791	0	1.8109
BUS31	BUS06	37	6.7709	7.3156	0	5.1525
BUS31	BUS06	38	6.7709	7.3156	0	5.1525
BUS32	BUS10	39	15.6386	15.8222	0	10.2428
BUS11	BUS12	40	0.09528	1.1331	0.00352	0.0958
BUS13	BUS12	41	0.11402	1.1547	0.00366	0.09946
BUS20	BUS19	42	-4.1292	1.5002	0.01669	0.32897
BUS33	BUS19	43	15.2056	9.6824	0.22877	4.6407
BUS34	BUS20	44	12.2222	7.5837	0.18171	3.6342
BUS35	BUS22	45	15.6384	14.3452	0	5.8496
BUS36	BUS23	46	13.4733	9.4408	0.11965	6.5091
BUS37	BUS25	47	12.9921	6.1911	0.11765	4.5491
BUS38	BUS29	48	19.9693	11.2828	0.39944	7.7891

GLOBAL SUMMARY REPORT

TOTAL GENERATION

REAL POWER [p.u.] 149.9742

REACTIVE POWER [p.u.] 109.9279

TOTAL LOAD

REAL POWER [p.u.] 146.2526

REACTIVE POWER [p.u.] 29.8242

TOTAL LOSSES

REAL POWER [p.u.] 3.7216

REACTIVE POWER [p.u.] 80.1037

AnnexeB.6:Résultats de simulation du réseau IEEE 39-nœuds avec le système hybride STATCOM+ SPQ