



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET.



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE
ET INFORMATIQUE INDUSTRIELLE



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Génie Electrique

Option : Informatique Industrielle

Présenté par :

KADARI Abed Abdelmoudjib
MOUDJAHED Abderrahmane Yassine

Sujet du mémoire

CONDUITE DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES DANS LES SMART GRIDS

Soutenu publiquement devant le jury composé de :

M^{me} H. BOURENANE

Présidente

Mr A. BENAYADA

Rapporteur

M^{me} K. BELAHCEL

Examinatrice

Mr M. BEY

Invité

SOMMAIRE

Introduction Générale	1
------------------------------------	---

Chapitre I Généralités sur les réseaux intelligents

I.1 Introduction	5
I.2 Réseaux électriques traditionnels	5
I.2.1 Hiérarchisation du réseau.....	6
I.2.2 Différents niveaux de tension	7
I.2.3 Topologie des réseaux électriques de distribution	7
I.2.3.1 Réseau simple dérivation	7
I.2.3.2 Réseau en double dérivation	8
I.2.3.3 Réseau en coupure d'artère	9
I.3 Réseaux électriques intelligents	9
I.3.1 Définition et objectifs	9
I.3.2 Architecture des réseaux intelligents	13
I.3.3 Exploitation des réseaux intelligents	14
I.3.4 Marché des réseaux intelligents	17
I.3.5 Conduite des réseaux	19
I.4 Gestion optimale des réseaux	20
I.5 Conclusion	23

Chapitre II : Load Flow et Dispatching Economique

II.1 Introduction	25
II.2 Problème de programmation	25
II.3 Fonction coût	25
II.4 Contrainte égalité	26
II.5 Contrainte inégalité	27
II.6 Méthode de calcul	27
II.7 Modélisation du réseau	29

II.8 Simulation, résultats et discussion	33
II.9 Conclusion	37

Chapitre III : Contribution des FACTS à la conduite des réseaux

III.1 Introduction	39
III.2 Principe de compensation du réactif	39
III.2.1 Cas d'une charge inductive	40
III.2.2 Cas d'une charge capacitive	41
III.3 Système FACTS utilisé	41
III.3.1 Principe de fonctionnement du STATCOM.....	41
III.3.2 Principe de fonctionnement du SSSC	43
III.4 Description et principe de fonctionnement de l'UPFC	46
III.4.1 Description du système	46
III.4.2 Principe de fonctionnement.....	47
III.5 Simulation, résultats et discussion	50
III.5.1 Effet du STATCOM.....	51
III.5.2 Effet du SSSC.....	52
III.5.3 Effet de l'UPFC.....	53
III.6 Conclusion	55

Chapitre IV : Compteurs intelligents

IV.1 Introduction	57
IV.2 Concept de compteur intelligent	57
IV.3 Fonctionnement du système de comptage intelligent	61
IV.4 Avantages et inconvénients des compteurs intelligents	64
IV.4.1 Avantages	64
IV.4.2 Inconvénient	65
IV.5 Simulation, résultats et discussion	65
IV.5.1 Etat initial du système	66

IV.5.2 Etat du système avec augmentation de la charge au nœud 6	68
IV.5.3 Etude de l'influence des compteurs intelligents sur le système.....	70
IV.9 Conclusion	72
Conclusion Générale	74
Bibliographie	77
Annexe	83

Remerciements

Nous remercions vivement Monsieur A. BENAYADA de nous avoir proposé le thème sur les smart grids qui a fait l'objet de notre travail. Qu'il trouve ici l'expression de notre gratitude pour ses conseils, son orientation et toute sa disponibilité. Nos chaleureux remerciements vont aussi à Monsieur M. BEY qui n'a épargné aucun effort pour nous aider que ce soit dans nos travaux de simulation ou dans notre recherche bibliographique.

Que Mesdames BOURENANE et BELAHCEL soient aussi remerciées pour nous avoir fait l'honneur de présider le jury pour la première et d'examiner notre travail pour la seconde.

Nous remercions toutes nos enseignantes et tous nos enseignants pour tous les efforts fournis à notre formation.

Que nos amis, nos camarades de promotion et nos proches trouvent ici l'expression de notre reconnaissance pour nous avoir toujours soutenus et encouragés durant tout notre cursus universitaire.

Introduction Générale

Introduction Générale

L'électricité ne cesse de circuler et ne peut donc être stockée qu'au prix de processus très complexes. Il est en revanche possible de la transformer en une autre forme d'énergie: elle peut par exemple permettre de pomper l'eau d'un lac de retenue et être ainsi stockée sous forme d'énergie potentielle. On peut également accumuler l'énergie sous forme chimique dans une batterie et la convertir ensuite de nouveau en électricité. Ce procédé ne permet cependant de stocker que d'infimes quantités d'énergie. Ceci fait que la production d'électricité est constamment adaptée à la consommation afin de garantir que la quantité d'énergie disponible sur le réseau soit en permanence égale à celle consommée.

L'évolution constante des réseaux électriques associée aux technologies FACTS (Flexible AC Transmissions Systems) et à l'optimisation des réseaux conduit à une nouvelle génération de réseaux appelés réseaux électriques intelligents (smart grids). Ces derniers reposent pour l'essentiel sur les technologies de l'information et de la communication (TIC) qui sont un pivot essentiel dans la modernisation des réseaux électriques. Les réseaux intelligents doivent permettre d'intégrer de larges proportions d'énergie renouvelable intermittente, de stockage et de véhicules électriques, et donner aux usagers plus de contrôle sur leur consommation énergétique.

Ce type de réseaux permet par conséquent de passer d'un système de production dépendant de la demande à un système de consommation basé sur l'offre, qui devra à l'avenir s'adapter aux variations aléatoires de la production d'énergies renouvelable. Associé à d'autres technologies telles que le pompage-turbinage ou encore les installations à gaz à cycle combiné, particulièrement flexibles, ce réseau doit contribuer à améliorer la sécurité d'approvisionnement, à réduire les coûts relatifs au réseau de distribution et à améliorer l'efficacité de l'ensemble du système. Un réseau intelligent relie à la fois la production, la consommation et le stockage de l'électricité en les coordonnant de manière centralisée utilisant une communication rapide et bidirectionnelle entre les différents composants des réseaux afin d'harmoniser la gestion du réseau qui permet d'adapter la demande à la production. Les réseaux intelligents servent donc non seulement à piloter des installations de production, mais également à connecter ou déconnecter les charges en fonction des besoins.

[1]

Aujourd'hui donc, la question qui se pose aux nouveaux réseaux électriques est comment gérer en instantané l'équilibre entre la production et la consommation de l'énergie. Le réseau et son système digital doivent être capables instantanément de faire le meilleur choix conduisant à une continuité de service sous une bonne qualité de tension. Un algorithme de calcul pourrait permettre au gestionnaire de réseau de coordonner rapidement et de manière complètement automatisée l'offre et la demande en jouant activement sur la charge ou sur la production, ou en alimentant le système d'accumulation [2]. La plupart de l'électricité est actuellement principalement produite avec des combustibles fossiles, nucléaires et hydroélectriques provenant de la nature. En raison de l'impact négatif des gaz à effet de serre CO_2 sur l'environnement et l'épuisement des combustibles d'origine fossile et non renouvelable dont

le prix est élevé, il est essentiel qu'il y ait une maîtrise efficace de la consommation de l'énergie électrique.

La répartition optimale des charges dans un réseau, les FACTS et les compteurs intelligents associés aux TIC contribuent d'une manière significative à la gestion des réseaux modernisés. La répartition optimale des puissances est l'un des problèmes majeurs que rencontrent les ingénieurs responsables de la planification et de la gestion des réseaux électriques d'où l'importance de déterminer les puissances optimales produites pour satisfaire la demande. Cette répartition économique des charges peut conduire à des problèmes de surcharge ou de dégradation de qualité de tension d'où l'appel aux dispositifs FACTS et aux compteurs intelligents pour régler ces problèmes. [3,4]

Le concept de FACTS lancé en 1988 par l'Institut de Recherche américain EPRI (Electric Power Research Institute), regroupe tous les dispositifs à base d'électronique de puissance. Ces derniers sont capables d'augmenter considérablement la capacité des lignes de transport électriques, tout en préservant, voire en rehaussant, la stabilité et la fiabilité d'un système d'énergie [5]. Les installations FACTS contribuent largement au développement de réseaux intelligents.

Le compteur intelligent dénommé aussi « smart meter » constitue une interface de communication entre le réseau électrique et le consommateur et permet de recueillir automatiquement et en continu des données sur la consommation globale d'énergie d'un usager. L'objectif est d'impliquer ce dernier en lui faisant mieux comprendre sa consommation afin de l'aider à la maîtriser à travers une adaptation de l'offre. A cela peuvent s'ajouter d'autres innovations issues des technologies domotiques, permettant par exemple de contrôler des appareils ménagers à distance, toujours dans une optique de maîtrise des consommations. Les compteurs jouent donc un rôle clé dans la mesure de la consommation d'énergie électrique dans les ménages. Pour surmonter les problèmes de compteurs d'électricité traditionnels, les compteurs intelligents ont été développés. Avec l'utilisation des données de compteurs intelligents, des alertes d'énergie seront fournis aux consommateurs en fonction de l'utilisation horaire de l'énergie. L'objectif principal des compteurs intelligents est de réduire la consommation d'énergie dans les ménages [6].

Ce travail est réparti en quatre chapitres. Des généralités les réseaux intelligents sont traitées au premier chapitre. Le concept de ces réseaux basé sur sa nature bidirectionnelle a été largement évoqué. Dans le deuxième chapitre, nous avons introduit la notion du dispatching économique pour déterminer les puissances optimales produites par les générateurs à l'aide de la méthode des coûts marginaux. La méthode de Newton Raphson a été utilisée pour établir la répartition des charges (load flow) et le plan de tensions du réseau test 3 machines-9 nœuds utilisé [7]. Dans le chapitre trois, après augmentation de la charge qui entraîne des contraintes sur le transit de puissances et le plan de tension, on introduit les

dispositifs FACTS pour régler la situation. Auparavant, nous avons décrit trois types de structures FACTS : type parallèle, type série et type hybride. Dans le quatrième chapitre, nous présentons le dispositif clé des réseaux intelligents à savoir le compteur intelligent. Nous présentons sa structure, son principe de fonctionnement et le comparons avec un compteur traditionnel. On montre son efficacité à gérer le réseau et le maintenir dans des conditions optimales d'exploitation.

Chapitre I

Généralités sur les réseaux intelligents

I.1 Introduction

Le réseau électrique intelligent associe aux réseaux de transport et de distribution électriques, les technologies de communication et de traitement informatique avancées. Celles-ci visent à optimiser la production et la distribution de l'énergie électrique à travers une meilleure adéquation entre la demande des consommateurs et l'offre des producteurs d'électricité. Ainsi, le déploiement du réseau électrique intelligent nécessite la définition d'un réseau de communication qui tient compte des contraintes de l'environnement hostile du réseau électrique mais surtout des fortes exigences en qualité de service.

Dans ce chapitre, nous avons présenté en générale les réseaux électriques intelligents par donnée leur définitions, structure, composition, avantage et inconvénient.

I.2 Réseaux électriques traditionnels [8]

Les systèmes électriques traditionnels se composent d'un ensemble d'infrastructures permettant d'acheminer l'énergie électrique produite vers les consommateurs. L'électricité transite donc depuis la centrale de production, par les réseaux de transport, de répartition, de distribution pour arriver chez le consommateur. Dans cette configuration, les acteurs du système électriques sont limités. Il s'agit des électriciens (producteurs, gestionnaires de réseaux et fournisseurs) et des équipementiers. Les réseaux traditionnels sont déjà équipés d'outils de mesure et de contrôle mais ils sont généralement utilisés dans une démarche d'analyse à posteriori des incidents. Des systèmes de protection sont également déployés. Certains pays disposent d'ores et déjà d'infrastructures plus modernes permettant la conduite du système production/transport à partir de dispatchings régionaux et d'un dispatching national. Cela consiste, à partir des informations de topologie du réseau et des mesures effectuées dans les postes de transport et les centrales et transmises aux dispatchings, à élaborer des programmes de production et des schémas d'exploitation du réseau. L'acheminement des informations est assuré par le réseau de téléconduite. L'acheminement se fait à travers un réseau "maillé" de lignes hautes tension, c'est le transport de l'électricité. Chaque maille de ce réseau peut être activée ou désactivée en fonction des impératifs de maintenance et des besoins de consommation, mais chaque maille peut aussi devenir inutilisable à des moments indéterminés. De plus en plus le maillage du réseau s'effectue au niveau international selon des règles techniques et économiques bien précises. Les pertes de puissance en lignes doivent être minimisées pour éviter de produire inutilement. Chaque maille du réseau a une capacité de transport qu'il n'est pas souhaitable de dépasser sous peine de fragilisation de la ligne voire sa destruction. Ce réseau construit sur une architecture historique top-down, c'est-à-dire un acheminement depuis le réseau de transport vers le consommateur en passant par le réseau de distribution. Les réseaux actuels ont été conçus pour conduire l'électricité **dans un seul sens**, des centrales de production vers les consommateurs comme l'indique la figure I.1 ci-dessous.



Figure I.1 Réseau électrique actuel

I.2.1 Hiérarchisation du réseau

Le réseau peut être divisé en trois parties selon le niveau de tension auquel se rattachent différents usages et types de clients : le réseau de transport et d'interconnexion, le réseau de répartition et le réseau de distribution. Le réseau de transport et d'interconnexion permet de relier les grandes centrales de production aux principaux centres de consommation. Il garantit aussi l'acheminement de l'électricité entre les différentes régions nationales et internationales. En maillant ainsi les points de production, il renforce la sécurité d'approvisionnement et l'équilibre permanent offre / demande. Cela réduit les besoins de puissance installée et donc les coûts de production. Ce réseau de grand transport est aussi fondamental pour l'existence d'un marché de gros de l'électricité : il permet notamment de créer des marchés régionaux sur plusieurs pays. Le réseau de répartition achemine l'électricité à l'intérieur des régions et à partir du réseau de transport, à proximité immédiate des zones de consommation diffuse. Il peut parfois alimenter directement quelques gros clients industriels. Le niveau de tension intermédiaire 220kV (cas algérien) peut être utilisé à la fois pour le transport et la répartition. Le réseau de distribution est alimenté par le réseau de répartition via les postes sources. Il garantit l'acheminement de l'énergie à la majorité des consommateurs raccordés aux niveaux de tension les plus bas. La Figure I.2 illustre le découpage des différentes parties du réseau électrique. Ces trois niveaux de réseau sont délimités grâce à des transformateurs. Ces transformateurs permettent d'acheminer l'énergie à différents niveaux de tension [8,9].

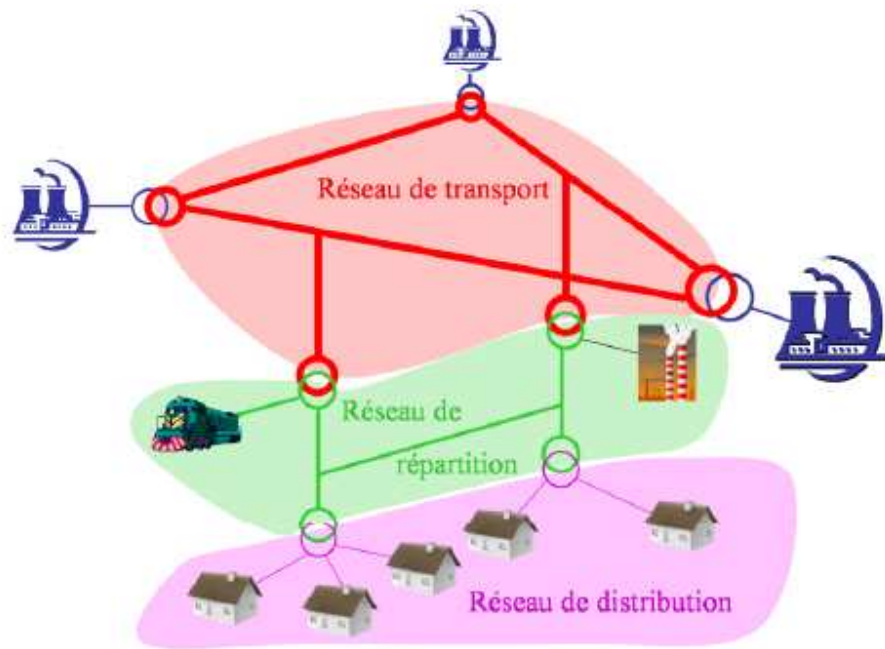


Figure I.2 Découpage du réseau électrique

I.2.2 Différents niveaux de tension

Les différents niveaux de tensions sont indiqués dans le tableau I.1 Ainsi le réseau de transport et de répartition se situe au niveau de la HTB (Haute Tension niveau B) Le gestionnaire du réseau de transport est responsable, à l'échelle nationale, de l'équilibre production/consommation et du respect des échanges transfrontaliers. Le réseau de distribution est au niveau de la HTA (Haute Tension niveau A) et de la BTA (Basse Tension niveau A). Le rôle du gestionnaire du réseau de distribution est l'entretien et la gestion de ce dernier et aussi l'alimentation des clients de type petites et moyennes entreprises et résidentiels au travers du réseau moyenne tension (HTA) et du réseau basse tension (BTA).Le tableau représente également les niveaux de tension TBT (Très Basse Tension) et BT (Basse Tension)[10].

$U < 50V$	50 $V < U < 500V$	$500V < U < 1kV$	$1kV < U < 50kV$	$50kV < U < 100kV$	$U > 100kV$
TBT	BT		MT	HT	THT
TBT	BTA	BTB	HTA	HTB	

Tableau I.1 Différents niveaux de tension

I.2.3 Topologie des réseaux électriques de distribution

Il existe trois différents types de réseaux électriques pour la distribution de l'énergie qui ont pour rôle de mettre à la disposition des utilisateurs l'énergie électrique [10,11].

I.2.3.1 Réseau simple dérivation

Chaque poste de transformation est alimenté en « simple dérivation » sur une artère principale ou secondaire. Ce type d'alimentation est surtout utilisé en distribution rurale ou aux alentours des grandes villes et en aérien. La seule protection étant le disjoncteur de départ du poste source, tout défaut sur le réseau provoque la coupure de tous les abonnés concernés par le départ du poste source.

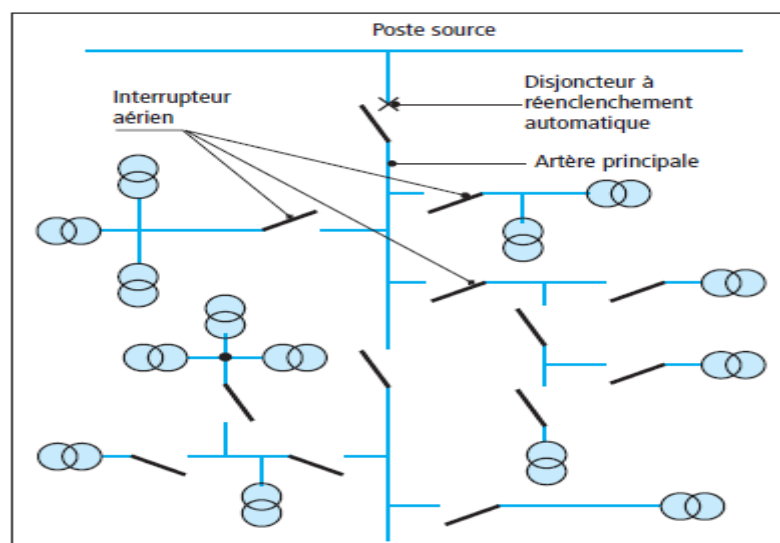


Figure I.3 Exemple de réseau simple dérivation

I.2.3.2 Réseau en double dérivation

Chaque poste est alimenté par deux câbles avec permutation automatique en cas de manque de tension sur l'une des deux arrivées. Les dispositions en coupure d'artère et en double

dérivation sont employées pour les réseaux souterrains qui ont une continuité bien meilleure que les réseaux aériens.

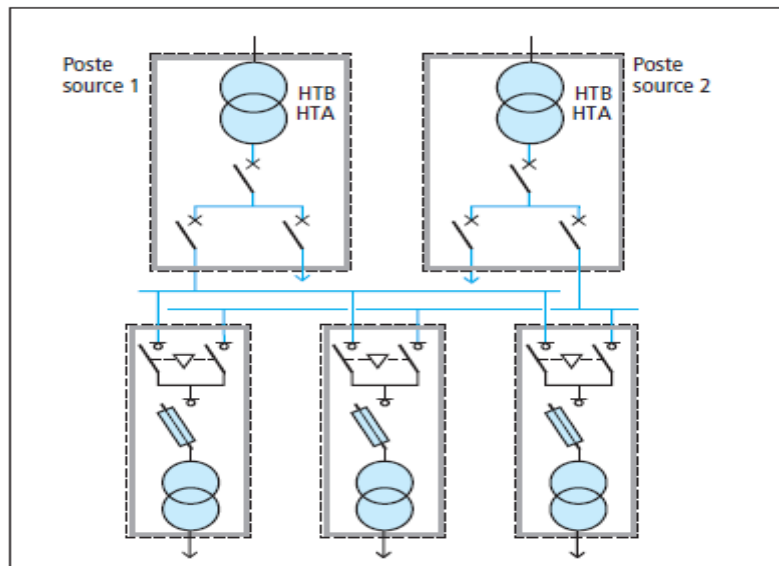


Figure I.4 Exemple de réseau en double dérivation

I.2.3.3 Réseau en coupure d'artère

Tous les postes HTA/BT sont branchés en dérivation sur une boucle ouverte en un point (dit point de coupure) proche de son milieu. Tous les appareils de coupure d'artère, sauf un, sont donc fermés. Ce type de réseau est surtout réalisé en souterrain et, en général, en milieu urbain. En cas de défaut sur une partie de la boucle, on peut toujours alimenter tous les postes en ouvrant la boucle à l'endroit du défaut.

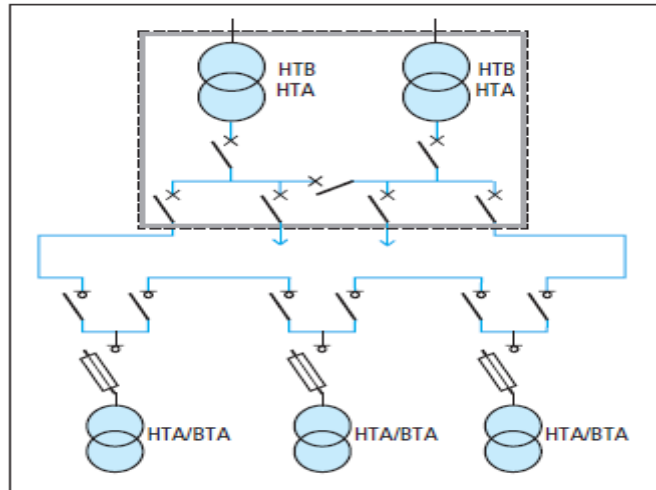


Figure I.5 Exemple de réseau en coupure d'artère

1.3 Réseaux électriques intelligents

I.3.1 Définition et objectifs

Les «réseaux intelligents» se définissent dans ce contexte comme des «réseaux de distribution et de gestion d'énergie intelligents». Concrètement, un réseau intelligent est un réseau électrique communicant qui intègre les Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) dans son fonctionnement. Cela permet d'établir des interactions entre les réseaux d'électricité et les usagers. Les possibilités d'optimisation offertes par un tel réseau sont multiples : lissage des pointes et creux journaliers, gestion de l'intermittence des énergies renouvelables, mutualisation des équipements, etc. L'objectif principal est une livraison d'électricité plus efficace, économiquement fiable et décarbonée. Un réseau intelligent est donc une évolution d'un réseau de distribution électrique dont le pilotage a été renforcé, enrichi, amélioré dans l'optique d'une meilleure efficacité énergétique et économique. Dans cette définition, le réseau est pris au sens très large du terme : les unités de production, les unités de stockage d'électricité, sous quelque forme que ce soit et les ramifications terminales du réseau appartenant aux domaines privés des consommateurs [12].

Un réseau intelligent permet donc de:

- réduire les coûts des infrastructures de production et de distribution de l'électricité,
- réduire le coût global de la facture énergétique de l'utilisateur final
- réduire les émissions de CO₂,
- intégrer massivement les énergies renouvelables et décentralisées
- améliorer la qualité de la fourniture et la qualité de service,

- améliorer la maintenance des réseaux par des interventions plus ciblées et, chaque fois que possible, préventives [13].

La gestion d'un tel réseau devient répartie et bidirectionnelle comme le montre la figure I 6.

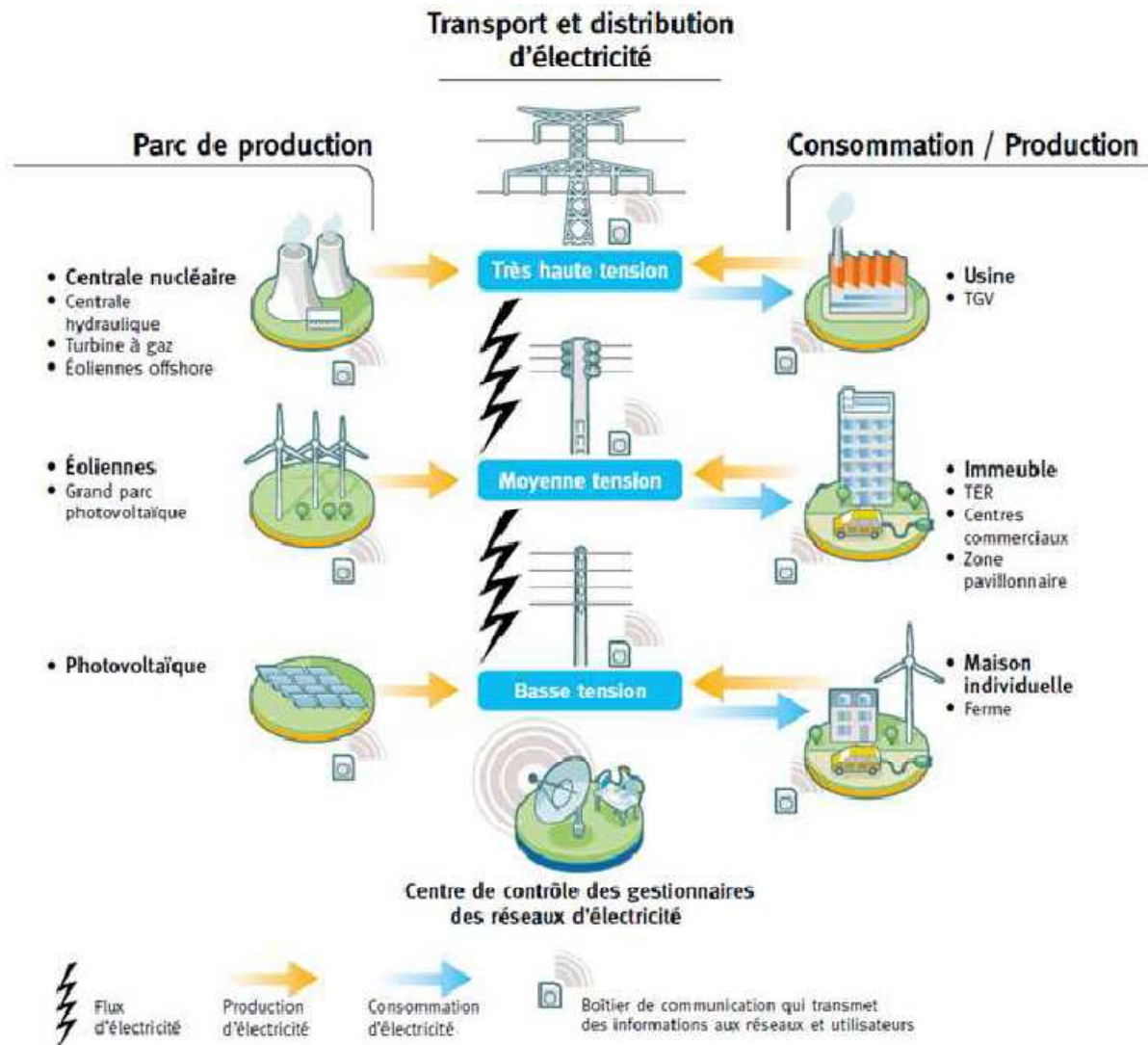


Figure I.6 Fonctionnement bidirectionnel d'un réseau intelligent.

La figure I.7 donne un aperçu de ce que peut contenir un réseau intelligent comme sources d'énergie, de système de stockage (véhicules électriques), d'infrastructure de communication, etc.

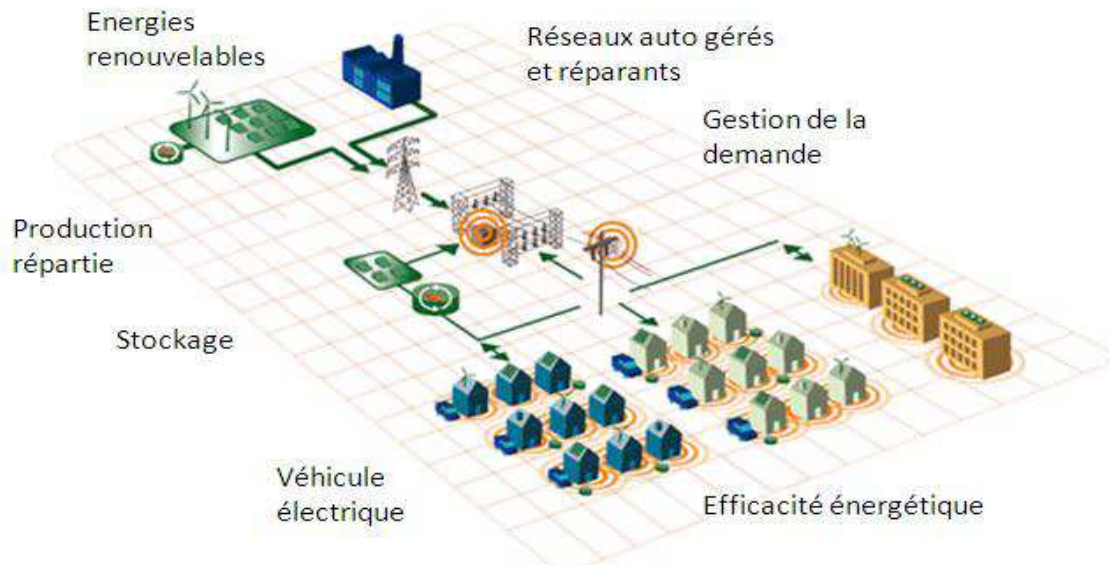


Figure I. 7 Schéma d'un réseau intelligent

Un réseau intelligent n'est donc pas un nouveau réseau électrique mais une évolution du réseau actuel qui a pour but de répondre aux nouveaux défis auxquels fait face le secteur de l'électricité :

- * satisfaire une demande croissante d'électricité, notamment en période de pointe, sans détériorer la qualité de fourniture,
- * intégrer des sources de productions décentralisées et intermittentes et permettre l'accroissement de la production d'électricité d'origine renouvelable.

Un réseau intelligent utilise les technologies [informatiques](#) de manière à optimiser la production, la distribution, la consommation afin d'améliorer la relation entre l'offre des producteurs et la demande des consommateurs d'[électricité](#). Au moyen des TIC, il collecte des informations provenant des consommateurs et des producteurs et ajuste son fonctionnement en conséquence, le tout de manière automatique. Il est ainsi capable d'intégrer l'énergie provenant de sources renouvelables intermittentes et imprévisibles, et de distribuer l'électricité de manière optimale. Il fournit de l'électricité avec une meilleure rentabilité. Il est donc un réseau électrique de nouvelle génération communiquant et permettant un échange d'informations bidirectionnel et en temps réel entre l'électricien et l'utilisateur ce qui permet son pilotage de manière fine et en temps réel [14].

L'objectif est double :

- * pour le producteur d'énergie, il s'agit de connaître la consommation en temps réel afin d'optimiser l'allocation des sources de production,
- * pour l'utilisateur, il s'agit d'obtenir un maximum d'informations afin d'analyser et de réduire sa consommation.

D'un point de vue technologique, le réseau intelligent se compose entre autres :

- * d'un compteur intelligent (smart meter) chez l'utilisateur qui remplacera le compteur traditionnel,
- * d'un logiciel de suivi et de gestion de la consommation,
- * d'une infrastructure de communication reliant l'utilisateur au producteur, plus ou moins dense suivant le mode de communication utilisé (par satellite, courant porteur en ligne, Wifi longue portée, radio fréquence, ...),
- * de serveurs informatiques et de logiciels permettant au producteur de stocker et d'analyser l'immense quantité d'informations générées dans le réseau [13-14].

Un réseau intelligent tel que schématisé par la figure I.8 ci-dessous montre la possibilité de circulation de l'électricité qui a lieu **dans les deux sens** afin de mieux intégrer la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables. Le réseau de demain consistera en une version renforcée du réseau actuel, intégrant davantage de systèmes de contrôle et de communication avancés, de nouvelles interconnexions de réseaux, un flux bidirectionnel d'énergie et d'informations, des installations de stockage de l'électricité, et une part plus importante de production d'énergie distribuée et renouvelable. Ce système sera hautement automatisé afin de garantir sur demande aux consommateurs industriels, commerciaux et particuliers des approvisionnements fiables et à haute efficacité énergétique. Dans ce type de réseau, de plus en plus d'utilisateurs d'électricité deviendront également des producteurs grâce à des panneaux solaires ou à de petites éoliennes montés sur le toit des habitations. Aujourd'hui, les seuls utilisateurs pouvant jouer un rôle important sur les marchés de l'électricité sont les sites industriels énergivores qui possèdent des installations de production d'énergie d'assez grande envergure.

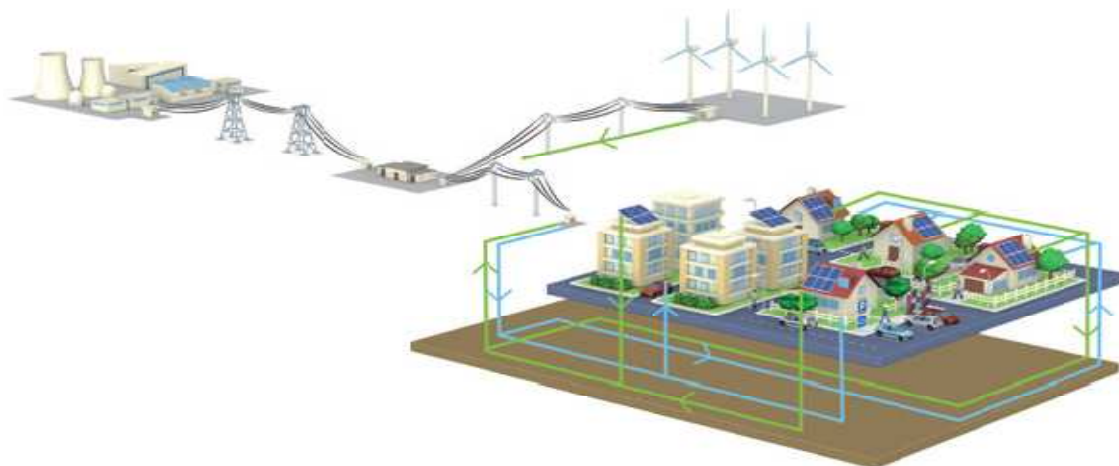


Figure I.8 Réseau électrique intelligent

Les réseaux intelligents constituent un ensemble de moyens techniques et numériques déployés à tous les niveaux du système électrique. En favorisant l'interpénétration des 3 niveaux de systèmes, ils répondent aux besoins fonctionnels des systèmes électriques modernes et permettent notamment [15]:

- le développement des systèmes d'efficacité énergétique tertiaire, industrielle et domestique,
- la gestion de l'équilibre par la demande,
- l'intégration des nouvelles sources d'énergie et des nouveaux usages,
- la relève et la gestion de données de consommation précises,
- le contrôle et le pilotage de l'efficacité opérationnelle.

Il est essentiel de souligner à ce stade que sur les réseaux électriques traditionnels, le pilotage et l'ajustement ne se produisent qu'au niveau du réseau de transport composé de lignes haute tension. Les réseaux intelligents permettent désormais d'envisager l'optimisation qui se faisait en haute tension sur des zones de la taille d'un pays, au niveau de la maille distribution pour gérer des sous équilibres locaux. Les réseaux intelligents introduisent donc un nouvel étage d'optimisation de l'équilibre offre-demande et ce au niveau des réseaux de distribution, puisque le consommateur devient une variable d'ajustement par la production décentralisée et par le pilotage des charges. L'utilisateur final aura donc un rôle actif dans le système énergétique et va devenir le centre d'attention des autres acteurs du réseau électrique. Les bénéfices pour les consommateurs sont nombreux. En améliorant les connaissances sur la consommation électrique, les consommateurs pourront bénéficier d'offres tarifaires plus diversifiées et mieux adaptées à leurs comportements. Ils pourront également s'équiper de nouveaux services d'efficacité énergétique ou de maîtrise de la demande leur permettant de mieux gérer leur consommation mais également de jouer positivement sur les pics de consommation et les pannes dues à une surcharge du réseau. Enfin, ils pourront espérer un service de meilleure qualité puisque les nouvelles technologies permettront aux gestionnaires du réseau d'anticiper, de détecter et de réparer les pannes mais également de répondre en temps réel aux besoins en électricité. Une partie de ces nouveaux services pourrait s'inscrire dans les démarches de «bâtiment intelligent». La montée en puissance de ce marché qui permet d'ores et déjà de piloter son habitat ou d'en contrôler les principales fonctions à distance via internet représente une véritable opportunité pour de nombreux acteurs. En effet, le déploiement des réseaux intelligents permet également d'ouvrir la porte à de nouveaux acteurs et notamment ceux issus du monde de l'informatique (software) et de celui des télécommunications (hardware). La distinction entre ces deux secteurs n'est pas si marquée puisque de nombreux acteurs se positionnent sur les deux secteurs. Cette distinction permet de couvrir l'ensemble des besoins induits par le développement des réseaux intelligents c'est-à-dire de l'architecture réseau, du logiciel et des services. La répartition des rôles entre opérateurs de l'énergie, équipementiers du marché de l'énergie et les nouveaux entrants issus du secteur des télécommunications et de l'informatique va avoir de lourdes conséquences sur l'évolution du système électrique dans sa globalité. Plusieurs catégories d'acteurs sont donc concernées par le développement des réseaux intelligents. Dès lors que la composante proprement informationnelle (logiciels, systèmes d'information) prend une importance croissante dans l'architecture des systèmes électriques, il est permis de penser que les dynamiques d'innovation dans le secteur de l'électricité emprunteront de nombreux traits aux

dynamiques d'innovation caractéristiques de l'économie numérique, notamment celles de l'économie du logiciel.

I.3.2 Architecture des réseaux intelligents

Le déploiement d'une architecture de réseaux intelligents repose donc sur la combinaison de plusieurs couches infrastructures et logicielles permettant de communiquer, mesurer, contrôler et piloter. Sur cette base, il est possible d'imaginer la création de nombreux services en aval et en amont du compteur. Les équipements à mettre en oeuvre diffèrent selon que l'on se trouve à tel ou tel niveau de l'architecture énergétique. Un certain nombre de fonctions ou composants existent depuis de nombreuses années. Les grandes catégories de composants et de systèmes que l'on peut retrouver dans une architecture réseau intelligent sont [16]:

- l'infrastructure de communication qui comporte le réseau local LAN (Local Area Network), le réseau étendu WAN (Wide Area Network), le système de mesure avancé FAN (Field Area Network) et AMI (Advanced Metering Infrastructure), l'équipement CPE (Customer Premise Equipment), le réseau domestique HAN (Home Area Network),
- l'infrastructure énergétique qui comporte les systèmes FACTS (Flexible AC Transmissions Systems), les SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage), le système de transport en haute tension et à courant continu - HVDC (High Voltage Direct Current),
- les outils de mesure comportant le système PMU (Phasor Measurement Unit), les Capteurs, les compteurs intelligents,
- les systèmes de contrôle et de détection entrant dans le cadre de la télégestion tels que SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition), WASA (Wide-Area Situational Awareness), WAMS (Wide Area Measurement System), WAAPCA (Wide Area Adaptive Protection, Control and Automation), MDMS (Meter Data Management System),
- les systèmes de pilotage comportant EMS (Energy Management System), GIS (Geographic Information System), DMS (Distribution Management System), OMS (Outage Management System), WMS (Workload Management System), DA (Distribution Automation) CEMS (Consumer Energy Management Systems).

1.3.3 Exploitation des réseaux intelligents

Les réseaux de transport et de distribution permettent d'acheminer la production d'électricité vers les zones de consommation. Avec l'évolution des usages, les réseaux de distribution vont également devenir des réseaux de collecte de la production d'électricité, opérant ainsi une transformation profonde vers un fonctionnement bidirectionnel. Garants de l'équilibre entre l'offre et la demande, c'est aux gestionnaires de réseaux que revient l'initiative d'investir pour le déploiement de systèmes intelligents permettant de contrôler et de piloter finement la tension et la fréquence sur les réseaux, d'anticiper et de corriger les

défaillances du système. Il s'agit en premier lieu de pouvoir garantir une qualité de service aux consommateurs en limitant les coupures, mais également d'offrir les conditions de sécurité maximale pour le système électrique. Ces enjeux prennent une importance croissante en raison notamment des impacts sociaux et économiques que peuvent avoir les situations de blackout. Les gestionnaires de réseaux sont de plus en plus nombreux à introduire de l'intelligence dans les réseaux. Ils s'appuient pour cela sur l'offre de nombreux équipementiers principalement issus du secteur de l'énergie. À noter cependant que le déploiement massif d'outils de communication, de pilotage, de contrôle au sein des réseaux renforce les risques dans le domaine de la cyber-sécurité. En effet en renforçant les interactions entre tous les niveaux du système électrique, les réseaux intelligents rendent celui-ci plus vulnérable aux attaques des hackers. Le système de comptage évolué est l'un des concepts clés des réseaux intelligents puisqu'il permet de communiquer sur les données de consommations avec les équipements en aval et en amont du compteur. Ces systèmes intègrent des équipements et des logiciels permettant de compter, de communiquer et d'analyser les consommations des clients. D'une manière générale, ils permettent de relever de manière détaillée et régulière les consommations et favorisent les offres de facturation intégrant des coûts horaires différenciés. Ils permettent également de limiter les interventions particulières. Enfin, des fonctionnalités liées à l'efficacité énergétique et la gestion de la pointe peuvent également être développées. L'augmentation de la fréquence et la précision des relevés effectués par les compteurs intelligents laissent présager de nouveaux défis en ce qui concerne la capacité d'analyse et de stockage de ces données. En parallèle la question de protection de la vie privée fait débat puisque les opérateurs disposeront d'un volume d'informations personnelles disponibles croissant. Si les mesures ne seront pas dans un futur proche enregistrées toutes les minutes ni appareil par appareil, elles permettront néanmoins de déterminer le nombre d'occupants, leur rythme de vie, leurs habitudes de consommation touchant ainsi à l'intimité. Dans ce contexte il est important de rassurer les consommateurs sur les conditions d'exploitation et de partage de ces données par les énergéticiens et leurs partenaires. Les systèmes de gestion active de la consommation électrique permettent de responsabiliser les consommateurs en leur permettant de visualiser les informations liées à leurs consommations. Mais ils vont également plus loin en permettant aux consommateurs de planifier différemment les tâches réalisées par les appareils électriques au cours de la journée. En responsabilisant les consommateurs et en répartissant au mieux la consommation électrique, il est ainsi possible d'éviter les pics de consommation mais également de consommer au moment de la journée où les tarifs sont les plus avantageux [3].

Actuellement, le contrôle de la demande est pour ainsi dire inexistant. La production d'électricité est fonction de la demande. Dans un réseau intelligent, la demande doit être gérée de manière plus active, permettant ainsi aux opérateurs du réseau de la réguler plus facilement en fonction de l'offre. Pour qu'une telle situation soit possible, des dispositifs de suivi et de contrôle doivent être mis à disposition des utilisateurs finaux, fournissant ainsi à chaque consommateur des informations détaillées sur leur utilisation de l'électricité et leur indiquant comment ils pourraient contribuer activement à réduire le niveau de demande maximum. La communication en temps réel entre les fournisseurs et les consommateurs d'électricité permet aux utilisateurs de réagir directement aux changements de conditions et de tarifs, tandis qu'ils peuvent parfois choisir d'autoriser les fournisseurs d'énergie à limiter leur consommation en intervenant sur certains équipements de sorte que la demande ne soit pas supérieure à la production électrique disponible. Il s'agit là du principe fondamental sur lequel repose ce que le secteur des fournisseurs d'énergie appelle la méthode de "demande-réponse" qui vise à aplanir les pics de la demande en encourageant les consommateurs à décaler leur

consommation d'énergie non impérative vers les périodes plus "creuses". La figure I.9 montre comment la demande énergétique peut être gérée par un réseau intelligent [17].

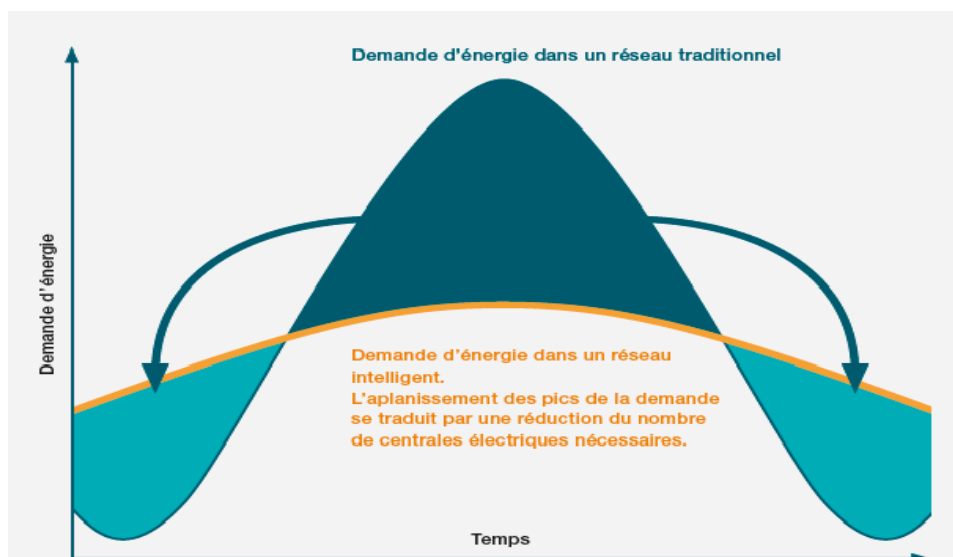


Figure I.9 Variation de la demande d'énergie

Les réseaux intelligents sont une réponse à des enjeux économiques ainsi qu'à la nécessité d'adapter les réseaux électriques à des évolutions technologiques ou réglementaires pour permettre une meilleure efficacité et disponibilité des énergies. Ils permettront entre autres de :

- consommer moins,
- consommer mieux,
- développer de nouveaux usages et systèmes.

Consommer moins est un objectif de maîtrise de l'énergie. Dans un éco-quartier, deux types d'actions contribuent à cet objectif :

- les actions d'efficacité énergétique passive visent de meilleures performances énergétiques des systèmes passifs traditionnels et des bâtis: A titre d'exemple, l'orientation du bâtiment, l'amélioration de l'isolation ou l'évolution des technologies d'éclairage font partie de ces actions.
- les actions d'efficacité énergétique active, résultat d'un meilleur pilotage des systèmes tels que l'asservissement de l'éclairage d'une zone à la luminosité et à la présence de personnes dans cette zone, l'asservissement du chauffage à la température extérieure, etc.

La réduction de la pointe de consommation relève principalement du pilotage des réseaux électriques (pilotage technico-économique mais aussi influence du comportement par une meilleure connaissance des enjeux). Ces actions de pilotage peuvent être automatiques et directement assurées par des automatismes ou manuellement c'est-à-dire menées par les occupants des locaux, par des comportements appris ou à partir d'informations mises à leur disposition. Le bâti et les technologies déployées conditionnent les résultats du pilotage des

réseaux. Par exemple, un bâti à forte inertie thermique va permettre un délestage plus long du chauffage ou du refroidissement en période de pic de consommation car il limitera de fait le gradient de température.

Consommer mieux est un objectif à visée autant environnementale qu'économique car permettant de valoriser des sources d'énergie renouvelables et de réduire la pointe de consommation électrique. Afin d'assurer le meilleur équilibre entre énergie produite et disponible et énergie consommée, plusieurs actions sont possibles : décaler des usages, délester des charges ou simplement réduire l'intensité d'utilisation de certains équipements en période de pic de consommation, en évitant d'activer simultanément des process énergivores. Mais les sources de production locales peuvent également contribuer à cet objectif en période de pointe et ce soit directement en prenant le relais du réseau de distribution électrique, soit à travers des dispositifs de stockage d'énergie. Le gaz est une énergie à considérer prioritairement car elle peut à la fois alimenter des générateurs électriques et être stockée facilement. En outre, il peut lui-même être produit selon des techniques présentant de nombreux avantages en lieu urbain dans une optique de développement durable L'ensemble des offres contribuant à cet objectif se retrouve derrière différents vocables : « effacement de la pointe », « lissage de la pointe », « ajustement de la pointe » ou encore « demandresponse ». Ces offres supposent à minima, sur un périmètre donné :

- de mesurer les différents niveaux de consommation et de les agréger pour pouvoir les comparer aux niveaux de production effectifs et aux capacités de transit des différents réseaux,
- de comparer à intervalle régulier (10 à 30 mn, quelques heures, un et plusieurs jours) les contraintes réseau, les niveaux de production et de consommation et de prendre les dispositions nécessaires de réduction de la consommation en cas d'excès prévu de cette dernière.

Le développement de nouveaux usages et systèmes concerne entre autres [12-14] :

- le véhicule électrique qui nécessite des adaptations physiques du réseau autant que de pilotage car, en l'absence de toute prise en compte de son impact sur le réseau, son développement risque d'accentuer la pointe de consommation. En effet, de nombreux utilisateurs privés risquent de démarrer la charge de leur véhicule de retour chez eux en fin d'après-midi, à l'heure même du pic de consommation.
- la production décentralisée d'énergie qui requiert un réseau physiquement dimensionné pour recevoir les flux d'énergie produite et non consommée, équipé pour traiter les contraintes liées à l'intermittence et le manque de flexibilité de ces injections d'énergie et piloté de manière à toujours consommer l'énergie ainsi produite au plus près de son lieu de production. Source de déstabilisation potentielle, la connexion physique de ces sources de production doit impérativement être conçue avec le gestionnaire du réseau électrique.
- le stockage d'énergie qui présente la particularité de pouvoir jouer tour à tour le rôle de producteur et de consommateur et donc de régulateur local des flux d'énergie.
- la production d'énergie électrique décentralisée qui rend l'adéquation charge-capacité plus complexe d'où nécessité d'adaptation à la variation de la demande mais aussi et simultanément à celle de la production. Le système de pilotage du

réseau ne peut donc conserver sa structure traditionnelle dès que la production par des sources d'énergie intermittentes atteint 20% à 25% de la production totale.

1.3.4 Marché des réseaux intelligents [14,17]

Le marché des réseaux intelligents s'organise autour des paramètres suivants :

- l'efficacité et sécurité des réseaux de transport,
- l'accès à des données de comptage avancées,
- la maîtrise de la demande et des pics de consommation,
- la gestion active de la consommation,
- l'intégration de la production d'électricité (Energie Renouvelable, Véhicule Electrique),
- Les bâtiments intelligents.

Le marché des bâtiments intelligents est encore émergent aujourd'hui mais de nombreux acteurs ont fait le pari de son potentiel de développement. Les bâtiments intelligents sont équipés de systèmes de commande et de conduite permettant de mieux gérer leurs consommations énergétiques. Ils viennent compléter les deux autres dispositifs du bâtiment vert à savoir un bâti de qualité et des équipements performants dans un objectif commun, celui de réduire la consommation énergétique. Ce marché cible à la fois les bâtiments industriels et commerciaux et les habitations particulières. Du côté des habitations particulières les systèmes de bâtiments intelligents visent en priorité les thermostats et les appareils électroménagers intelligents. Ils permettent par exemple aux consommateurs de programmer leurs appareils en fonction des tarifs de l'électricité, de déclencher les appareils à distance, de contrôler la production des panneaux photovoltaïque, de déclencher la charge du véhicule électrique. Du côté des bâtiments industriels et commerciaux, si la démarche n'est pas nouvelle, elle a cependant évolué vers des systèmes de plus en plus intégrés utilisant des réseaux de capteurs et de moniteurs et tenant compte des données individuelles produites par les systèmes d'éclairage, de chauffage, les panneaux photovoltaïque, etc. La mise en œuvre de ce type de services repose nécessairement sur leur interfaçage avec les données du compteur électrique et donc la coordination avec l'opérateur de distribution. Dans le contexte actuel, ce sont généralement les fournisseurs d'électricité qui proposent une offre complète de produits et de services permettant aux consommateurs de gérer activement leur consommation. Après installation d'une « box » connectée aux appareils de la maison, des alertes SMS peuvent être envoyées aux habitants du logement pour consulter les données sur un site web où s'affichent kilowattheures, prix d'énergie et émissions de CO₂. Depuis son téléphone mobile, l'utilisateur peut alors décider de baisser son chauffage en partant de son domicile et de le remettre en route à distance peu de temps avant de rentrer. Certains équipementiers ont développé une box pour suivre et moduler la consommation avec solution de visualisation sur téléphone mobile des consommations d'énergie. Ce service permet l'envoi d'alertes en cas de surconsommation et donne à l'utilisateur la possibilité de comparer ses données sur les réseaux sociaux. À terme, cette plateforme permettra de prendre des décisions à distance, comme de débrancher un équipement électrique ou mettre sa maison en mode basse consommation. Il existe sur le marché un thermostat capable d'ajuster automatiquement la température de la maison, en combinant les données issues de capteurs et en analysant les préférences de l'utilisateur. Le pilotage à distance du thermostat peut s'effectuer à partir d'un smartphone ou d'une tablette. Les opérateurs de réseaux disposaient jusqu'à présent d'un seul levier d'action,

celui de la production, pour assurer l'équilibre entre l'offre et la demande. En période de pic, les réseaux intelligents offrent l'opportunité de pouvoir gérer l'équilibre du réseau en agissant en priorité sur la consommation. La « demande- réponse » est un modèle selon lequel il est possible d'alléger la demande en électricité lors des pics de consommations en coupant certains appareils (les véhicules électriques par exemple) ou en substituant la charge électrique effacée par d'autres sources de production non électrique. Le déploiement de ces services par les opérateurs d'effacement nécessite de mettre en place une infrastructure spécifique permettant de communiquer avec les opérateurs et les fournisseurs, et d'interagir avec les appareils électriques. Ce système présente un intérêt pour les fournisseurs puisqu'il leur permet d'éviter une production très coûteuse lors des pics de consommations liée à l'utilisation de centrales d'appoint et de limiter les risques de coupure de courant. Il permet également aux consommateurs de réduire leur facture d'électricité en revendant l'électricité non consommée. Ces services sont pour le moment accessibles aux consommateurs de types industriels et commerciaux. Ils sont généralement proposés par les fournisseurs d'électricité. L'électricité effacée est alors revendue par ces acteurs aux fournisseurs. Ces acteurs cumulent alors les fonctions de fournisseurs de services, d'effacement et d'agrégateurs. Ceux-ci sont des acteurs qui collectent différentes sources de production auprès de leur portefeuille de fournisseurs, mettent en œuvre des mécanismes appropriés et assure l'équilibre de la charge nécessaire. Ils peuvent aussi revendre de l'énergie sur le marché.

La maîtrise de la consommation d'électricité relève autant des caractéristiques du bâti que du pilotage des réseaux électriques. Ce sont les habitants qui, par leurs comportements, influencent directement ces consommations. C'est donc à leur niveau que doit se développer, d'une part, une éducation, d'autre part, une assistance au pilotage énergétique. L'infrastructure de chaque bâtiment résidentiel devrait être équipée d'un circuit de prises vertes disposées aux localisations les plus probables des appareils informatiques et audio/vidéo. Ce circuit devra être programmable. Dans chaque logement, il peut être préconisé un système (écran, ou visualisation sur ordinateur, sur smartphone...) permettant de visualiser la consommation et ses principales caractéristiques. L'accent sera mis sur le caractère accessible et pragmatique des informations fournies. Ce système pourrait permettre également de visualiser les alarmes relatives aux pics de consommation. Le circuit de « prises vertes » commandées par un interrupteur horaire permettra aux occupants d'un logement de brancher tous les appareils restant en veille une fois éteints : télévision, ordinateur. L'alimentation de ces appareils en veille sera automatiquement interrompue pendant la période programmée par l'occupant.

Certains moyens accessibles aux habitants pour piloter leur consommation ont un intérêt presque certain ; on les retrouve à plusieurs niveaux :

- Au niveau de la prise de conscience par les occupants du logement, de leur consommation effective, de nombreux systèmes de visualisation de la consommation électrique existent, plus ou moins pratiques et accessibles à tous. Plus ils s'adressent aux consommateurs de manière pratique, plus ils ont d'impact sur les comportements, même si cet impact reste limité. A titre d'exemple, un écran affichant une consommation sur les dernières 24 heures de 100kWh générera moins d'actions d'un écran affichant un message informant le consommateur qu'au cours du dernier mois, il a consommé pour 2000DA d'électricité entre 11h

du soir et 6h du matin : période pendant laquelle usages privés et éclairage doivent être, la plupart du temps, nuls.

- Au niveau de la capacité à répondre à des périodes de pointe, le logement doit être équipé soit d'une alarme pour informer le consommateur de l'entrée dans une période de pointe, à priori, à prix plus élevé, de préférence véhiculée par le système de visualisation précédent, soit d'une « box énergie » qui gèrera par elle-même un certain nombre de délestages préprogrammés. Le choix d'avoir recours à un tel dispositif appartient à l'occupant : libre à lui de choisir, parmi les offres existantes chez les fournisseurs d'énergie ou les agrégateurs, celle qui lui convient le mieux. Il existe encore sur le marché de multiples dispositifs pouvant contribuer à réduire les consommations moyennes et en périodes de pointe dans les logements : minuterie, prises programmables ou pilotables à distance, sous-comptage, mini-automates, etc.

I.3.5 Conduite des réseaux [18]

La gestion intelligente de l'énergie s'articule donc autour :

- de l'intégration des productions décentralisées,
- des nouvelles technologies de l'information et de la communication,
- de la gestion proactive faisant intervenir le processus demande-réponse,
- des villes « intelligentes » (smart cities) et éco-quartiers,
- des capacités de stockage.

La gestion technique des données et leur traitement sont basés sur :

- une évolution de la collecte des données issues des compteurs intelligents avec en perspective la croissance de « l'intelligence » dans les dispositifs décentralisés de la distribution électrique, laquelle devra de plus en plus être interfacée avec les « services intelligents » à l'intérieur des bâtiments et résidences,
- le rôle incontournable des architectures de cloudcomputing
- les fonctions avancées de traitement de données

Le développement des énergies renouvelables et des véhicules électriques reste encore en partie contraint par la capacité des moyens de stockage et des batteries, le coût des technologies de production d'énergie renouvelable. Ces nouvelles sources de production pourraient favoriser l'apparition de centrales virtuelles qui permettent d'agréger et de valoriser sur le marché de l'énergie les différentes sources de production locales en tenant compte par exemple de la gestion de la charge, de l'intermittence de la production et du stockage. La place du numérique (informatique et réseaux) sera de plus en plus marquée notamment en lien avec la croissance des énergies renouvelables. Même si l'avantage environnemental du recul de la dépendance aux combustibles fossiles est évident, le recours à d'importantes quantités d'énergie renouvelable et à la production d'énergie à petite échelle constitue un énorme défi en termes de stabilité et de disponibilité de l'énergie électrique. La difficulté majeure réside dans la nature intermittente de l'énergie renouvelable. Le réseau de demain consistera donc en une version renforcée du réseau actuel, intégrant davantage de systèmes de contrôle et de communication avancés, de nouvelles interconnexions de réseaux, un flux bidirectionnel d'énergie et d'informations, des installations de stockage de

l'électricité, et une part plus importante de production d'énergie distribuée et renouvelable. Ce système sera hautement automatisé afin de garantir sur demande aux consommateurs industriels, commerciaux et particuliers des approvisionnements fiables et à haute efficacité énergétique.

La réduction des émissions à la source constitue une seule approche visant à réduire les niveaux de CO₂. Comme l'indique l'analyse de l'Agence Internationale de l'Énergie, l'amélioration de l'efficacité énergétique est de loin le meilleur moyen de réduire la consommation d'énergie primaire. Une utilisation plus efficace de l'énergie apparaît donc comme l'objectif premier du futur système électrique, nécessitant le déploiement de technologies à haute efficacité énergétique à chaque étape de la chaîne, depuis la production, le transport et la distribution de l'énergie jusqu'à son utilisation finale dans les constructions industrielles, commerciales et résidentielles. Outre le recul de la consommation, le réseau intelligent de demain doit être en mesure d'aplanir les pics de la demande grâce à une meilleure répartition de la consommation tout au long de la journée. La capacité de réserve mise en veille afin de faire face aux niveaux de consommation maximum pourra ainsi être diminuée, tandis que les fournisseurs d'énergie acquerront la flexibilité dont elles ont besoin pour gérer les brusques fluctuations de l'approvisionnement en électricité grâce à un portefeuille croissant de centrales exploitant des sources d'énergie renouvelables. Cela nécessitera certaines modifications profondes de la gestion de l'offre et de la demande.

I.4 Gestion optimale des réseaux

La mise en place d'un réseau intelligent s'appuie sur plusieurs leviers dont le compteur intelligent et le stockage d'énergie. Nous décrivons en détail l'apport du compteur intelligent dans le chapitre IV qui lui est consacré. Le stockage énergétique peu utilisé dans les réseaux traditionnels car difficile à mettre en place trouve un nouvel intérêt au sein des réseaux intelligents. Son intérêt est double. Il permet d'une part de gérer l'intermittence des énergies renouvelables. En effet, la part de plus en plus importante occupée par ces dernières (photovoltaïque et éolien), dans le mix énergétique comporte une intermittence qui impose le recours à des solutions de stockage combinée à l'emploi d'énergies renouvelables non intermittentes (cogénération, biomasse). De plus, il contribue également au lissage des pointes. Il peut être introduit à n'importe quel niveau dans la chaîne de valeur de l'électricité et aura un rôle différent en fonction de son positionnement : optimisation de la flexibilité du producteur, équilibrage en temps réel du réseau ou encore optimisation des factures pour l'utilisateur. Le stockage s'envisage à petite échelle, en tant que variable d'ajustement. L'utilisation des véhicules électriques à des fins de stockage de l'excédent d'électricité comme une source d'énergie de secours s'avère particulièrement intéressant. La plupart des véhicules sont utilisés une à deux heures par jour, et demeurent à l'arrêt le reste du temps. Les fournisseurs d'énergie pourraient utiliser les batteries des véhicules électriques en stationnement raccordés au réseau électrique pour stocker l'électricité lorsque celle-ci est disponible en importante quantité. A l'inverse, en cas de pénurie d'électricité, les véhicules électriques pourraient servir de réserve d'énergie à court terme pour faire face aux pics de la demande, ce qui permettrait d'atténuer la pression exercée sur les distributeurs d'énergie électrique en matière de capacité de réserve tout en offrant des avantages financiers aux propriétaires de véhicules électriques qui portent la promesse d'un transport décarboné, et

ouvrent la porte de nouveaux marchés aux énergéticiens, sous réserve de forts investissements au niveau des réseaux de distribution et des infrastructures de recharge. Les recherches en matière de stockage d'énergie qui accompagnent le développement de ces véhicules pourraient demain trouver des débouchés à différentes mailles du réseau et conduire à repenser intégralement la gestion de ceux-ci. L'intégration donc de la voiture électrique au réseau offre des opportunités de développement de réseaux électriques. La consommation liée au rechargement des voitures électriques devrait se réaliser essentiellement en période de basse consommation permettant l'optimisation de l'usage des moyens de production de base. Ne pas anticiper ce surplus de consommation lié au rechargement des voitures électriques pourrait engendrer d'importants désagréments en surchargeant les pointes et l'utilisation des réseaux parfois déjà à leurs limites. Le signal tarifaire, tout autant que la communication vers le véhicule sont des outils à mettre en oeuvre pour permettre des rechargements programmés en heures creuses. Les voitures pourraient servir de stockage tampon pour limiter les variations de consommation. Lorsque la demande est faible, comme la nuit, les véhicules électriques sont chargés au maximum pour éviter les surproductions. A l'inverse, lors de brefs pics de demande, les voitures électriques connectées pourraient décharger leur énergie sur le réseau pour contribuer à gommer ces pointes [19].

Des technologies visant à préparer les réseaux intelligents au défi que posent les véhicules électriques doivent être envisagées afin de répondre aux besoins des automobilistes, des prestataires de service et des opérateurs de réseau. Les dispositifs de charge destinés aux constructions résidentielles doivent offrir un fonctionnement efficace à un faible niveau d'énergie, permettant de recharger une batterie en une nuit, avec un impact minimum sur le réseau et pour un coût abordable. Les installations de charge publiques doivent être robustes et capables de recharger une batterie en quelques heures, lorsque le conducteur du véhicule est au travail, par exemple. Ils devront, en outre, intégrer des systèmes de paiement et/ou d'identification de l'utilisateur. La charge ultra rapide permettra de recharger les batteries d'un véhicule électrique en quelques minutes, soit l'équivalent du temps nécessaire au ravitaillement d'un véhicule classique [20].

Le déploiement des compteurs intelligents (smart meter) associés à un premier réseau de télécommunication bidirectionnel est la pierre angulaire des futurs réseaux électriques, les capacités de communications bidirectionnelles permettent de dématérialiser remontée d'informations et interventions sur le compteur. Au cœur de ce système, la première brique des réseaux intelligents est un réseau de communication reliant fournisseurs d'énergie et usagers. La mise en place de tels réseaux ouvre, pour le distributeur d'électricité, la porte à de nombreuses applications telles que la maîtrise de l'offre et de la demande (demandresponse), l'intégration des énergies renouvelables dans la production, l'analyse des usages de l'énergie menant à une planification fine des ressources, etc. Plus faciles à gérer, auto-réparant, auto ajustant, modulables, capables d'intégrer des niveaux importants de productions réparties intermittentes, ces réseaux apportent des évolutions conduisant à une nouvelle approche des marchés de l'électricité [21].

Deux activités principales sont nécessaires au développement des réseaux intelligents: la première consiste à équiper progressivement les réseaux avec des matériels communicants et pilotables, la deuxième à concevoir parallèlement un écosystème applicatif permettant de créer la valeur en interagissant avec tout ou partie des matériels connectés. L'échange

d'informations, puis le pilotage des moyens de productions et des principaux gisements d'effacement est une alternative crédible à l'augmentation des capacités de pointes fortement carbonées. C'est ce qu'on appelle une gestion proactive permettant des effacements ou déplacements de consommation et qui présente une véritable alternative au modèle classique. Les gisements inégaux mais importants que constituent les industriels, le tertiaire et les résidentiels présentent des particularités fortes et des coûts d'effacements spécifiques. Si l'effacement Industriel peut permettre de réduire par deux le coût du MWh de pointe, les gisements diffus sont plus complexes à adresser mais représentent une incroyable profondeur et l'opportunité de faire évoluer sur le long terme le marché de l'électricité [18].

Les initiatives locales à l'échelle d'une ville qui visent à coordonner les productions décentralisées, les moyens de stockage et les sites de consommation, ainsi que, notamment, les infrastructures de recharge des véhicules électriques ou d'autres projets de type éco-quartiers sont des pistes à faire évoluer les réseaux dans un modèle bottom – up et participer largement au développement des « Villes Durables et Intelligentes » (smart cities). Les villes ont donc un véritable rôle d'incubateur des projets éco-innovants, en permettant à l'ensemble des acteurs concernés de se retrouver sur un même territoire afin d'associer leurs technologies et services pour développer des systèmes communs explorant les interactions complexes d'une agglomération pour en tirer la valeur ajoutée. La mise en place de technologies intelligentes ouvre de nouvelles possibilités de sensibilisation des habitants à la réduction des consommations d'énergies domestiques. Les technologies communicantes améliorent la visibilité quant aux besoins énergétiques actuels et futurs des villes. La surveillance et le contrôle de la consommation couplés à la flexibilité des réseaux intelligents assurent la pérennité du développement économique des villes et leur attractivité. A titre d'exemple, on peut citer les objectifs que se fixe l'Union Européenne consistant à responsabiliser les villes pour qu'elles puissent porter à 20% la part des énergies propres dans la consommation finale d'énergie des habitants. L'émergence des véhicules électriques oblige aussi les villes à se transformer et à adapter leurs infrastructures afin de favoriser le développement de ces technologies propres. Dans ces villes, les éco-quartiers, sur la base d'une approche tridimensionnelle (sociale, environnementale et économique), incarnent un nouvel urbanisme qui respecte l'environnement (conception bioclimatique des bâtiments, gestion des déchets..) et favorise l'intégration sociale (mixité sociale et fonctionnelle...). La notion de smart home est liée à l'évolution numérique du réseau électrique domestique, idéalement couplé avec les systèmes de comptage intelligent. Des dispositifs permettent le pilotage énergétique des usages domestiques en les optimisant en fonction des intérêts préalablement définis du client et de la communauté. Le concept de smart home regroupe de nombreuses applications : domotique, efficacité énergétique, services liés aux énergies renouvelables, mise en réseau des appareils consommant de l'électricité, optimisation du mix énergétique domestique, etc. Automatismes, optimisation transparente des consommations et des sources d'approvisionnement sont donc des pistes de services valorisables auprès des consommateurs. De son côté, l'accès à l'effacement diffus apparaît actuellement comme la principale piste de financement de ces infrastructures pour les fournisseurs d'énergie électrique [18-21].

I.5 Conclusion

Le développement de mécanismes de communication a conduit à un changement des réseaux électriques afin qu'ils deviennent des réseaux intelligents, ce dernier rend les consommateurs d'électricité comme des éléments actifs où il intervient dans la gestion des réseaux électrique.

Dans ce chapitre, nous avons présenté d'une manière générale les réseaux électriques intelligents.

Chapitre II

Load Flow et Dispatching Economique

II.1 Introduction

Le calcul d'un load flow permet de voir qu'on peut satisfaire la consommation suivant un grand nombre de possibilités d'exploitation qui sont liées à la capacité de production. Celle-ci n'est pas fixée arbitrairement mais déterminée d'un point de vue économique d'où la recherche d'une répartition optimale des charges dans un réseau entre les différentes unités de production de manière à minimiser le coût de production. Cette répartition optimale doit pouvoir se faire en respectant des contraintes liées aux groupes de production. Cette répartition est aussi appelé dispatching économique. Pour ce faire, plusieurs méthodes peuvent être utilisées. On peut citer la méthode des coûts marginaux, la méthode du gradient, la méthode des coefficients B, etc. On utilisera dans ce travail la méthode des coûts marginaux.

II.2 Problème de programmation

Ce type de problème consiste à optimiser un critère coût donné par une fonction objectif C reflétant le coût de production d'énergie dans un réseau soumis à des contraintes : l'une h appelée contrainte égalité et l'autre g dite inégalité. C , h et g dépendent des variables d'état x , de commande u et perturbatrices p . Elles sont de la forme :

$$C=C(x,u,p) \quad (\text{II.1})$$

$$h(x,u,p)=0 \quad (\text{II.2})$$

$$g(x,u,p)<0 \quad (\text{II.3})$$

Le problème exprimé par les 3 relations ci-dessus est désigné par "problème général de programmation" et se présente sous la forme d'expressions non linéaires. La fonction coût C est donnée en monnaie par heure [22].

II.3 Fonction coût [23]

Dans la fonction coût de production d'énergie électrique C n'interviennent pas les paramètres fixes tels que les salaires, le coût des équipements, les coûts de maintenance, etc... On

considère seulement les coûts sur lesquels on peut agir c'est à dire ceux liés au combustible dans les différentes stations de production. Dans ces conditions, on a pour un réseau à N unités, le coût de production C tel que :

$$\mathbf{C} = \sum_{i=1}^N \mathbf{c}(\mathbf{i}) \quad \text{Monnaie/h} \quad (\text{II.4})$$

$c(i)$ est le coût de production relatif à chaque unité ou station de production i où la puissance active produite $P_G(i)$ influe sur le coût car liée à la puissance d'entrainement des turbines elle-même fonction de la consommation du combustible. La puissance réactive générée n'a aucune influence sur le coût puisqu'elle n'est liée qu'au mode d'excitation des alternateurs. On a donc :

$$\mathbf{c}(\mathbf{i}) = \mathbf{c}_i(\mathbf{P}_G(\mathbf{i})) \quad \text{Monnaie/h} \quad (\text{II.5})$$

L'expression de $c(i)$ est déterminée d'une façon empirique et donnée sous la forme polynomiale suivante :

$$\mathbf{c}(\mathbf{i}) = \alpha(\mathbf{i}) + \beta(\mathbf{i})\mathbf{P}_G(\mathbf{i}) + \gamma(\mathbf{i})\mathbf{P}_G^2(\mathbf{i}) + \delta(\mathbf{i})\mathbf{P}_G^3(\mathbf{i}) + \dots + \mu(\mathbf{i})\mathbf{P}_G^n(\mathbf{i}) \quad (\text{II.6})$$

Généralement les termes d'ordre supérieur à 2 sont négligeables d'où l'écriture de la fonction coût sous forme quadratique :

$$\mathbf{c}(\mathbf{i}) = \alpha(\mathbf{i}) + \beta(\mathbf{i})\mathbf{P}_G(\mathbf{i}) + \gamma(\mathbf{i})\mathbf{P}_G^2(\mathbf{i}) \quad (\text{II.7})$$

La figure 2.1 ci-dessous donne l'allure type d'une telle fonction :

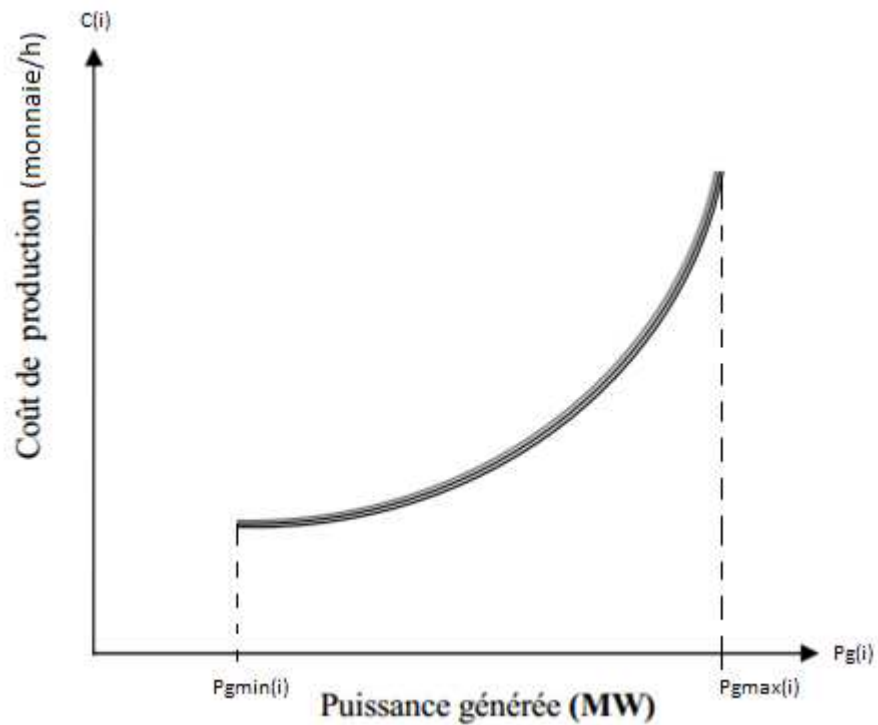


Figure II.1 Fonction coût de production

La fonction coût est donc de la forme :

$$C = C_1(P_G(1)) + C_2(P_G(2)) + \dots + C_N(P_G(N)) \quad (\text{II.8})$$

II.4 Contrainte égalité

Le choix des puissances actives générées est fait en fonction de la demande ce qui donne lieu à la contrainte égalité :

$$h(P_G(1), P_G(2), \dots, P_G(N)) = \sum_{i=1}^N P_G(i) - P_D - P_L = 0 \quad (\text{II.9})$$

N est le nombre de nœuds producteurs. P_D est la puissance active totale demandée par le réseau et donnée par

$$P_D = \sum_{i=1}^n P_D(i) \quad (\text{II.10})$$

n est le nombre de nœuds charge du réseau.

P_L sont les pertes de puissance active dans le réseau.

II.5 Contrainte inégalité

Chaque unité de production i fonctionne dans une plage de travail définie en ce qui concerne la puissance active produite par :

$$\mathbf{P}_{\text{GMIN}}(\mathbf{i}) \leq \mathbf{P}_{\text{G}}(\mathbf{i}) \leq \mathbf{P}_{\text{GMAX}}(\mathbf{i}) \quad (\text{II.11})$$

La puissance minimale n'est jamais nulle, ne serait-ce que pour tenir compte de la consommation des auxiliaires de l'unité de production elle-même. La puissance maximale dépasse rarement la puissance nominale de l'unité de production à moins d'imposer des durées de fonctionnement bien déterminées.

II.6 Méthode de calcul [22,23]

En négligeant les pertes de puissances actives P_L la combinaison de la fonction coût C et la contrainte égalité donne la fonction coût augmentée C^* qui s'écrit :

$$C^* = C - \lambda h \quad (\text{II.12})$$

Soit :

$$C^* = C(1) + C(2) + \dots + C(N) - \lambda \left(\sum_{i=1}^N P_G(i) - P_D \right) \quad (\text{II.13})$$

λ définit une constante appelée multiplicateur de Lagrange.

La minimisation de la fonction coût augmentée qui permet d'avoir les puissances optimales générées est caractérisée par l'équation (II.14) ci-dessous :

$$\frac{\partial C^*}{\partial P_G(i)} = 0 \quad i=1,2,\dots,N \quad (\text{II.14})$$

En négligeant les pertes de puissance active, la contrainte égalité h s'écrit sous la forme

$$h = \sum_{i=1}^N P_G(i) - P_D = 0 \quad (\text{II.15})$$

Tenant compte de l'expression (II.15), on obtient :

$$\frac{\partial h}{\partial P_G(i)} = 1 \quad i=1,2,\dots,N \quad (\text{II.16})$$

Tenant compte des expressions (II.14) et (II.15) on obtient la relation (II.17) ci-dessous :

$$\frac{\partial C}{\partial P_G(i)} - \lambda \frac{\partial h}{\partial P_G(i)} = 0 \quad i=1, 2, \dots, N \quad (\text{II.17})$$

Tenant compte de $C=C_1+C_2+\dots+C_N$ et de l'équation (II.16), l'équation (II.17) peut s'écrire sous la forme :

$$\frac{\partial C_i}{\partial P_G(i)} - \lambda = 0 \quad i=1, 2, \dots, N \quad (\text{II.18})$$

$C_i=C_i(P_{G(i)})$ permet d'écrire la relation (II.18) sous la forme suivante :

$$\frac{dC_i}{dP_G(i)} - \lambda = 0 \quad i=1, 2, \dots, N \quad (\text{II.19})$$

Et par suite, on peut écrire

$$\frac{dC_1}{dP_G(1)} = \frac{dC_2}{dP_G(2)} = \dots = \frac{dC_N}{dP_G(N)} = \lambda \quad (\text{II.20})$$

La dérivée $\frac{dC_i}{dP_G(i)}$ est désignée par coût marginal de production (incremental cost) de chaque unité de production. Il est noté IC_i . Si le coût de production électrique est donné en monnaie/h, le coût marginal sera exprimé en monnaie/MWh. Dans ces conditions, on peut dire que la répartition optimale des charges dans un réseau est obtenue quand les coûts marginaux des unités de production sont égaux.

II.7 Modélisation du réseau et calcul du load flow [24]

L'analyse du flux de puissances est utilisée pour déterminer l'état d'équilibre en exploitation d'un système électrique. Elle est largement utilisée par les professionnels de distribution d'énergie lors de la planification et l'exploitation des réseaux électriques. Les équations régissant un transit de puissance dans un réseau étant non linéaires, on aura recours pour les résoudre à des méthodes itératives de calcul. Nous utiliserons dans ce travail la méthode de Newton Raphson.

Pour un réseau à n nœuds, les équations reliant les tensions nodales et les courants nodaux sont écrites sous forme matricielle comme indiquée par l'expression (II.21) ci-dessous :

$$\bar{I} = Y \cdot \bar{V} \quad (\text{II.21})$$

Avec

$$\bar{I} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ I_n \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

$$V = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ V_n \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

Y la matrice admittance est telle que :

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdot & \cdot & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdot & \cdot & Y_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdot & \cdot & Y_{nm} \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

La relation (II.21) permet d'écrire :

$$\bar{I}_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} \bar{V}_j \quad (\text{II.25})$$

La puissance injectée au nœud i est telle que :

$$S_i = P_i + jQ_i = \overline{V}_i \cdot \overline{I}_i^* \quad (\text{II.26})$$

En posant :

$$\overline{V}_i = V_i \cdot e^{j\theta_i} \quad (\text{II.27})$$

Et

$$Y_{i,j} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (\text{II.28})$$

On aura

$$P_i = V_i \cdot \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (\text{II.29})$$

$$Q_i = V_i \cdot \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (\text{II.30})$$

avec

$$\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$$

Les écarts de puissances sont déterminés à partir des expressions (II.29), (II.30) et donnent:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \theta_1} \frac{\partial P_1}{\partial \theta_2} \dots \frac{\partial P_1}{\partial \theta_n} \frac{\partial P_1}{\partial V_1} \frac{\partial P_1}{\partial V_2} \dots \frac{\partial P_1}{\partial V_n} & \dots & \dots \\ \frac{\partial P_2}{\partial \theta_1} \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} \dots \frac{\partial P_2}{\partial \theta_n} \frac{\partial P_2}{\partial V_1} \frac{\partial P_2}{\partial V_2} \dots \frac{\partial P_2}{\partial V_n} & \dots & \dots \\ \vdots & \dots & \dots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \theta_1} \frac{\partial P_n}{\partial \theta_2} \dots \frac{\partial P_n}{\partial \theta_n} \frac{\partial P_n}{\partial V_1} \frac{\partial P_n}{\partial V_2} \dots \frac{\partial P_n}{\partial V_n} & \dots & \dots \\ \frac{\partial P_1}{\partial \theta_1} \frac{\partial P_1}{\partial \theta_2} \dots \frac{\partial P_1}{\partial \theta_n} \frac{\partial P_1}{\partial V_1} \frac{\partial P_1}{\partial V_2} \dots \frac{\partial P_1}{\partial V_n} & \dots & \dots \\ \frac{\partial P_2}{\partial \theta_1} \frac{\partial P_2}{\partial \theta_2} \dots \frac{\partial P_2}{\partial \theta_n} \frac{\partial P_2}{\partial V_1} \frac{\partial P_2}{\partial V_2} \dots \frac{\partial P_2}{\partial V_n} & \dots & \dots \\ \vdots & \dots & \dots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \theta_1} \frac{\partial P_n}{\partial \theta_2} \dots \frac{\partial P_n}{\partial \theta_n} \frac{\partial P_n}{\partial V_1} \frac{\partial P_n}{\partial V_2} \dots \frac{\partial P_n}{\partial V_n} & \dots & \dots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \vdots \\ \Delta \theta_n \\ \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

Soit sous forme compacte :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (\text{II.32})$$

et par suite :

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

P_i^s et Q_i^s sont les puissances active et réactive calculées injectées en chaque nœud i . Les puissances active et réactive demandées étant connues quel que soit le type de nœud, on peut donc définir chaque type de nœud selon le tableau II.1 ci-dessous qui tient compte des puissances actives et réactives nodales P et Q.

nœud	type 1	type 2	type 3
variables connues	P, Q	P, $ \mathbf{V} $	$ \mathbf{V} , \theta$
variables à déterminer	$ \mathbf{V} , \theta$	Q, θ	P, Q

Tableau II.1

Pour un réseau ne comportant que des nœuds de types 1 et 3, les étapes de calcul de circulation de puissances sont indiquées ci-dessous [25].

Etape 1 :

Entrée de toutes les données du réseau (caractéristiques des générateurs, des transformateurs, des lignes et câbles, des charges, tolérance admise, etc...)

Calcul des puissances nodales injectées P_i^s et Q_i^s $i=2,3,\dots,n$.

Formation de la matrice admittance.

Initialisation des tensions nodales du réseau.

Les valeurs des tensions nodales initiales sont prises voisines de la tension nominale du réseau. En valeurs réduites, on a les valeurs $1+j0$ pu tenant compte du fait que la tension de base retenue est la tension nominale du réseau.

Calcul des puissances P_i^s et Q_i^s par les relations (II.29) et (II.30).

Etape 2 :

On vérifie si la contrainte relative à l'écart de puissance en chaque nœud i est respectée c'est à dire :

$$\Delta P = |P_i^s - P_i| \leq \varepsilon$$

$$\Delta Q = |Q_i^s - Q_i| \leq \varepsilon$$

ε est la tolérance admise sur le calcul de l'écart de puissance. Si la contrainte n'est pas respectée, on calcule le jacobien J qui permet d'avoir les écarts de module de tension et de phase par la relation (II.33) d'où les nouvelles valeurs des tensions. On revient à l'étape 2.

Etape 3 :

Quand la contrainte est respectée, on a le plan de tension qui permet d'avoir les puissances de transit S_{ij} entre les nœuds i - j par l'expression :

$$S_{ij} = V_i I_{ij}^* = P_{ij} + jQ_{ij} = V_i [V_i^* - V_j^*] y_{ij}^* + V_i V_i^* y_{shij} \quad (II.34)$$

L'organigramme de calcul récapitulant les étapes précédentes est donné ci-dessous [26] :

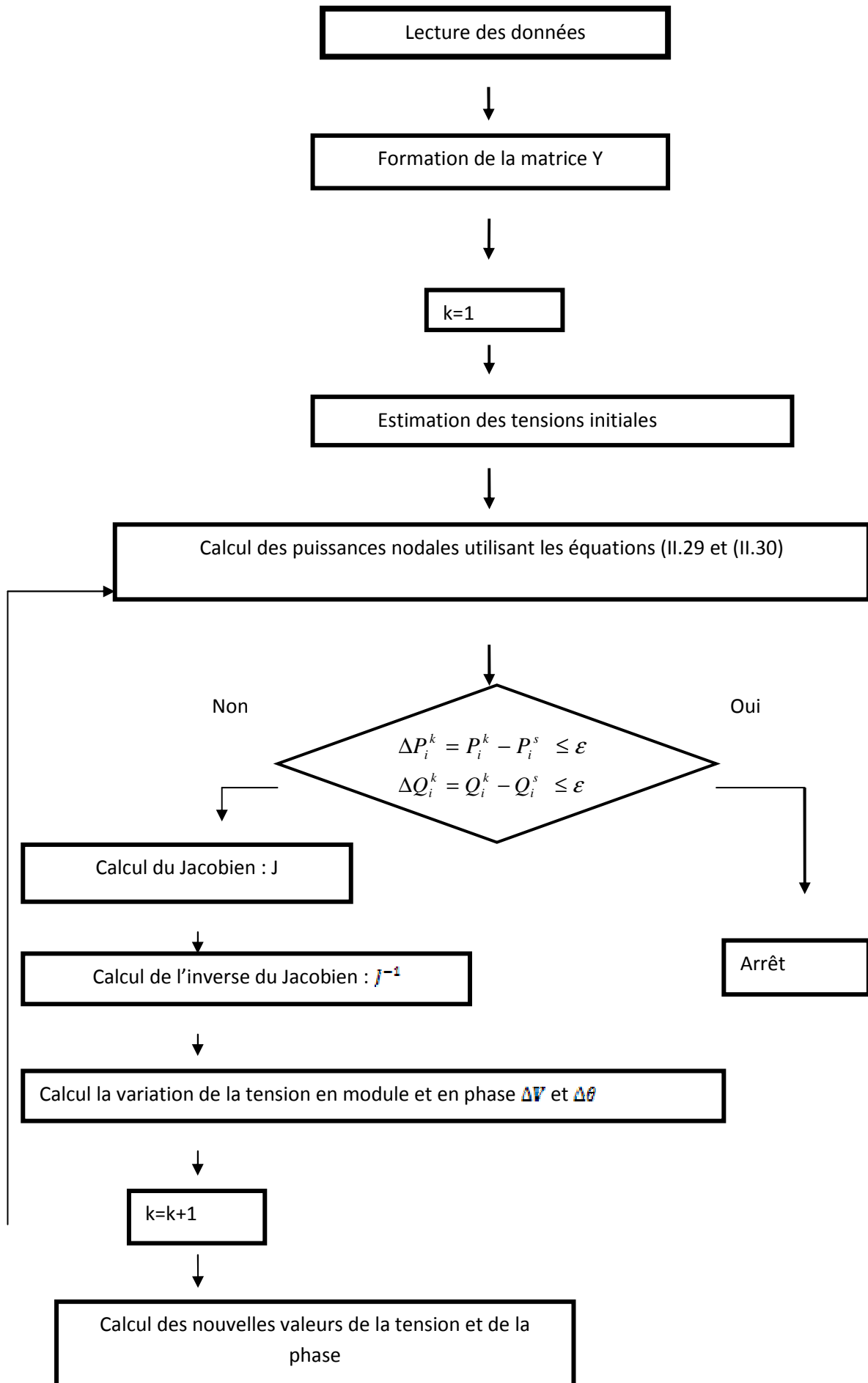


Figure II.2 Organigramme de calcul du load flow par la méthode de Newton Raphson

II.8 Simulation, résultats et discussion

Le schéma de la figure II.2ci-dessous représente le réseau test 3 machines-9 nœuds [7].

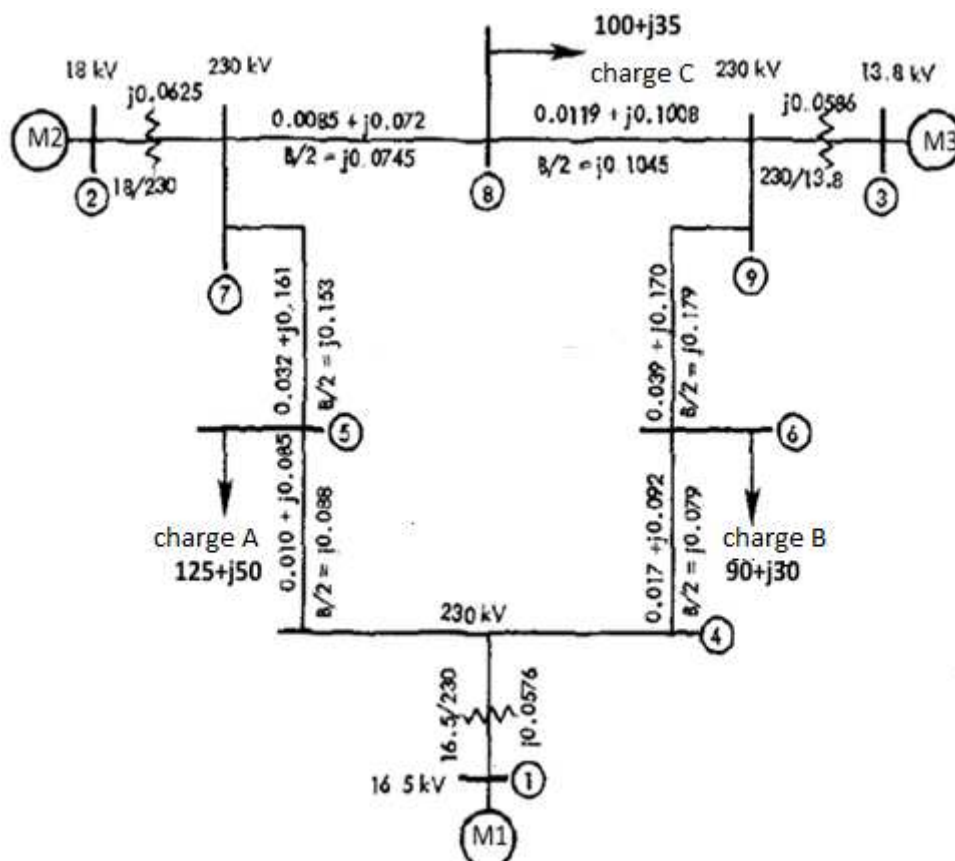


Figure II.2. Réseau 3 Machines 9 Nœuds.

Les fonctions coûts de chaque groupe de production sont :

$$C_1 = 100 + 1.2P_{g1} + 0.002P_{g1}^2$$

$$C_2 = 100 + 1.3P_{g2} + 0.003P_{g2}^2$$

$$C_3 = 100 + 1.4P_{g3} + 0.004P_{g3}^2$$

Cette variante de coût est dite variante 1. On utilise le logiciel PowerWorld pour déterminer la répartition optimale des charges entre les trois groupes de production. La figure II.3 montre les résultats obtenus comme prévu, les groupes de production sont sollicités selon leur fonction coûts. Dans notre cas, les groupes 1,2 et 3 sont sollicités dans cet ordre car les fonctions coûts c_1, c_2 et c_3 sont dans cet ordre.

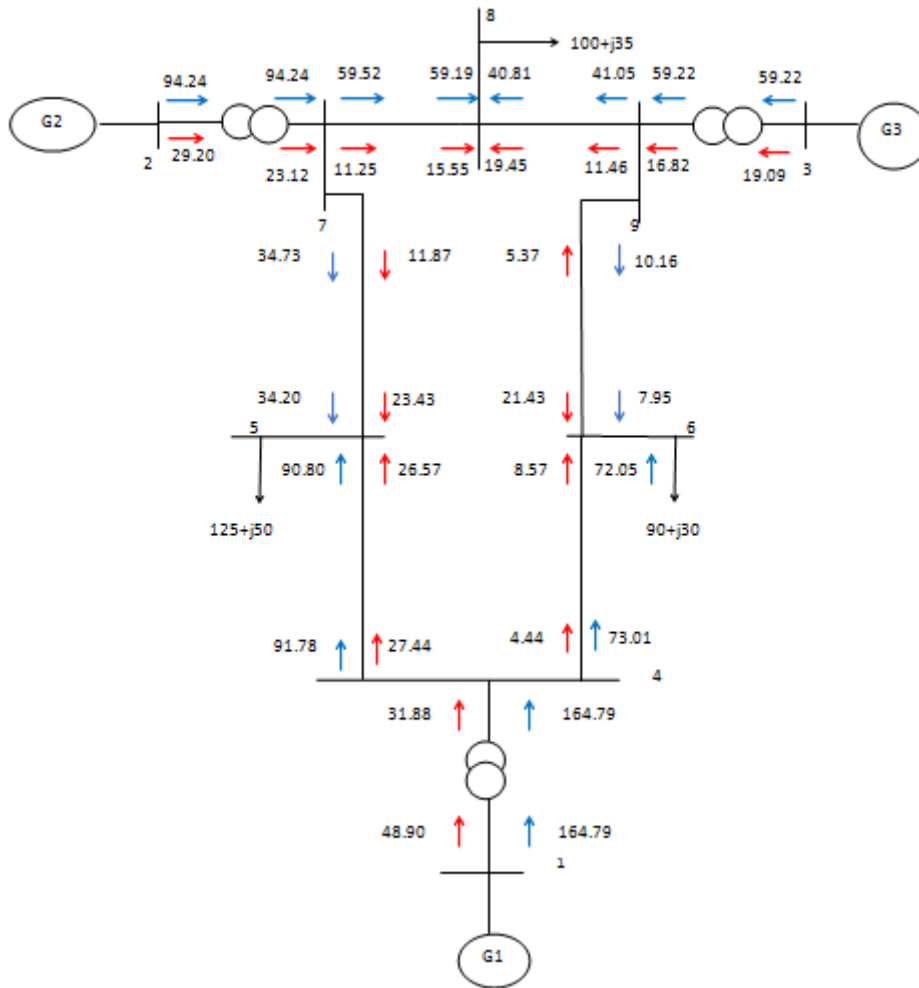


Figure II.3. Load Flow : Variante 1

Pour confirmer la notion du dispatching économique, on permute les coûts C_1 et C_2 c'est-à-dire on suppose que le groupe de production G_1 a comme fonction celle qu'avait le groupe de production G_2 et inversement le coût du groupe de production G_2 a comme coût la fonction qui était en 1. Le coût de production G_3 reste inchangé. Cette variante de coût 2 est :

$$C_1 = 100 + 1.3P_{g1} + 0.003P_{g1}^2$$

$$C_2 = 100 + 1.2P_{g2} + 0.002P_{g2}^2$$

$$C_3 = 100 + 1.4P_{g3} + 0.004P_{g3}^2$$

Les résultats obtenus avec cette configuration de coûts sont donnés dans la figure II.4 ci-dessous

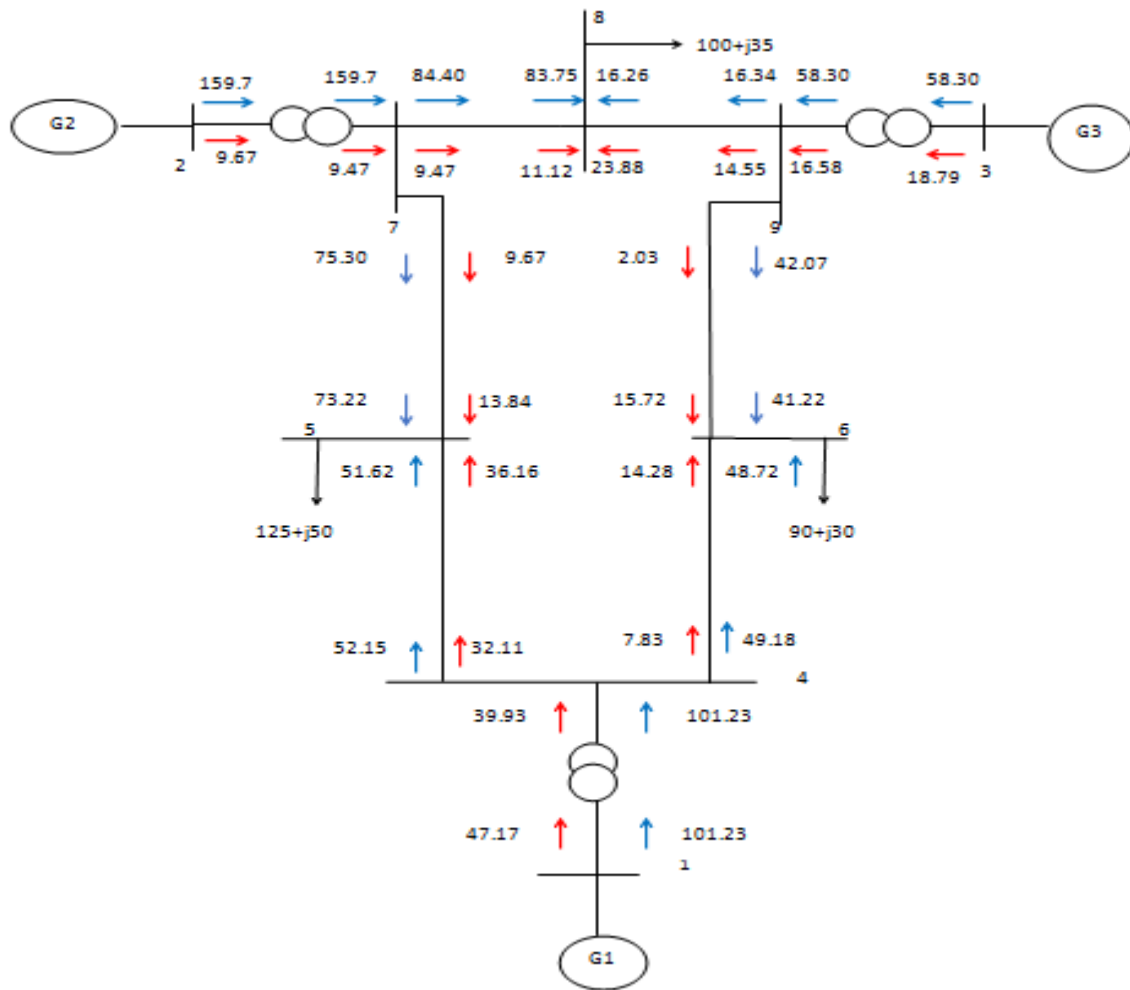


Figure II.4 : Load Flow : Variante 2

Le logiciel PowerWorld ne permet pas d'avoir le plan de tension réel du réseau. Pour avoir l'état réel du réseau et tenant compte du résultat de dispatching, on utilise le logiciel PSAT qui nous permet d'avoir le plan de tension et le load flow dans les conditions de coût de la variante 1. Les résultats obtenus sont données par la figure II.5 ci-dessous. On note une surtension aux nœuds 2, 3, 7, 8 et 9. Le réglage de tension au niveau du nœud 1 pris comme nœud bilan auquel on donne la valeur 0.9pu permet de résoudre le problème de surtension comme le montrent les résultats de la figure II.6.

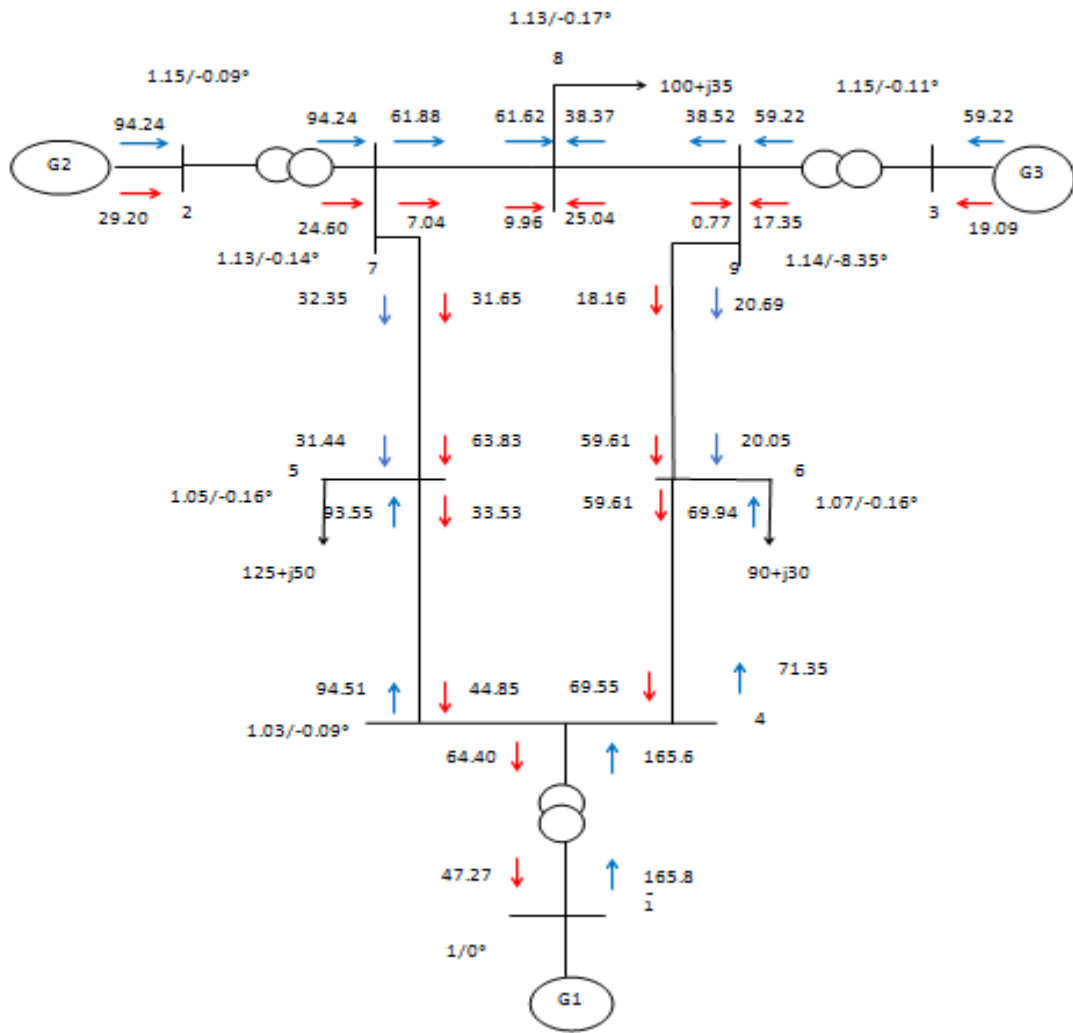


Figure II.5: Simulation avec Psat.

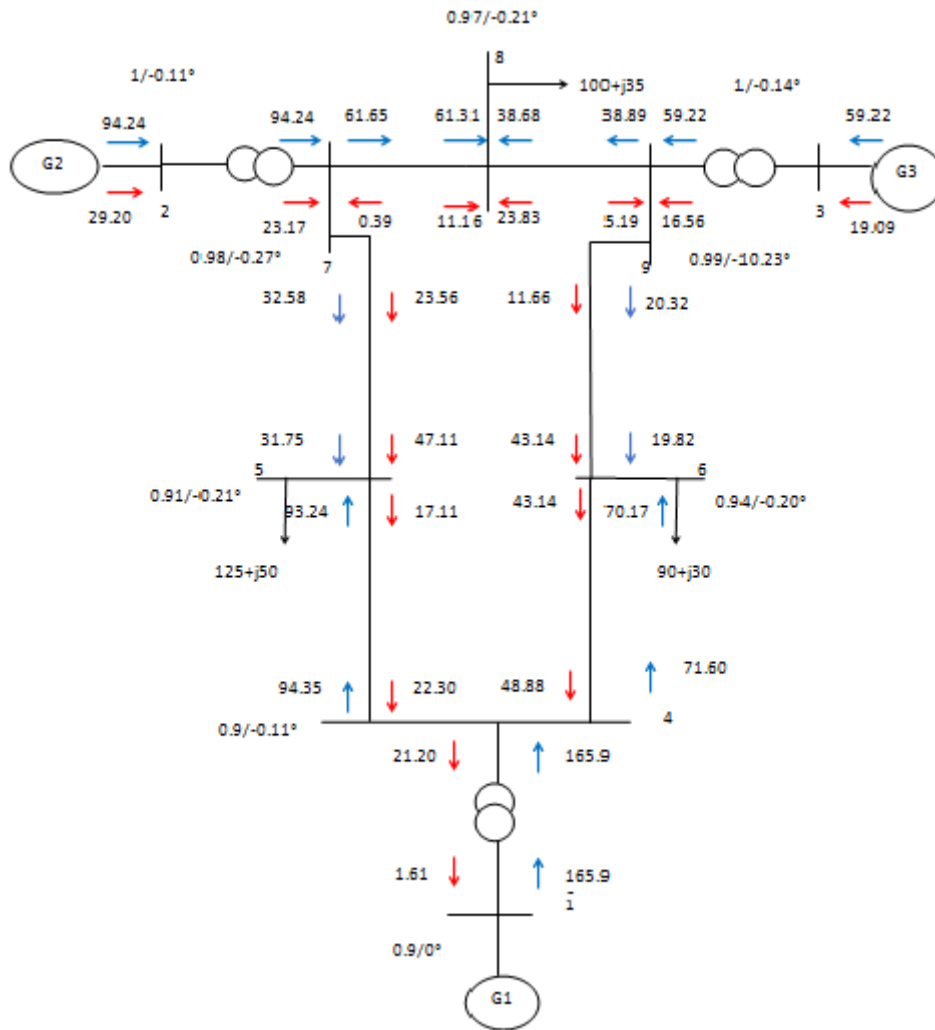


Figure II.6: Simulation avec Psat.

Les résultats obtenus dans les deux situations, montrent que la production de la puissance active suit la fonction coût qui désigne le prix du KWh le moins cher. La comparaison des résultats obtenus par les deux logiciel PowerWorld et Psat permet de valider l'efficacité de ces deux logiciels dans l'étude du load flow. Un réglage de tension au niveau du nœud bilan a été effectué afin de garder toutes les tensions des nœuds dans la plage tolérée.

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié le transit de puissances dans un réseau en tenant compte du dispatching économique. La méthode des coûts marginaux (incrémental cost) a été utilisée. Nous avons utilisé une version du logiciel PowerWorld qui a l'inconvénient de ne pas fournir

le plan de tensions réel du réseau. Aussi nous avons été amenés à utiliser le logiciel PAST pour avoir ce plan de tensions. Nous avons montré dans ce chapitre, que les fonctions coûts des unités de production jouent un rôle déterminant dans la répartition des charges entre ces mêmes unités.

Chapitre III

Contribution des FACTS à la conduite des réseaux

III.1 Introduction

Le maintien de la tension du réseau à des valeurs souhaitées peut être obtenu en agissant sur l'excitation des alternateurs. Cette façon de procéder est liée à la compensation synchrone. Cependant, quand celle-ci s'avère insuffisante, on est amené à faire appel à d'autres mesures entre autres à la compensation statique qui consiste à installer des dispositifs permettant l'échange de puissance réactive avec le réseau en absorption ou fourniture selon les besoins de ce dernier [5]. Les FACTS basés sur la technologie mettant en œuvre des composants contrôlables tels que les thyristors GTO (Gate Turn Off), les transistors IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) et les thyristors IGCT (Insulated Gate Commuted Thyristor) répondent à ce souci. Ils permettent aussi le contrôle de transit de puissances dans les réseaux. Ils sont classés selon le mode de connexion au réseau d'où les trois catégories suivantes :

- FACTS de type parallèle : SVC (Static Var Compensator), STATCOM (Static Synchronous Compensator), ...
- FACTS de type série : SSSC (Static Synchronous Series Compensator), TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor), ...
- FACTS de hybride (série - parallèle) : UPFC (Unified Power Flow Controller), SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage), ...

Dans ce chapitre, nous introduisons la notion de compensation et nous montrons comment un dispositif FACTS tel que l'UPFC peut contribuer à contrôler aussi bien la tension que le transit de puissance d'un réseau. On montre aussi quels sont les effets de ses deux composantes principales à savoir le STATCOM et le SSSC sur le réseau.

III.2 Principe de compensation du réactif [27]

La figure III.1 montre un schéma de réseau avec une charge connectée au nœud 2.

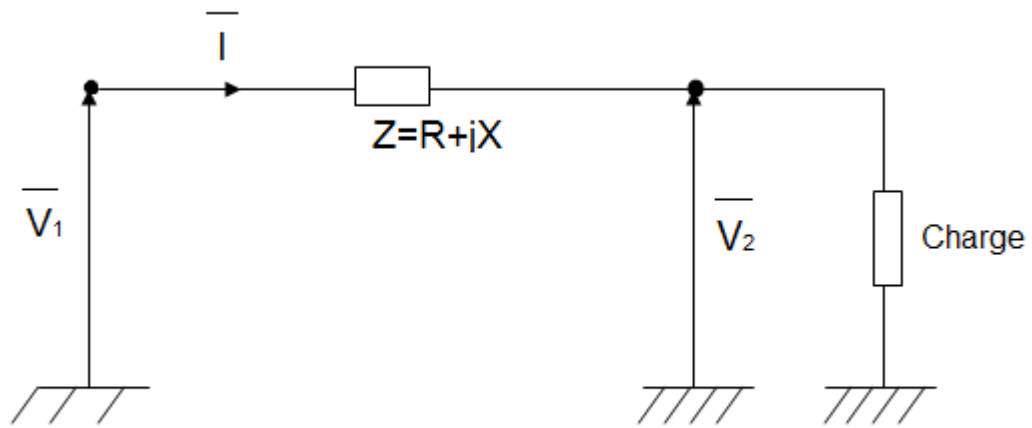


Figure III.1

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_2 + (R + jX)\bar{I} \quad (\text{III.1})$$

III.2.1 Cas d'une charge inductive

Le diagramme vectoriel de tensions dans ce cas est celui de la figure III.2.

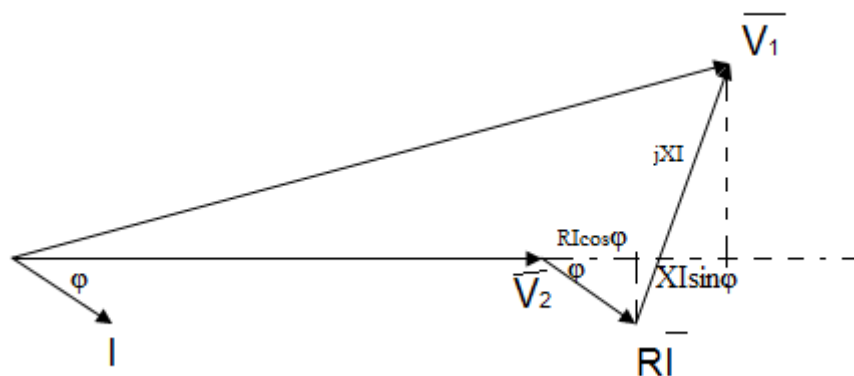


Figure III.2 Diagramme vectoriel de tensions dans le cas d'une charge inductive

L'écart de tension entre \bar{V}_1 et \bar{V}_2 est tel que :

$$\Delta V = RI \cos \varphi + XI \sin \varphi \quad (\text{III.2})$$

Tenant compte de $P = VI \cos \varphi$ et $Q = VI \sin \varphi$, l'équation (III.2) s'écrit :

$$\Delta V = \frac{RP + XQ}{V} \quad (\text{III.3})$$

On observe une chute de tension au nœud 2 où \bar{V}_2 est inférieur à \bar{V}_1 . La diminution de cette chute de tension ne peut se faire que par action sur Q de l'équation (III.3). L'annulation de cette puissance Q transportée par la ligne du nœud 1 au nœud 2 et sa production au nœud 2 par insertion d'une batterie de condensateurs permet de diminuer ΔV et par conséquent améliorer la tension au nœud 2.

III.2.2 Cas d'une charge capacitive

Le diagramme vectoriel de tensions dans ce cas est celui de la figure III.3.

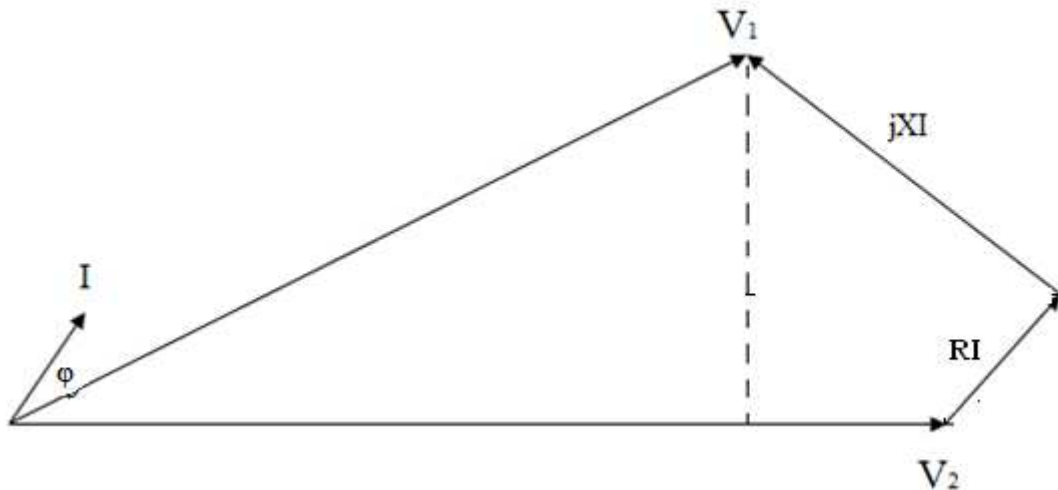


Figure III.3 Diagramme vectoriel de tensions dans le cas d'une charge capacitive

L'écart de tension entre \bar{V}_1 et \bar{V}_2 est tel que :

$$\Delta V = RI \cos \varphi - XI \sin \varphi \quad (\text{III.4})$$

ΔV dans ce cas est négatif puisque $XI \sin \varphi$ est supérieur à $RI \cos \varphi$. On observe une augmentation de tension au nœud 2 où \bar{V}_2 est supérieur à \bar{V}_1 . Tenant compte de $P = VI \cos \varphi$ et $Q = VI \sin \varphi$, l'équation (III.4) s'écrit :

$$\Delta V = \frac{RP - XQ}{V} \quad (\text{III.5})$$

Augmenter ΔV dans ce cas ne peut se faire qu'en faisant appel à plus de puissance réactive Q transportée par le réseau afin de renverser la tendance. Ceci se fait par insertion d'une batterie d'inductances au nœud 2 ce qui permet de régler le problème de surtension en ce nœud.

III.3 Système FACTS utilisé

III.3.1 Principe de fonctionnement du STATCOM [28,29]

Le STATCOM est un compensateur statique synchrone. Il réalise une compensation de type parallèle en agissant comme un véritable compensateur synchrone statique. Il est constitué d'un convertisseur alternatif-continu à commutation forcée raccordé côté continu à un élément de stockage d'énergie : un condensateur C . La tension du coté alternatif est en phase avec celle du réseau de manière à n'échanger que de l'énergie réactive avec ce dernier. On règle la valeur du courant et le sens de la puissance réactive échangée par la valeur de la tension du convertisseur. La figure III.4 montre la structure du dispositif. Les cellules de commutation du convertisseur sont bidirectionnelles. X_l est la réactance de la ligne.

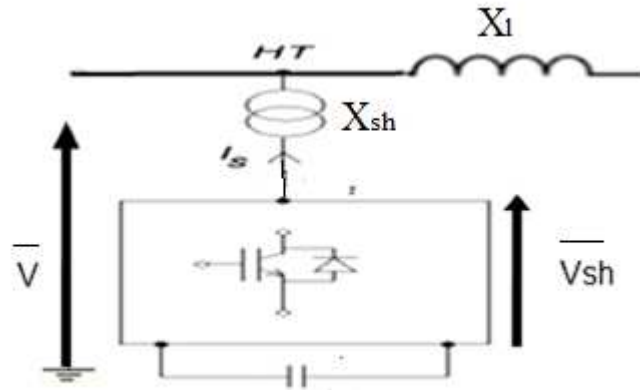


Figure III.4 Schéma de base du STATCOM

L'échange d'énergie réactive se fait par le contrôle de la tension du convertisseur \bar{V}_{sh} qui est en phase avec la tension \bar{V} du jeu de barres où le STATCOM est connecté au réseau par le transformateur shunt de réactance X_{sh} . L'écoulement des puissances active et réactive entre ces deux sources de tension est donné par :

$$P_{sh} = \frac{V \cdot V_{sh}}{X_{sh}} \sin \delta \quad (\text{III.6})$$

$$Q_{sh} = \frac{V}{X_{sh}} (V - V_{sh} \cos \delta) \quad (\text{III.7})$$

δ est le déphasage entre les tensions \bar{V} et \bar{V}_{sh} . δ étant nul, l'équation (III.6) montre qu'il n'y a pas d'écoulement de puissance active entre le STATCOM et le réseau. L'équation (III.7) montre que la puissance réactive échangée entre le réseau et le STATCOM dépend de l'écart entre V et V_{sh} . Elle est donnée par l'expression (III.8) ci-dessous :

$$Q_{sh} = \frac{V}{X_{sh}} (V - V_{sh}) \quad (\text{III.8})$$

- Si $V = V_{sh}$: pas de génération ni d'absorption de puissance réactive.
- Si $V > V_{sh}$: le STATCOM absorbe de la puissance réactive provoquant une diminution de V . Un courant inductif \bar{I}_{sh} s'établit entre les deux sources de tension à travers la réactance X_{sh} . Ce courant est en retard de 90° par rapport à \bar{V} comme montré par la figure III.5a
- Si $V < V_{sh}$: le STATCOM génère de la puissance réactive provoquant une augmentation de la tension V . Le courant est capacitif \bar{I}_{sh} . Il est en avance de 90° par rapport à la tension du nœud comme montré par la figure III.5b

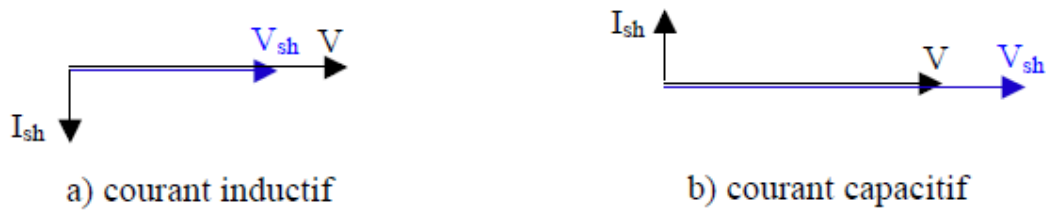


Figure III.5 Diagramme vectoriel du STATCOM.

III.3.2 Principe de fonctionnement du SSSC [30,4]

La structure de base du SSSC ne diffère de celle du STATCOM que par la connexion qui est en série avec la ligne. Il se compose d'un convertisseur de tension associé à une source de tension continue (condensateur C). Il est connecté au réseau en série à travers un transformateur de couplage.

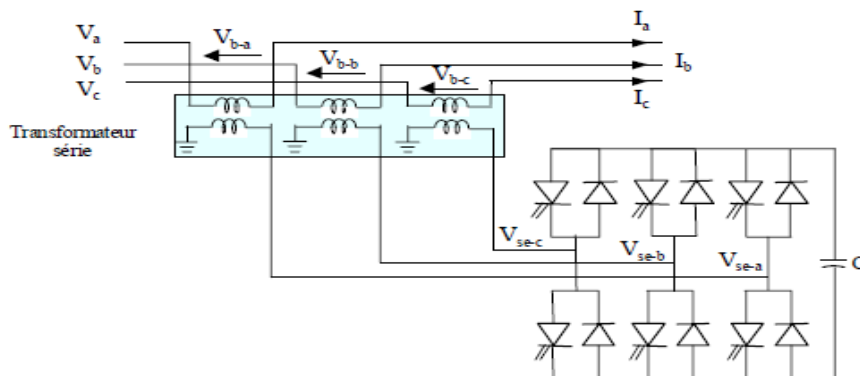


Figure III.6 Schéma de base du SSSC

Le rôle du SSSC est d'introduire une tension triphasée \bar{V}_q en quadrature avec le courant de la ligne dans le but d'augmenter ou de diminuer l'écart de tension. Le schéma de la figure III.7 représente le réseau équipé du SSSC qui injecte une tension \bar{V}_q en quadrature avec le courant de ligne \bar{I} .

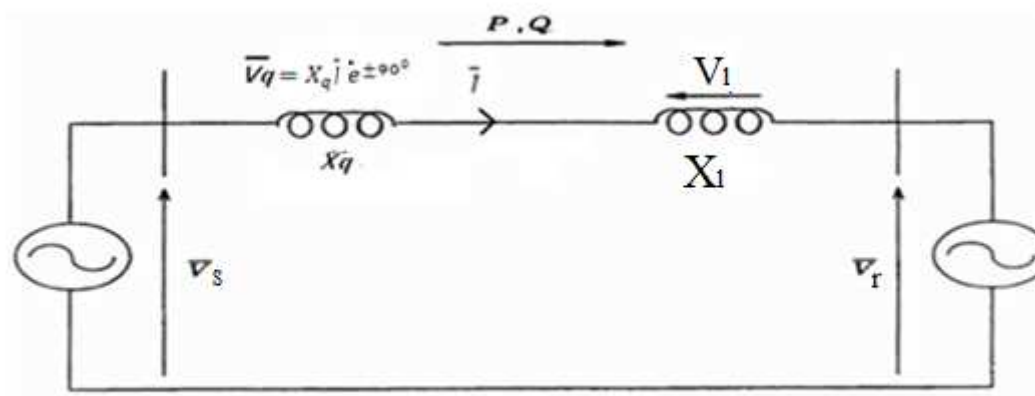


Figure III.7 Schéma équivalent d'un système électrique avec SSSC

\bar{V}_s et \bar{V}_r sont les tensions aux extrémités de la ligne. Elles sont telles que :

$$\bar{V}_s = V_s e^{j\theta_s}$$

$$\bar{V}_r = V_r e^{j\theta_r}$$

La tension injectée est de la forme :

$$\bar{V}_q = V_q \cdot e^{j\theta_q} = V_q \cdot e^{j(\theta \pm 90^\circ)} \quad (\text{III.9})$$

Avec :

$$V_q = X_q \cdot I \quad (\text{III.10})$$

X_q : réactance équivalente du SSSC

$\theta_q = \theta + 90^\circ$ en mode inductif

$\theta_q = \theta - 90^\circ$ en mode capacitif

L'équation (III.9) s'écrit aussi :

$$\bar{V}_q = V_q e^{j\theta_q} = X_q I e^{j(\theta \pm 90^\circ)} = X_q I e^{j\theta} e^{\pm j90^\circ} = X_q \bar{I} e^{\pm j90^\circ} \quad (\text{III.11})$$

Les figures III.8 et III.9 représentent le schéma équivalent et le diagramme vectoriel de chaque mode.

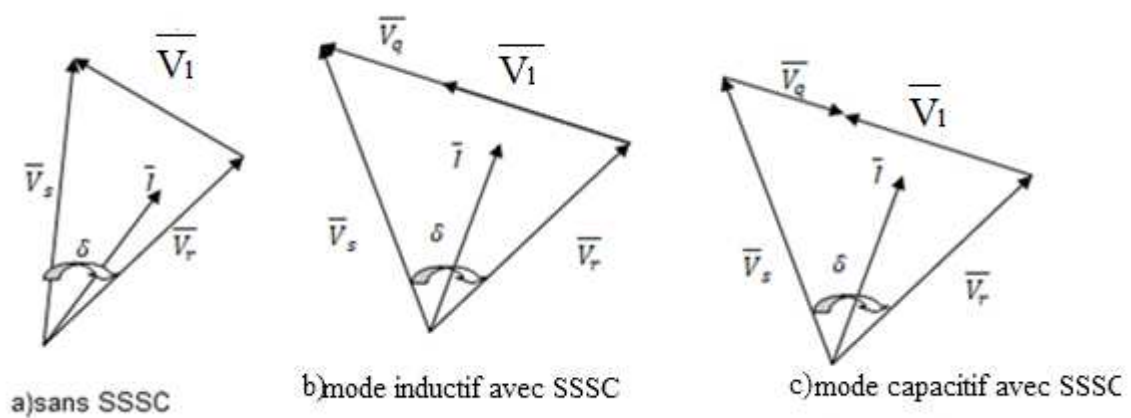


Figure III.8 Diagramme vectoriel des différents modes de compensation

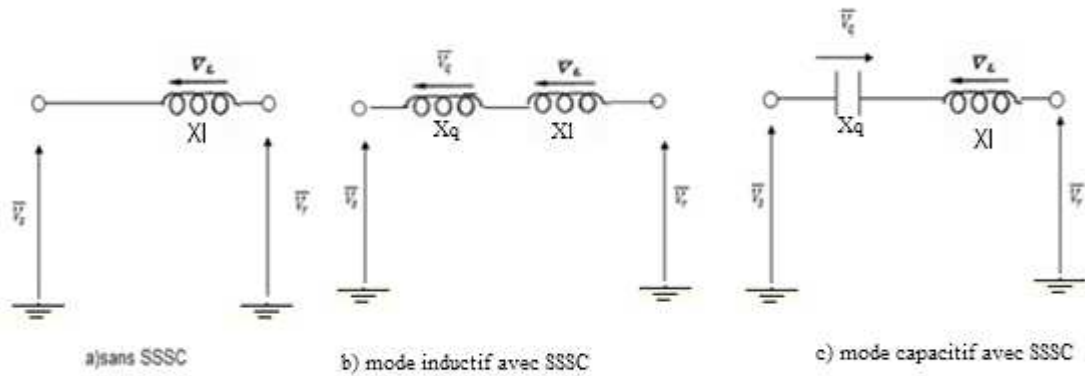


Figure III.9 Schéma équivalent des différents modes de compensation

L'introduction du SSSC permet d'écrire :

$$P = \frac{V_s V_r}{X_{eff}(\alpha)} \sin \delta \quad (III.12)$$

$$Q = \frac{V_s^2}{X_{eff}(\alpha)} - \frac{V_s V_r}{X_{eff}(\alpha)} \cos \delta \quad (III.13)$$

où :

$$X_{eff}(\alpha) = X_l - X_q \text{ en mode capacitif.}$$

$$X_{eff}(\alpha) = X_l + X_q \text{ en mode inductif.}$$

$$\delta = \theta_s - \theta_r$$

La tension \bar{V}_q est telle que

$$\overline{V}_q = jX_q \overline{I} \quad (\text{III.14})$$

d'où le courant

$$\overline{I} = -j \frac{\overline{V}_q}{X_q} \quad (\text{III.15})$$

III.4 Description et principe de fonctionnement de l'UPFC [5,31]

L'UPFC appelé aussi variateur de charge universel est capable de contrôler simultanément et indépendamment la puissance active et la puissance réactive. Il peut contrôler les trois paramètres associés au transit de puissance dans une ligne électrique :

- la tension de la ligne,
- l'impédance de la ligne,
- le déphasage des tensions aux extrémités de la ligne.

III.4.1 Description du système

L'UPFC consiste comme le montre la figure III.10 ci-dessous en deux sources synchrones couplées au réseau par des transformateurs : la première source constituée par le STATCOM est placée en parallèle et la deuxième source constituée par le SSSC est placée en série. Ces deux sources sont connectées par une liaison à courant continu et ont en commun une capacité de stockage. Le système permet à la fois le contrôle de la puissance active et celui de la tension de ligne. Il est capable d'accomplir les fonctions des autres dispositifs FACTS à savoir le réglage de la tension puisqu'il assure la fonction de compensation d'énergie réactive en fournissant au réseau de la puissance réactive ou en en absorbant et ce indépendamment de la puissance active échangée avec lui. Il peut aussi contrôler la répartition du flux d'énergie (transit de puissance), améliorer la stabilité du réseau et atténuer les oscillations de puissance.

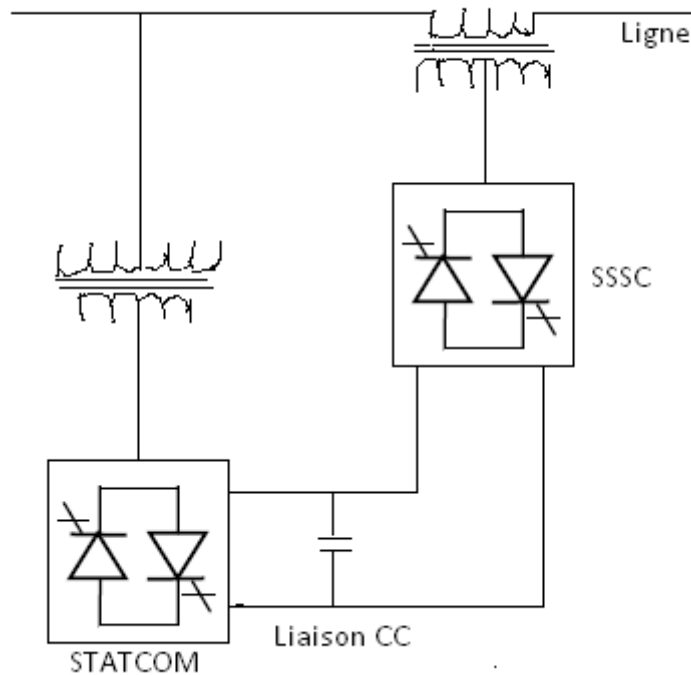


Figure III.10 Schéma de l'UPFC

III.4.2 Principe de fonctionnement

La figure III.11 ci-dessous décrit le principe de fonctionnement du dispositif. Le convertisseur 1 est utilisé à travers la liaison continue pour fournir la puissance active nécessaire au convertisseur 2. Ce dernier injecte la tension V_q et fournit les puissances active et réactive nécessaires à la compensation série. L'énorme avantage de l'UPFC est bien sûr la flexibilité qu'il offre en permettant le contrôle de la tension, de l'angle de transport et de l'impédance de la ligne. De plus, il peut basculer de l'une à l'autre de ces fonctions instantanément par action sur la commande de convertisseurs, ce qui permet de pouvoir faire face à des défauts ou à des modifications du réseau en privilégiant temporairement l'une ou l'autre des fonctions. Il peut alterner différentes fonctions : par exemple, la fonction compensation shunt pourra être utilisée pour soutenir la tension alors que la partie série pourra être utilisée afin d'amortir les oscillations de puissances.

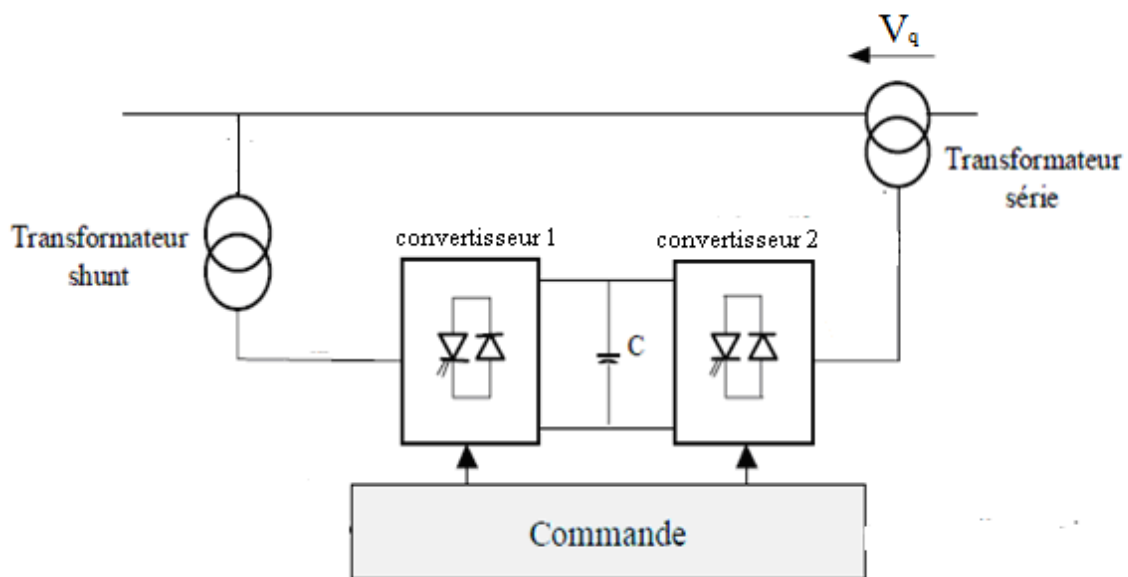


Figure III.11 Configuration UPFC

Pour illustrer l'apport d'un tel dispositif à la conduite des réseaux électriques, considérons, par exemple, deux régions, une région source, la région 1, et une région réceptrice, la région 2, dont les tensions sont égales en modules et en phases. Ces deux régions sont connectées par une liaison de réactance X_1 comme indiqué sur la figure III.12.

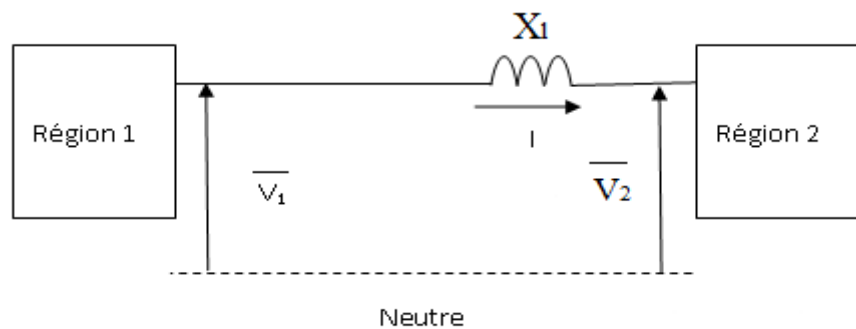


Figure III.12 Réseaux interconnectés

Les tensions des deux régions sont telles que :

$$\bar{V}_1 = V_1 \angle \theta_1$$

$$\bar{V}_2 = V_2 \angle \theta_2$$

L'égalité des tensions des deux régions en modules et en phases fait que le courant dans la ligne d'impédance X_l reliant les deux régions est nul : il ne peut y avoir donc d'échange d'énergie entre les deux régions. Cela peut s'avérer inefficace dans le cas où une région pouvant disposer d'un surplus de puissance ne peut en aucun cas secourir l'autre si celle-ci est dans le besoin. En effet, la puissance P de transit entre les régions 1 et 2 donnée par la relation (III.16) est nulle dans ces conditions de tensions. En effet, les déphasages θ_1 et θ_2 sont égaux ce qui fait que le transit de puissance donnée par l'équation (III.16) est nul.

$$P = \frac{V_1 V_2}{X_l} \sin(\theta_1 - \theta_2) \quad (\text{III.16})$$

Pour régler ce problème, supposons que l'on dispose d'une source de tension V_q branchée en série avec la ligne et dont la valeur et l'angle sont variables. Une façon de faire est d'intercaler un convertisseur CC /CA du côté de la région source, comme le montre la figure III.13.

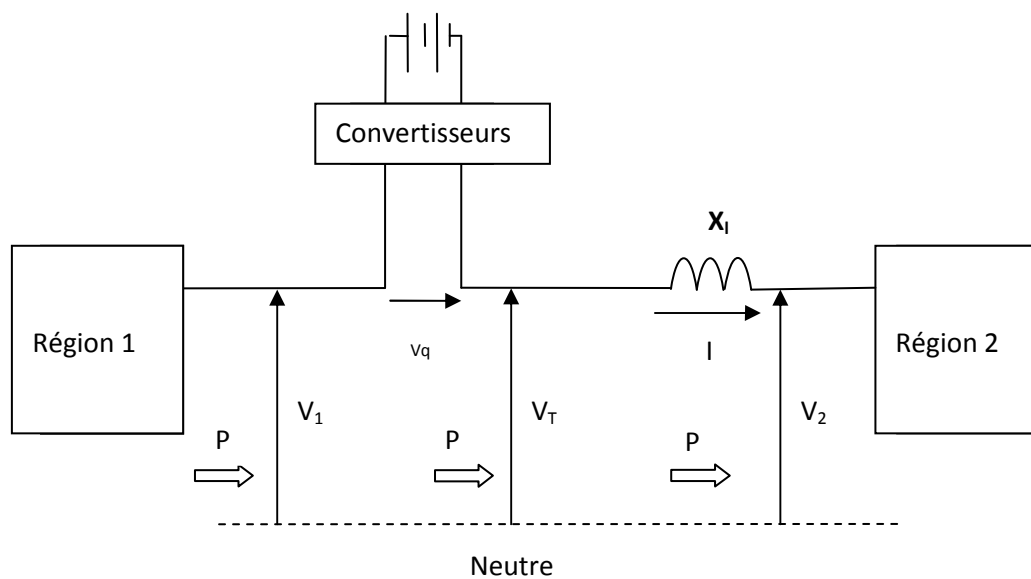


Figure III.13

Une source de tension variable V_q branchée en série avec la ligne permet de modifier le plan de tensions. Ceci peut se faire en intercalant un convertisseur CC /CA. L'introduction de V_q permet de modifier la tension en amont de la réactance X_l qui prend la valeur V_T comme le montre la figure III.13.

$$\bar{V}_T = \bar{V}_1 + \bar{V}_q \quad (\text{III.17})$$

$$\bar{V}_T = jX_l \bar{I} + \bar{V}_2 \quad (\text{III.18})$$

L'angle entre V_T et V_2 est alors δ , il s'ensuit qu'une puissance active sera transportée sur la ligne. Cette puissance est donnée par :

$$P = \frac{V_T V_2}{X_l} \sin \delta \quad (\text{III.19})$$

III.5 Simulation, résultats et discussion

L'augmentation de la charge du réseau est telle qu'indiquée dans le tableau III.2 ci-dessous.

	P(MW)	Q(MVar)
Charge A (nœud 5)	190	75
Charge B (nœud 6)	150	50
Charge C (nœud 8)	135	45

Tableau III.2 : Charge du réseau

Nous examinons le comportement du réseau dans cette situation. Le plan de tensions et la circulation de puissance obtenus et montrés dans la figure III.14 tiennent compte de la répartition optimale des charges, tenant compte des fonctions coûts suivantes :

$$C_1 = 100 + 1.2P_{G1} + 0.002P_{G1}^2$$

$$C_2 = 100 + 1.3P_{G2} + 0.003P_{G2}^2$$

$$C_3 = 100 + 1.4P_{G3} + 0.004P_{G3}^2$$

La charge maximale transmissible par les lignes du réseau est égale à 110 MVA. La figure III.14a montre une dégradation de la tension au niveau du nœud 5 et dont le module est égal à 0.81pu. On observe un transit de puissance sur la ligne égal à 153.68MVA ($S = \sqrt{153.4^2 + 9.27^2}$). Ce transit de puissance est trop élevé. La sécurité d'alimentation et la qualité de service priment sur le dispatching économique. Ceci nous amène à introduire les dispositifs FACTS pour voir dans quelle mesure, on peut régler le problème aussi bien de dégradation de la tension du nœud 5 que de transit de puissance élevée de la liaison 5 du réseau.

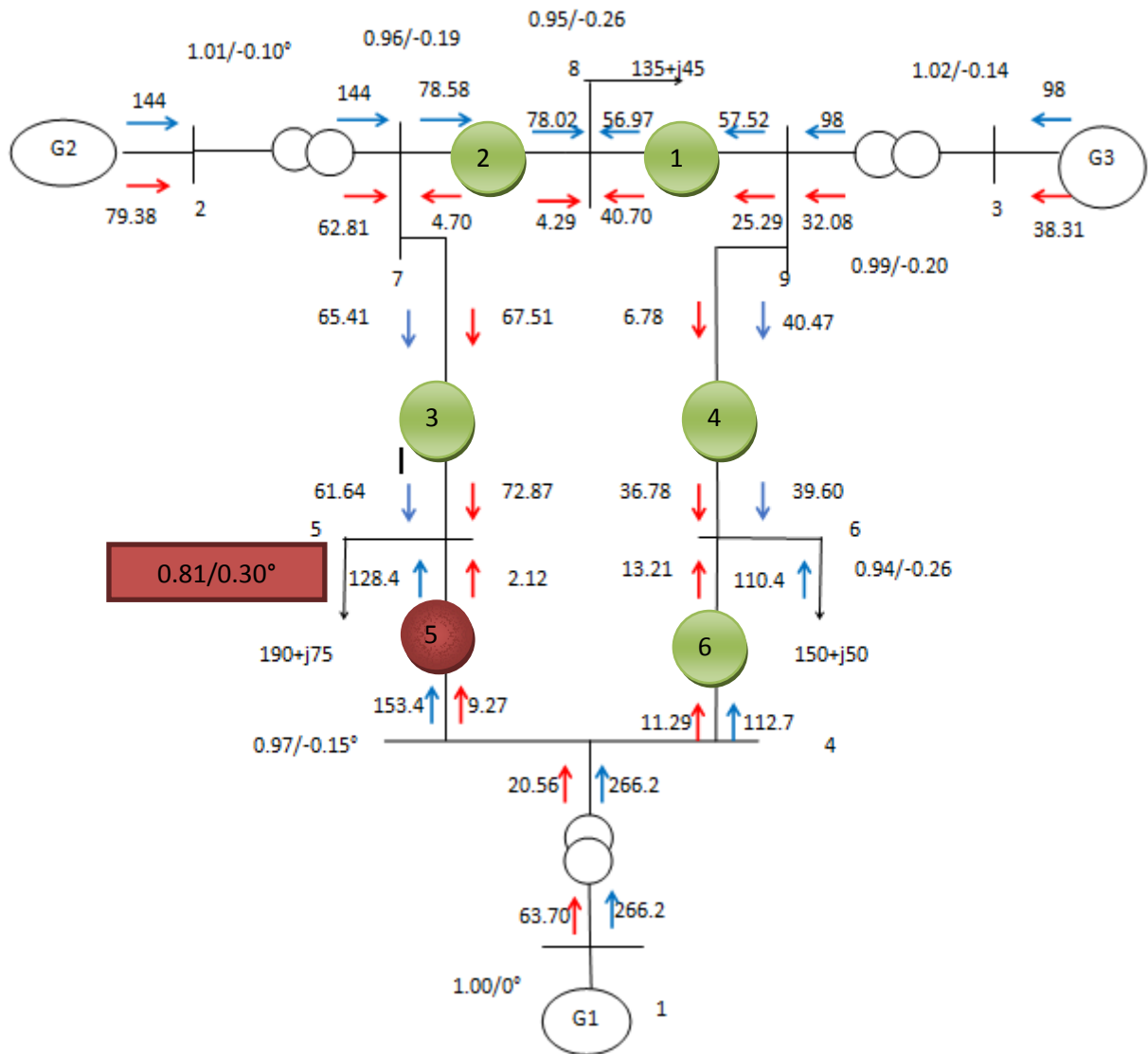


Figure III.14 : Plan de tensions et circulation de puissance après la variation de charge

III.5.1. Effet du STATCOM

L'introduction du STATCOM dans le réseau pour régler la tension au nœud 5 est faite telle qu'indiqué par la figure III.15 ci-dessous.

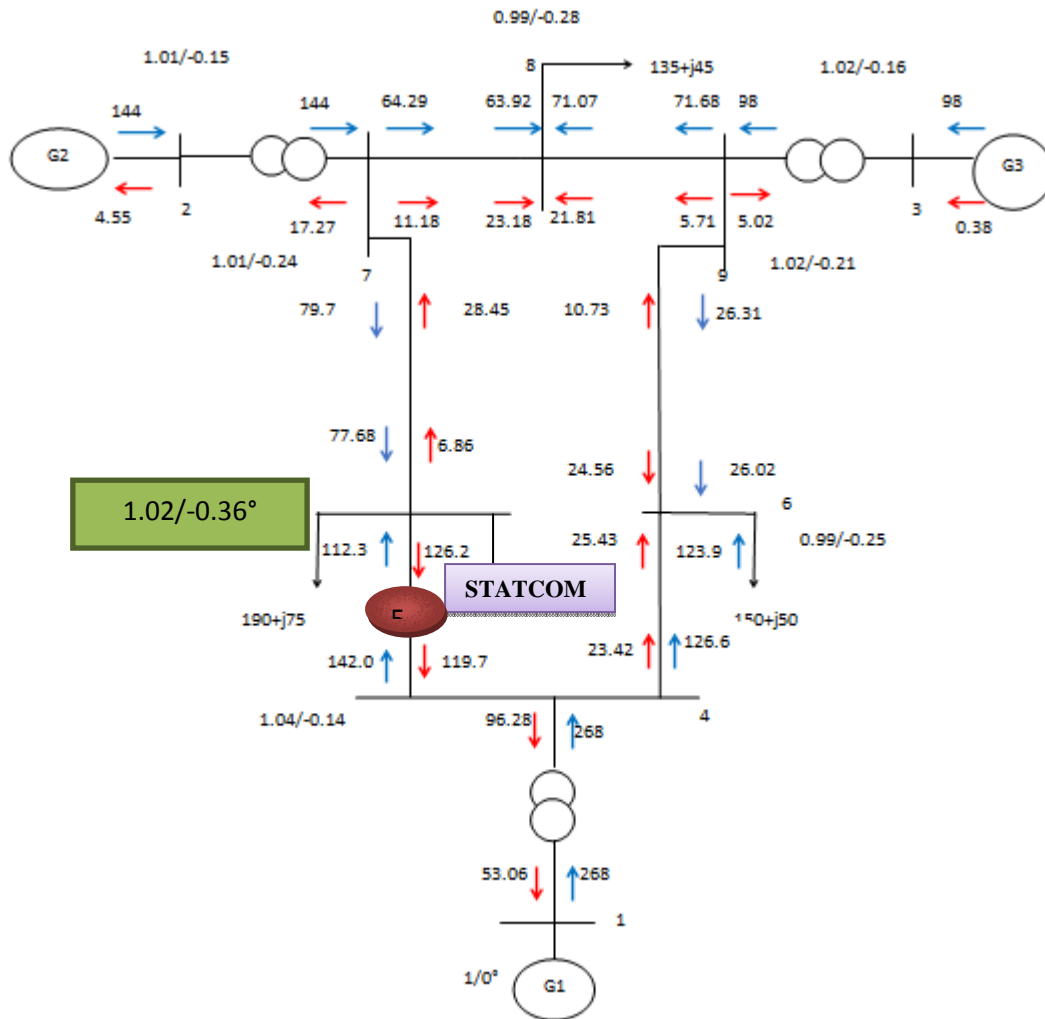


Figure III.15 : Plan de tensions et circulation de puissance en présence du STATCOM

La figure III.15 montre que le réglage de tension améliore la qualité de tension au nœud 5 dont le module prend la valeur 1.02pu. Pour obtenir cette valeur de tension, le STATCOM a dû fournir 208.06MVar. Par contre le transit de puissance dans la liaison 5 augmente pour atteindre la valeur 185.7MVA ($S = \sqrt{142^2 + 119.7^2}$) qui reste très élevée par rapport à la puissance transmissible permise de la ligne (110 MVA).

III.5.2 Effet du SSSC

L'utilisation du SSSC placé en série avec la liaison 5 permet le contrôle du transit de puissance dans la liaison. La figure III.16 montre l'effet du SSSC sur le transit de puissance qui est réduite à la valeur 109.85MVA ($S = \sqrt{91.92^2 + 60.15^2}$). Ce transit est acceptable puisque la valeur maximale de puissance de transit autorisée est 110MVA. Mais on remarque que la tension au nœud 5 est dégradée et son module est égal à 0.8pu.

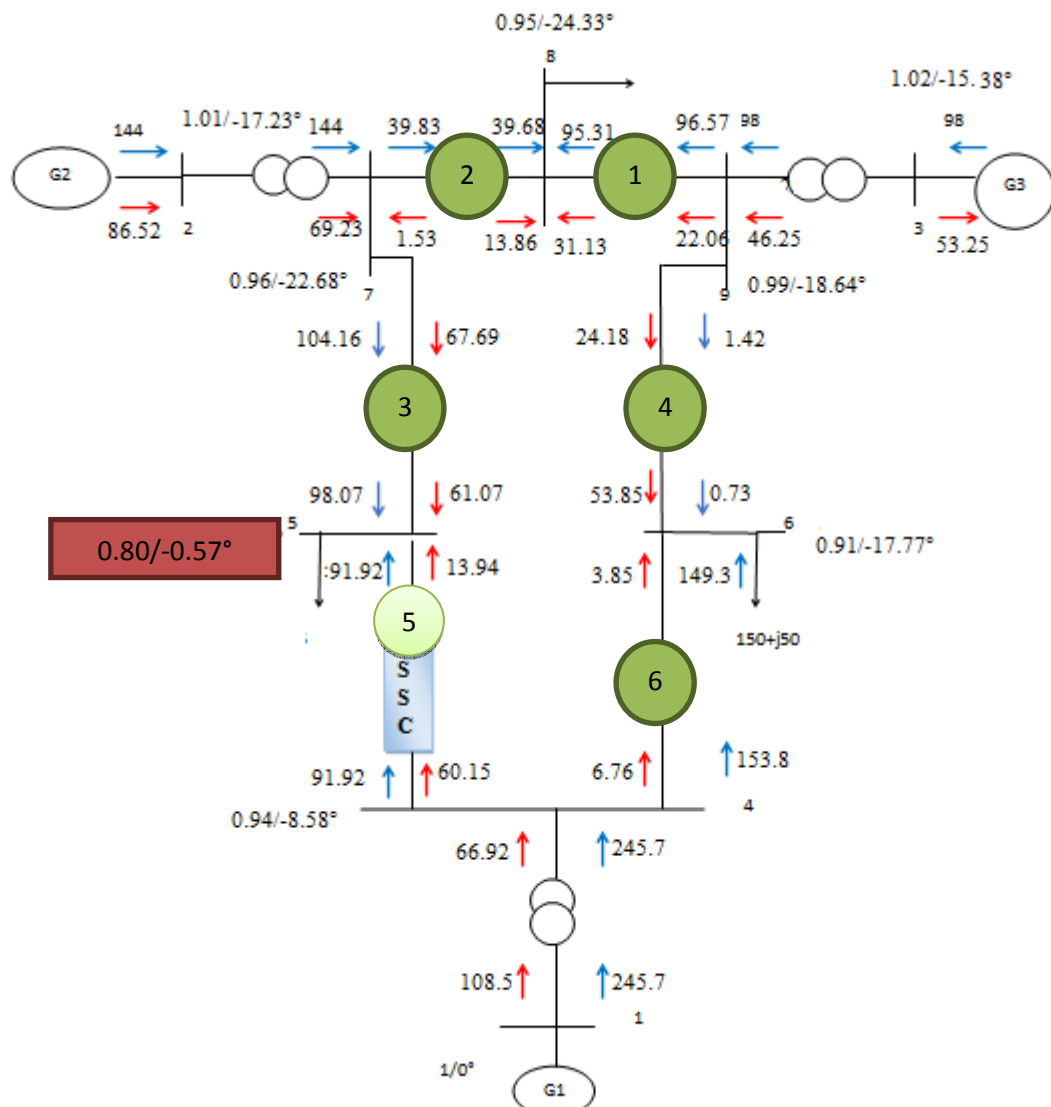


Figure III.16 : Plan de tensions et circulation de puissance en présence du SSSC

III.5.3 Effet de l'UPFC

Afin de régler simultanément les deux contraintes du réseau, dégradation de la tension du nœud 5 et surcharge de la liaison 5, on utilise un UPFC qui allie la fonction de réglage de tension et la fonction de commande de transit de puissances, les deux fonctions qui sont assurées par le STATCOM et le SSSC mais séparément. L'UPFC étant une combinaison des deux FACTS permet à la fois de régler la tension et contrôler la puissance transitée. L'introduction de l'UPFC dans le réseau tel qu'indiqué sur la figure III.17 permet d'améliorer la tension du nœud 5 et de décharger la liaison 5 où le transit de puissance est ramené à la valeur 92.68MVA ($S = \sqrt{86.38^2 + 33.59^2}$).

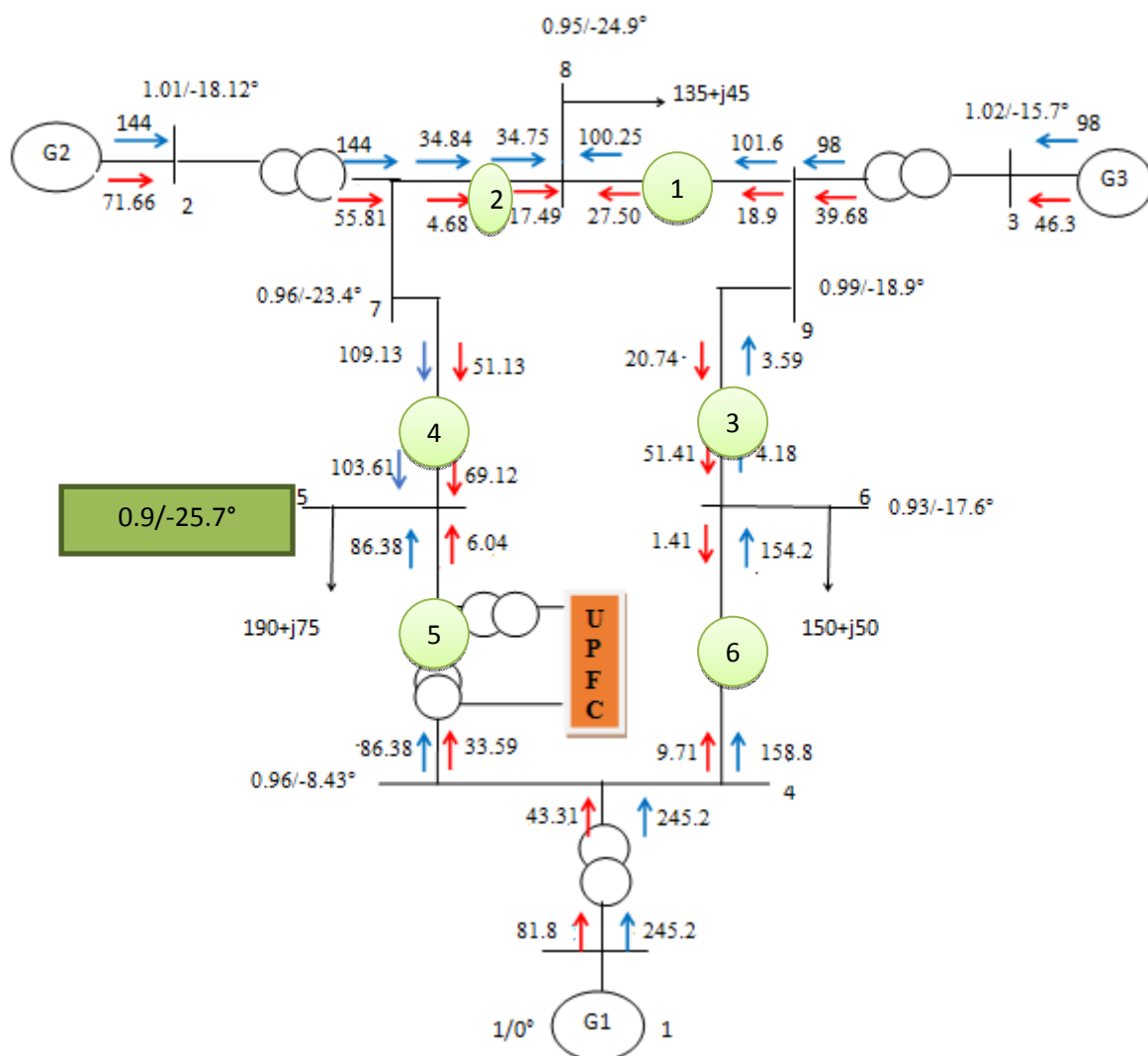


Figure III.17 : Plan de tensions et circulation de puissance en présence de l'UPFC

Pour une charge totale égale à 475MW et 170MVar, le tableau III.2 donne la répartition des charges entre les 3 générateurs et les pertes de puissance avec et sans UPFC. Les pertes de puissance active diminuent quand le réseau est équipé d'UPFC par contre les pertes de puissance réactive augmentent.

Le tableau

	G1		G2		G3		Pertes de puissance	
	PG(MW)	QG(MVar)	PG(MW)	QG(MVar)	PG(MW)	QG(MVar)	PL(MW)	QL(Mvar)
Sans UPFC	266.2	63.7	144	79.38	98	38.31	33.20	11.39
Avec UPFC	245.2	81.8	144	71.66	98	46.3	12.20	29.76

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré que les dispositifs FACTS peuvent intervenir dans le réseau en contrôlant aussi bien le transit de puissance que maintenir la qualité de tension exigée. Ils contribuent également à la diminution des pertes de puissance active ce qui a pour effet de diminuer le coût de production. Mais l'influence globale de l'UPFC ne peut être valorisée que si on connaît le coût que représente le dispositif FACTS afin de pouvoir déterminer l'apport de ce dernier sur la répartition optimale des charges entre les différents groupes de production.

Chapitre IV

Compteurs Intelligents

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, un aperçu général sur les objectifs des compteurs intelligents et leur principe de fonctionnement seront illustrés. On montrera leur effet sur les réseaux dans la modulation de la charge en coordination avec les usagers afin d'optimiser les ressources de production aussi bien celles des fournisseurs d'énergie électrique que celles qui existent chez les usagers (véhicules électriques ou autre stockage).

IV.2 Concept de compteur intelligent

Un système de comptage évolué tel que le compteur intelligent implique :

- * la mise en place de compteurs communicants (intelligents) capables de stocker les informations résultant des mesures,
- * l'établissement de systèmes de transmission de données permettant la circulation rapide et fiable des informations contenues dans les compteurs entre usagers, gestionnaires de réseaux et fournisseurs.

Il existe une large variété de compteurs intelligents se différenciant principalement au niveau de leur mode de transmission des informations et de la présence ou non de concentrateurs de données. Le type de compteur le plus communément installé est un compteur électrique utilisant les lignes du réseau pour envoyer ses informations à un concentrateur par CPL (Courant Porteur en Ligne) à travers un réseau local LAN (*Local Area Network*). Le concentrateur réunit les données des différents compteurs de son secteur avant de les transmettre à la base de données du distributeur aux moyens de communications de type WAN (*Wide Area Network*) tels que les réseaux mobiles 2G ou 3G. En cas de réponse

du distributeur, l'information suivra le trajet inverse. D'autres appareils font le choix de s'appuyer sur les réseaux publics téléphonique (WAN), satellites, fibre optique (WAN) ou les ondes radios (LAN). Ses capacités de communication bidirectionnelle (transmission et réception des informations) permettent la relève à distance ainsi que le pilotage de la fourniture d'énergie par le gestionnaire de réseau [32]. La figure IV.1 schématise le système de transmission des informations entre compteurs intelligents, gestionnaire de réseau, fournisseurs et usagers. Le concentrateur est localisé dans le poste de distribution. A chaque compteur et concentrateur est associé un modem CPL qui code et décode les données en un signal électrique et le superpose au courant électrique à 50Hz. Ensuite, au niveau des concentrateurs, les données sont codées sous format numérique puis transmises au système informatique du gestionnaire de réseau par l'intermédiaire du réseau téléphonique GPRS (*General Packet Radio Service*). Le système informatique du gestionnaire de réseaux est accessible par les fournisseurs d'énergie qui reçoivent régulièrement les données de comptage des usagers pour facturation de l'énergie [33].

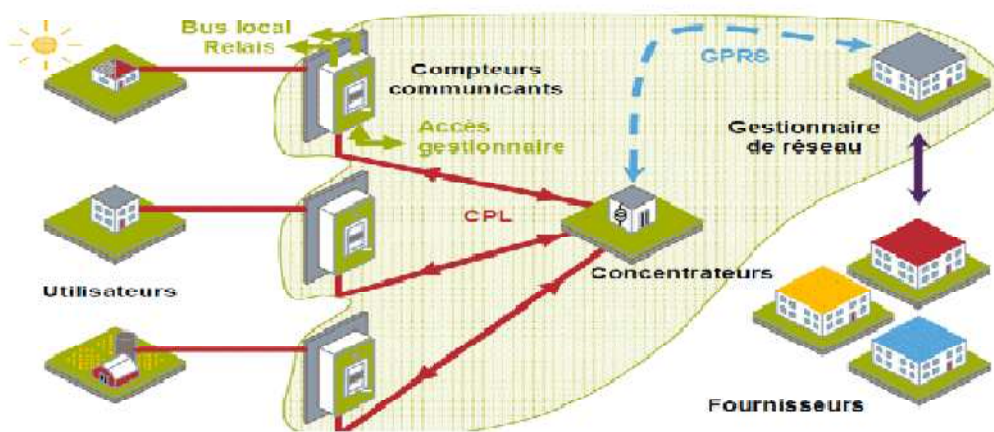


Figure IV.1 Système de transmission et de réception des informations

Le compteur intelligent est une innovation technique aux multiples possibilités permettant aux gestionnaires de réseaux de mieux connaître le réseau électrique et donc faciliter les opérations de gestion. Il est aussi un nouvel outil à la disposition des usagers à des fins de contrôle et de maîtrise de leur consommation énergétique quotidienne. Les gestionnaires de réseaux peuvent ainsi mieux prévoir les pics de consommations et valoriser l'utilisation d'énergie propre (énergies renouvelables). En cela, le compteur intelligent offre une fonction « palliative », il ne change pas les comportements des usagers mais rend leurs conséquences moins néfastes [33]. Toutefois, avec des dispositifs tels que l'effacement diffus, le compteur peut aussi avoir un rôle « contraignant », en forçant les usagers à se conformer à un comportement souhaitable. Enfin, il peut aussi avoir une fonction « capacitaire » en donnant à l'utilisateur les moyens d'agir plus durablement s'il en a la volonté. La distribution d'informations détaillées sur la consommation du ménage et sur son évolution est un bon exemple de ce type de fonction. Le compteur intelligent est donc un dispositif permettant de transmettre les données de consommation en électricité d'un individu à son distributeur

d'énergie. Si le dispositif en reste là, il est considéré comme étant un *Automated Meter Reading* (AMR). Celui-ci se réfère à la technologie utilisée pour automatiser la collecte des données de consommation à des fins de facturation en temps réel et les transfère à la base de données centrale pour analyse. Toutefois, aujourd'hui, la plupart des compteurs intelligents permettent de renvoyer des informations du distributeur à l'utilisateur en utilisant la même interface à rebours. Dans ce cas, le dispositif constitue un *Automated Meter Management* (AMM). Celui-ci permet aux données des services publics d'être accessibles afin que la facturation puisse être exacte. Ils analysent également les données qui circulent vers et à partir des emplacements des usagers [34]. Ce type de dispositif permet donc de :

- * lire automatiquement et souvent (toutes les quinze minutes par exemple),
- * activer le contrôle à distance de la zone de service de tous les usagers.
- * rendre possible la connexion et la déconnexion à distance pour accélérer le service aux usagers,
- * gérer en temps réel les incidents et permettre une communication entre le fournisseur et le client afin que celui-ci ait une vision en temps réel de l'état du réseau,
- * minimiser les pertes d'énergie sur le système en intégrant la compensation du réactif (contrôle de la tension).

L'ensemble des outils cités ci-dessus (AMR, AMM) font partie du système de gestion des données de compteurs MDMS (Meter Data Management Systems) qui est au cœur du fonctionnement des compteurs intelligents [35]. Il apporte la possibilité de créer des applications qui simplifient le processus d'analyse de données collectées en temps réel et se chiffrent en millions de données à traiter. Cette tâche est aussi une question très sensible, car elle révèle le profil de l'utilisateur. Les entreprises doivent donc investir pour assurer la sécurité et la confidentialité des informations. Les dispositifs de comptage intelligent les plus facilement généralisables sont ceux jouant un rôle « palliatif ». Ils impliquent en effet uniquement des modifications sur l'impact et les conséquences des usages, plutôt qu'une remise en cause des façons d'agir de l'individu. En cela, ces dispositifs sont pratiquement invisibles pour l'utilisateur, étant surtout des outils supplémentaires à la disposition des distributeurs. Grâce à la télé-relève en temps réel, fonction première de ces nouveaux compteurs, les distributeurs ont en effet accès aux consommations réelles des usagers, plutôt que de se fier à des prévisions et des modèles bâtis sur des relevés semestriels. Le distributeur peut ainsi ajuster plus précisément le niveau d'électricité requis et acheter l'énergie nécessaire plus tôt à meilleur prix aux producteurs. Par ailleurs, en connaissant avec plus de précision le niveau de consommation, les distributeurs seront moins pris de cours par d'éventuels pics de charge et auront moins recours aux moyens de production rapides mais polluants et coûteux en matières premières. Enfin, ces compteurs permettent aussi de mieux gérer des systèmes de distribution de plus en plus complexes et ce à cause du développement d'un large panel de moyens de production d'énergie décentralisés et de l'apparition des énergies renouvelables aux capacités de production intermittentes. Les compteurs intelligents sont un moyen de réponse à cette problématique et constitue la motivation principale qui pousse par exemple les

entreprises de distributions d'électricité à se lancer dans l'expérimentation de ces dispositifs. L'installation de compteurs intelligents permet ainsi, grâce à une gestion de l'offre et de la demande, de réduire le prix de l'électricité et de mettre en avant des productions moins polluantes. Toutefois, l'utilisation d'un tel dispositif ne résout pas le problème des pics de consommations en eux-mêmes, bien qu'il puisse conduire à les anticiper, ni ceux de la croissance des coûts de l'énergie. Il rend seulement leur impact moins perceptible pour l'individu.

En tant que systèmes techniques capables d'agir et de réagir d'eux-mêmes, les compteurs intelligents et leurs dispositifs associés peuvent permettre de prendre le pas sur les propres actions de l'individu. Ce dispositif permet de mettre en place un processus d'« effacement diffus », c'est à dire que le distributeur peut piloter à distance le fonctionnement de certains appareils du domicile de l'utilisateur dont les différents équipements sont reliés au compteur intelligent qui communique avec le distributeur. En cas de risque de pics de consommation et de dépassement des capacités du réseau, le dispositif peut éteindre un certain nombre d'équipements afin d'éviter une éventuelle coupure. Le dispositif repose sur un principe d'incitation financière en proposant des prix différenciés en fonction des plages horaires et des moments de forte demande. Il vise ainsi à encourager les usagers à reporter leurs dépenses d'énergie vers des heures de la journée peu gourmandes en électricité, afin de limiter les pics de consommation. Les plages horaires varient en fonction de la saison (été-hiver) et le tarif de chaque période est actualisé en fonction des prix d'achat de l'électricité. Ce système est rendu possible par les compteurs intelligents qui informent pratiquement en continu le distributeur du niveau de consommation de l'utilisateur. Il peut ainsi lui imputer avec précision le tarif correspondant à la plage horaire de consommation.

Le dispositif peut s'appuyer sur un système de capteurs pour proposer un relevé des consommations. Ces dernières sont gardées en mémoire et stockées pour pouvoir effectuer des comparaisons entre différentes périodes ou pour produire des courbes sur de plus longues durées. Il viserait ainsi à fournir à l'utilisateur davantage d'informations, afin qu'il puisse mieux orienter ses pratiques en fonction de ses attentes. Au lieu de recevoir des factures semestrielles fondées simplement sur des estimations, il pourrait dès lors suivre sa consommation au jour le jour et davantage piloter ses comportements, voire réaliser des économies d'énergie. Toutefois, si le dispositif de compteur intelligent pouvant être mis en place repose sur l'incitation économique pour faire évoluer les comportements, la question d'une possible inégalité devant le changement reste posée. En effet, les personnes financièrement aisées peuvent assumer bien plus facilement le coût supplémentaire de la consommation en temps de pic. On est donc en droit de se demander si un tel dispositif ne tendrait pas à faire reposer les changements comportementaux induits par les exigences de la transition énergétique sur les catégories sociales les plus contraintes financièrement.

Le compteur intelligent capable de donner une facturation par tranche horaire permet aux consommateurs de choisir le meilleur tarif chez les différentes entreprises productrices, mais aussi de jouer sur les heures de consommation, permettant ainsi une meilleure utilisation du

réseau électrique. Un tel système permettrait aussi de cartographier plus finement les consommations et de mieux anticiper les besoins, à des échelles plus locales. Le compteur intelligent est capable de piloter certains équipements à distance pour faciliter la gestion de la charge électrique qui transite sur les réseaux (exemple, pilotage de la charge des véhicules électriques, pilotage de la mise en marche des fours, des machines à laver...). Des ploggs mis en communication par des logiciels de type middleware, permettent à des appareils de communiquer entre eux. Ces ploggs peuvent éventuellement contrôler l'appareil (marche/arrêt ou régulateur). Ils enregistrent la consommation électrique des appareils situés en aval du fil, pour la transmettre (généralement par un signal radio de pilotage d'interfaces à un [ordinateur](#) (ou un téléphone mobile) sur lequel un [logiciel](#) adapté («Plogg manager») peut alors présenter des états ou des statistiques de consommations électriques réelles, pour chaque appareil d'une maison, d'un bureau, d'un bateau, etc. La figure IV.2 montre un exemple de fonctionnement d'un plogg qui est inséré entre la prise et le cordon d'alimentation de l'appareil à surveiller. Une interface visualise les consommations et peut aussi brancher ou débrancher les appareils raccordés. Le contrôle à distance de la consommation et/ou la production par le gestionnaire de réseau grâce aux compteurs intelligents permettra d'agir, lors d'une pointe de consommation d'électricité, sur des automates commandant des applications énergivores telles qu'un système de conditionnement d'air ou le fonctionnement de certains équipements comme sèche-linge, chauffage électrique, etc. Pour éviter un black-out par exemple, il rend possible le décalage de fonctionnement en se basant sur un signal correspondant au changement de tarif. Cette opération, « l'effacement », peut se faire en accord avec l'utilisateur.



Figure IV.2 Installation d'un plogg

Ce système permet un meilleur suivi de la consommation électrique pour une meilleure maîtrise des dépenses en énergie. En cas de panne sur le réseau, le diagnostic est facilité et la réalimentation en électricité des clients s'en trouve plus rapide. [36]. Un compteur intelligent

permet non seulement de recueillir des informations classiques pour le comptage (index de consommation pour la facturation) mais aussi des informations nouvelles sur l'état du réseau (niveau de tension, par exemple).

IV.3 Fonctionnement du système de comptage intelligent

La figure IV.3 ci-dessous montre le flux d'informations qui gravite autour du compteur intelligent qui est donc une composante clé du système de comptage dans les réseaux intelligents. Ce système de comptage contribue à créer une culture de conservation de l'énergie respectueuse de l'environnement [1]

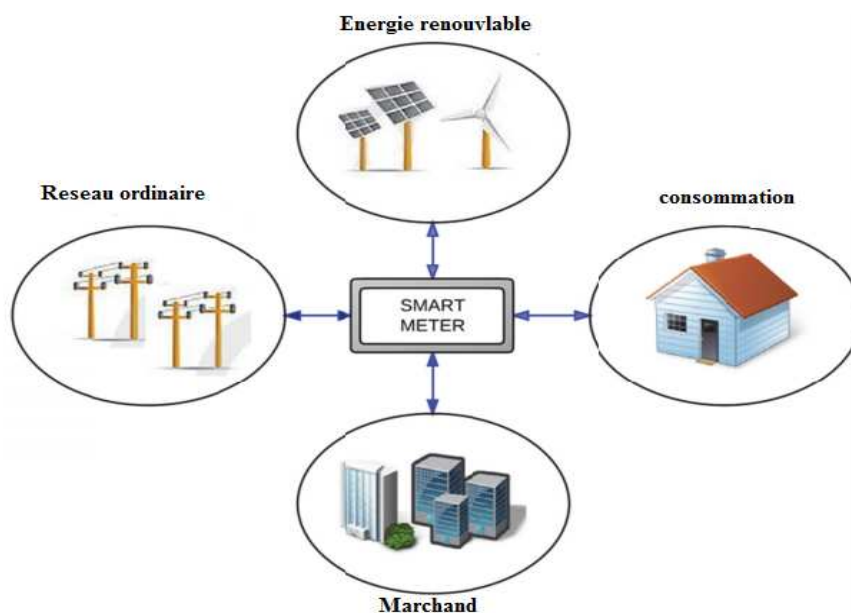


Figure IV.3 Flux d'informations autour du compteur intelligent

Aujourd'hui, les compteurs traditionnels mesurent uniquement la quantité d'électricité consommée pendant une période de facturation entière contrairement au compteur intelligent qui enregistre instantanément la consommation. L'enregistrement de cette dernière se fait d'une façon permanente ce qui rend possible la tarification en fonction de l'heure de consommation (fhc). Connaissant les temps exacts de consommation de l'énergie, on pourra alors appliquer des prix différents en fonction des divers moments de la journée.

Autour du compteur intelligent gravitent diverses parties telle que les fournisseurs, les usagers, la recherche universitaire, les organismes de réglementation, etc. Chacune de ces

parties a un rôle à jouer. Les fournisseurs devront s'adapter aux conditions nouvelles de production décentralisée afin de pouvoir assurer une continuité et une qualité de service dans un environnement de plus en plus contraignant (limites d'exploitation, black-outs, ...). Les usagers qui sont de plus en plus exigeants doivent être en mesure de choisir quel type de source d'énergie leur convient et pouvoir en temps réel échanger informations et énergie avec le réseau. La recherche universitaire a, avec le compteur intelligent, une bonne opportunité à saisir afin de développer une coopération mutuellement bénéfique avec le secteur énergétique. Les organismes de réglementation, par les outils réglementaires et les normes qui devront mettre en place, doivent encourager aussi bien les fournisseurs que les usagers de l'énergie à développer le compteur intelligent et inciter d'une manière directe ou indirecte à sa mise en place. Ceci pourrait aider au développement d'autres sources d'énergie que les sources d'origine fossile et contribuer à la mise en place d'un développement durable [6].

Un compteur intelligent peut générer des données à caractères privé et techniques. Le tableau IV.1 ci-dessous indique la répartition de ces données [1].

Données d'ordre privé	Données d'ordre techniques
-nom, sexe, âge	- circuit de commande
- informations de connexion (adresse)	- Logiciel
- informations sur la consommation d'énergie	- mots de passe
- information sur la production d'énergie	
-informations de surveillance	

Tableau IV.1 Données gérées par un compteur intelligent

Les distributeurs d'électricité collectent en temps réel une importante masse de données sur la consommation et production des individus ou collectifs connectés au réseau. Ces données leur permettent ensuite de proposer des tarifs et abonnements basés, non plus sur une estimation, mais sur la consommation et la production instantanée. Les distributeurs d'électricité effectuent les déplacements temporels des usages des individus ou collectifs en communiquant des tarifs et abonnements ajustés à leur consommation et production électrique. Avant les distributeurs ne géraient que la production et la distribution de l'électricité. Or, avec ces dispositifs d'incitation, ils acquièrent aussi les moyens d'opérer une gestion de la consommation électrique. La connaissance du prix du kWh en temps réel permet de gérer la consommation par conséquent la gestion de la facture d'énergie. Ceci entraîne un

changement d'habitudes dans la consommation d'électricité. Avec la tarification fhc, il est tout à fait logique de déplacer les activités à forte consommation aux périodes intermédiaires et creuses où l'énergie est moins chère par comparaison aux périodes de pointe.

La mobilité électrique doit pouvoir s'intégrer au réseau en bout de chaîne, après le bâtiment résidentiel ou industriel. Déployer toujours plus de véhicules électriques impose de nouvelles contraintes auxquelles il faudra n'apporter des réponses. L'impact peut en effet être important : un million de véhicules électriques en recharge lente simultanée consomment entre 3000 et 6000 MW, soit la puissance de plusieurs réacteurs de centrale nucléaire. Malheureusement, le réseau a une capacité limitée pour la charge des véhicules électriques. La demande d'énergie électrique variera cycliquement sur des périodes de 24 heures. La demande sera plus importante durant les heures de pointe et inférieure les heures creuses (nuit). La production d'énergie électrique et les infrastructures de transport doivent donc être adaptés à cette demande de pointe, mais doivent être presque à l'arrêt pendant les heures creuses. Il faut également tenir compte d'un autre facteur qui est le fait que la production d'énergie éolienne est habituellement sous-utilisée par le manque de demande durant les heures creuses. De ce fait, la charge des véhicules électriques doit se faire pendant ces périodes lorsque la demande est faible et que la puissance est générée par des énergies renouvelables [37]. Les voitures pourraient servir de stockage tampon pour limiter les variations de consommation. Lorsque la demande est faible, comme la nuit, les véhicules électriques sont chargés au maximum pour éviter les surproductions. A l'inverse, lors de brefs pics de demande, les voitures électriques connectées pourraient décharger l'énergie sur le réseau pour contribuer à gommer ces pointes.

IV.4 Avantages et inconvénients des compteurs intelligents

IV.4.1 Avantages

Les promoteurs de ces compteurs visent à inciter les clients à moins consommer, par l'établissement de prix différenciés en temps réel, aux heures de crêtes (sur tarification) prévisibles selon les heures de la journée et la saison. Cela est censé encourager les clients à consommer moins d'énergie et permettre des économies globales d'énergies dans une perspective de développement durable. En effet, en permettant un suivi de consommation, ces systèmes permettraient de réaliser des économies d'énergie de 5 à 15 % [13] en favorisant de meilleures pratiques. Ces compteurs permettent également de couper à distance avec l'accord des clients l'alimentation de certains équipements, pour éviter les surcharges du réseau en périodes de pointe. Les compteurs communicants permettent également d'effectuer certaines opérations à distance, sans qu'un technicien ne se déplace et que le client soit présent. En éliminant les tâches manuelles de relève, de changement de puissance, de coupure ou de remise en service, ces compteurs sont censés, à terme, permettre une diminution des coûts de distribution de l'énergie et des délais d'intervention. Ces compteurs permettront en outre

d'avoir une facture basée sur une consommation en temps réel, plutôt que sur des relevés sur site et d'estimations. Un tel système permettrait aussi de cartographier plus finement les consommations et de mieux anticiper les besoins à des échelles plus locales [6]. Le tableau IV.2 ci-dessous montre les avantages qu'a un compteur intelligent par rapport à un compteur traditionnel [38]

	Compteur Intelligent	Compteur traditionnel
Relevé de mesure	En temps réel	En temps différé (période de facturation généralement un ou deux mois)
Enregistrement	Relevés automatisés : les compteurs transmettent les données aux entreprises de distribution par voie électronique via un réseau sans fil	Relevés manuels : un employé de l'entreprise de distribution se rend en personne au domicile du consommateur pour consigner les données
Communication	Communications bilatérales entre les compteurs et les entreprises de distribution	Aucune capacité de communication
Tarification	Tarification selon l'heure de consommation (structure tarifaire à trois niveaux : période de pointe, période médiane et période creuse) reflétant les fluctuations des coûts de l'électricité durant la journée	Tarification à deux niveaux : un tarif pour la consommation jusqu'à un seuil déterminé et un autre tarif pour la consommation dépassant ce seuil

Tableau IV.2 Comparaison des performances d'un compteur intelligent et traditionnel

IV.4.2 Inconvénients

La précision de ces compteurs et la liaison constante qu'ils entretiennent avec le fournisseur d'électricité sont jugées préoccupantes en raison des possibles atteintes à la vie privée qu'ils permettent. Un chiffrement des données transmises devrait néanmoins éviter les piratages et les fournisseurs devraient se voir imposer des règles strictes dans l'usage de ces informations. Par ailleurs, le [coût](#) de ces appareils n'est pas négligeable. En outre, l'utilisation de ces compteurs intelligents suscite une interrogation du fait de la pollution électromagnétique en ondes à hautes fréquences associée à cette technologie lorsqu'elle est utilisée sans blindage des câbles. Outre des problèmes d'interférence pour les utilisateurs professionnels d'ondes hautes fréquences, généralisées par le caractère systématique de l'installation des nouveaux

compteurs, les hautes fréquences sont susceptibles de poser un sérieux problème de santé publique [6]

IV.5 Simulation, résultats et discussion

Pour montrer l'influence des compteurs intelligents sur le réseau, nous simulons une augmentation de la charge du nœud 6 du réseau test. La nouvelle charge en ce nœud est 180MW et 90 MVar. Le compteur intelligent étant au cœur des processus comme la montre la figure IV.4 doit pouvoir en cas de dégradation du système aider à retrouver une situation d'exploitation du réseau acceptable.

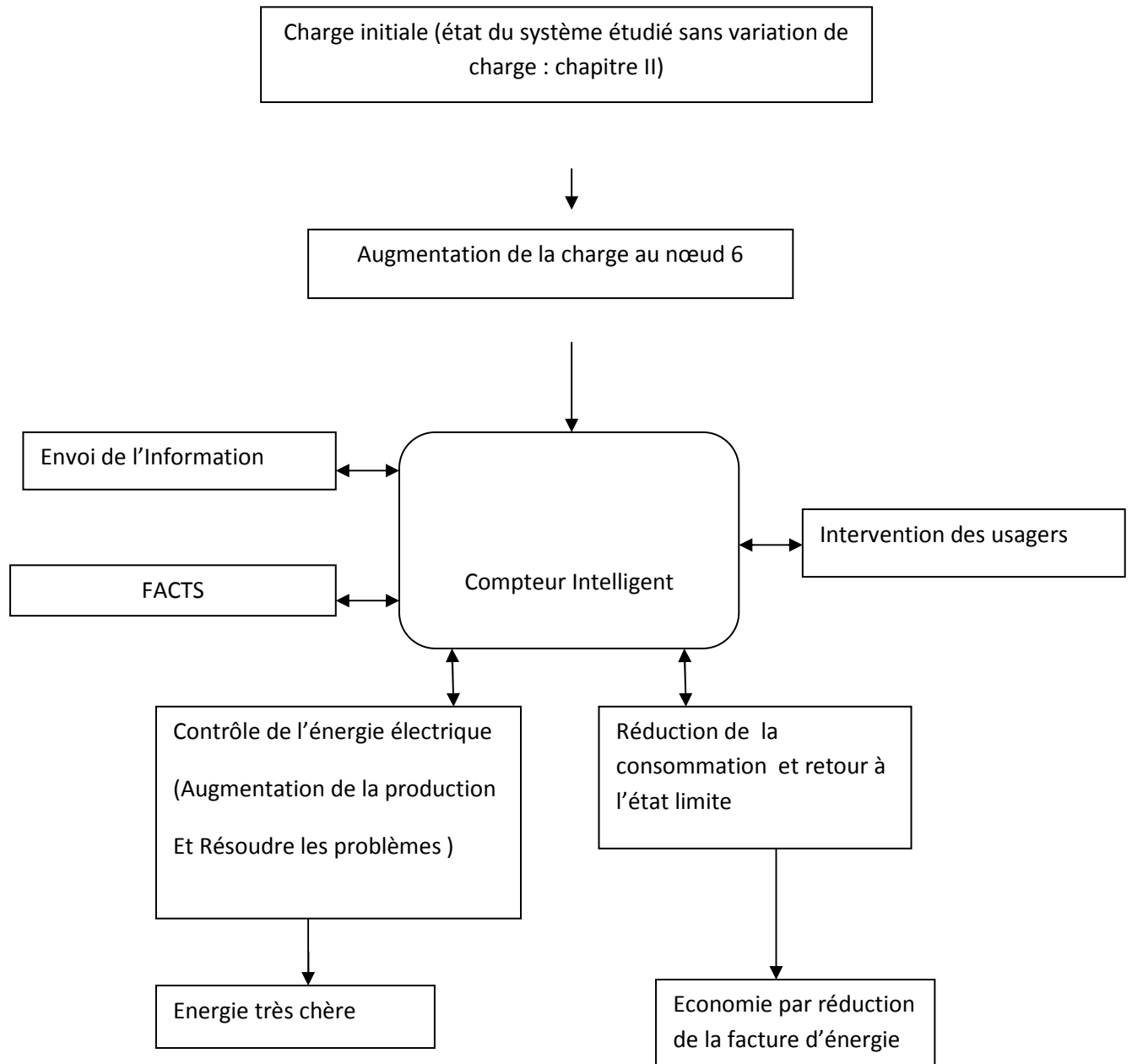


Figure IV.4 Diagramme des étapes de simulation

IV.5.1 Etat initial du système

La figure IV.5(a) montre l'état initial du système étudié au chapitre II où la charge du nœud 6 est 90 MW et 30 MVar. Cette charge se répartit comme indiqué sur la figure IV.5(b) entre un réseau BT et deux réseaux MT.

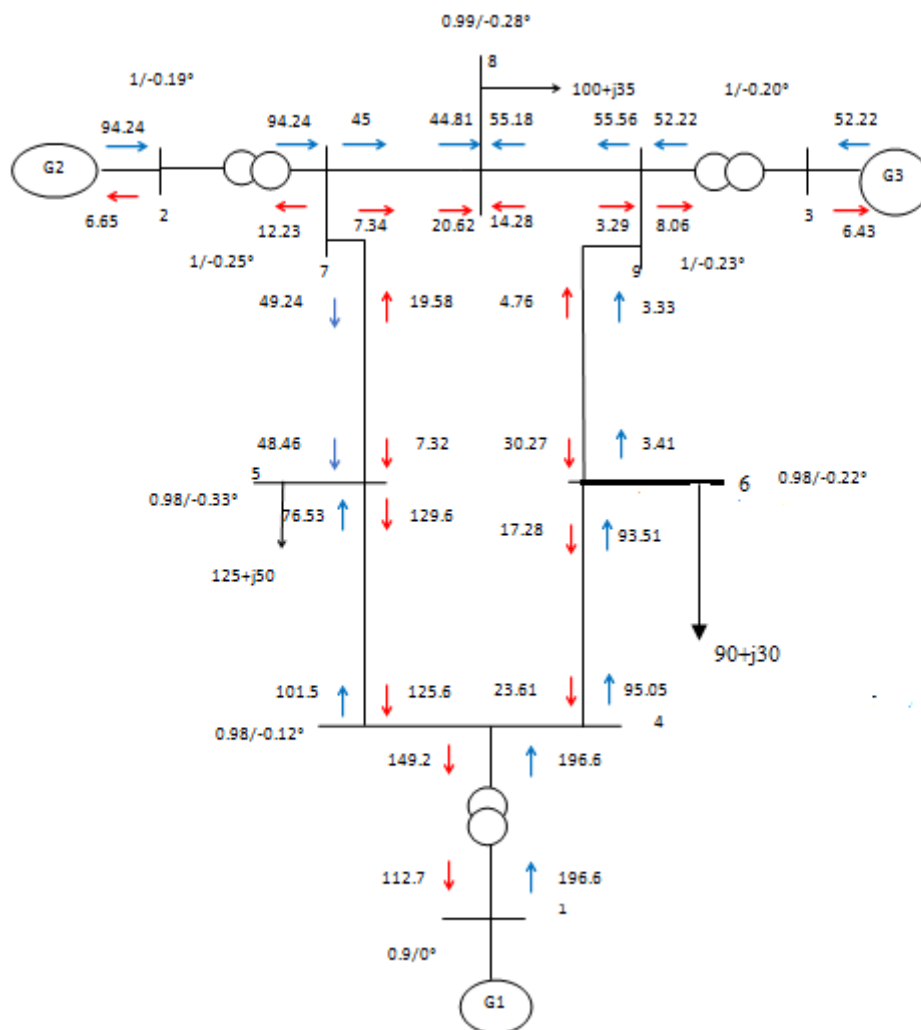


Figure IV.5(a). Système étudié à l'état initial

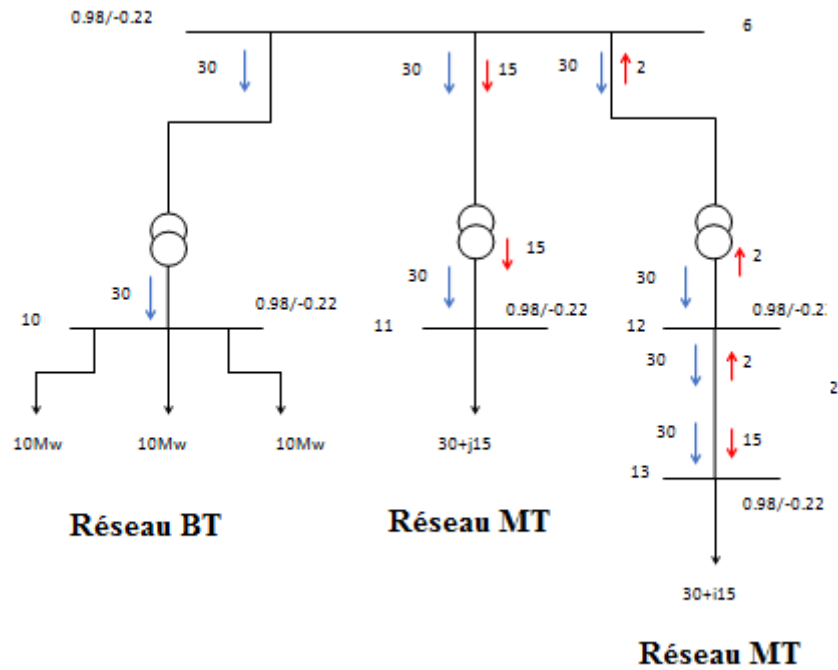


Figure. IV.5(b). Système étudié à l'état initial

IV.5.2 Etat du système avec augmentation de la charge du nœud 6

L'augmentation de la charge du nœud 6 qui prend comme valeur 180 MW et 90 MVar aboutit aux résultats indiqués dans la figure IV.6 qui montre une dégradation de la tension au nœud 6 (0.89 pu). Nous avons aussi une augmentation de la production pour satisfaire cette demande.

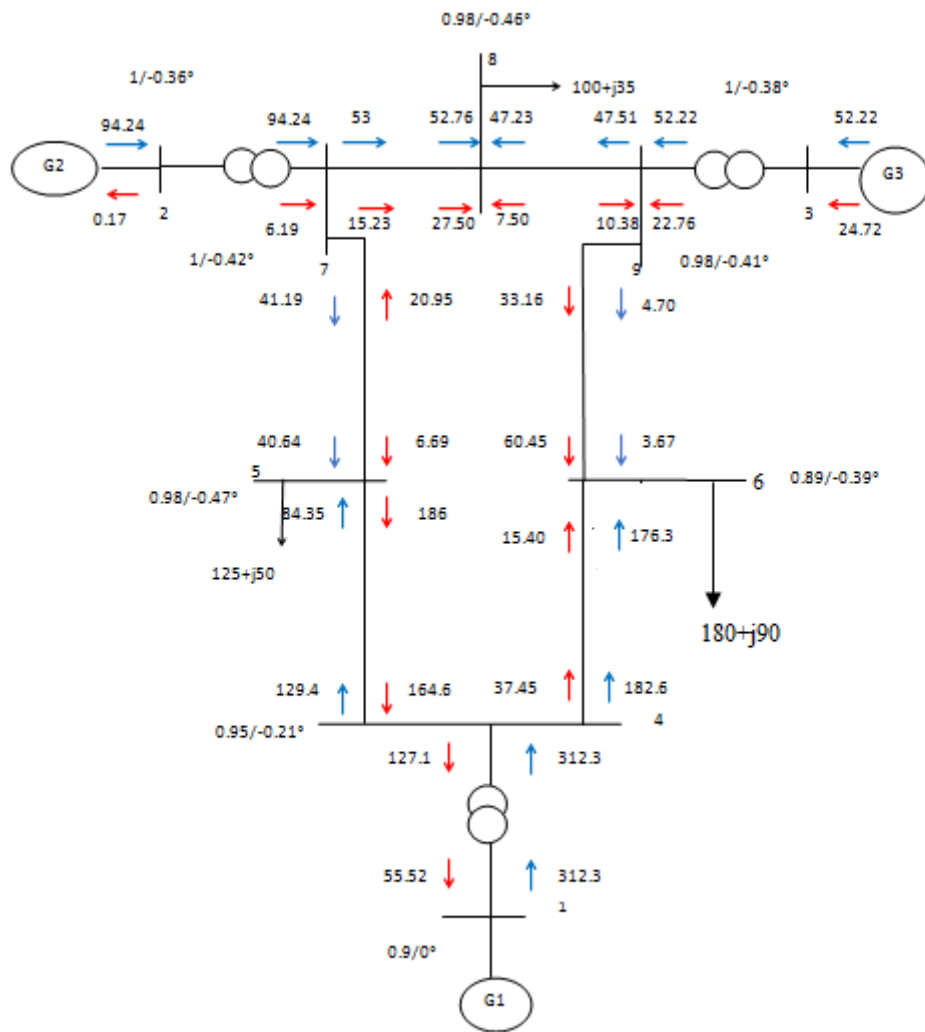


Figure IV.6(a). Système étudié avec augmentation de charge

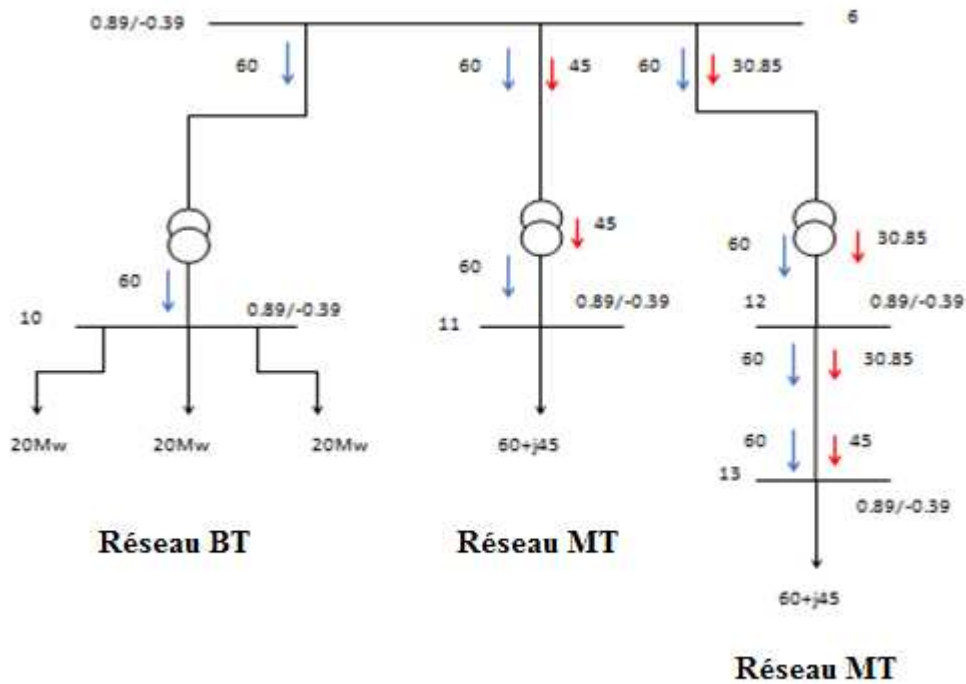


Figure IV.6(b). Système étudié avec augmentation de charge

IV.5.3 Etude de l'influence des compteurs intelligents sur le système

Dans cette partie, nous examinons l'influence des compteurs intelligents sur le système afin de régler le problème de dégradation de tension observé au nœud 6 d'une part et tenter de réduire la production d'énergie, d'autre part pour réduire les coûts qui y sont associés. L'intervention des gestionnaires de réseau à l'aide des compteurs intelligents ramène les tensions à des valeurs acceptables et particulièrement la tension du nœud 6 dont le module prend la valeur 0.9 pu. Le niveau de production par les opérations d'effacement ou de commande d'énergie stockée est aussi réduit pour atteindre 165 MW et 90 MVar comme montré dans la figure IV.7.

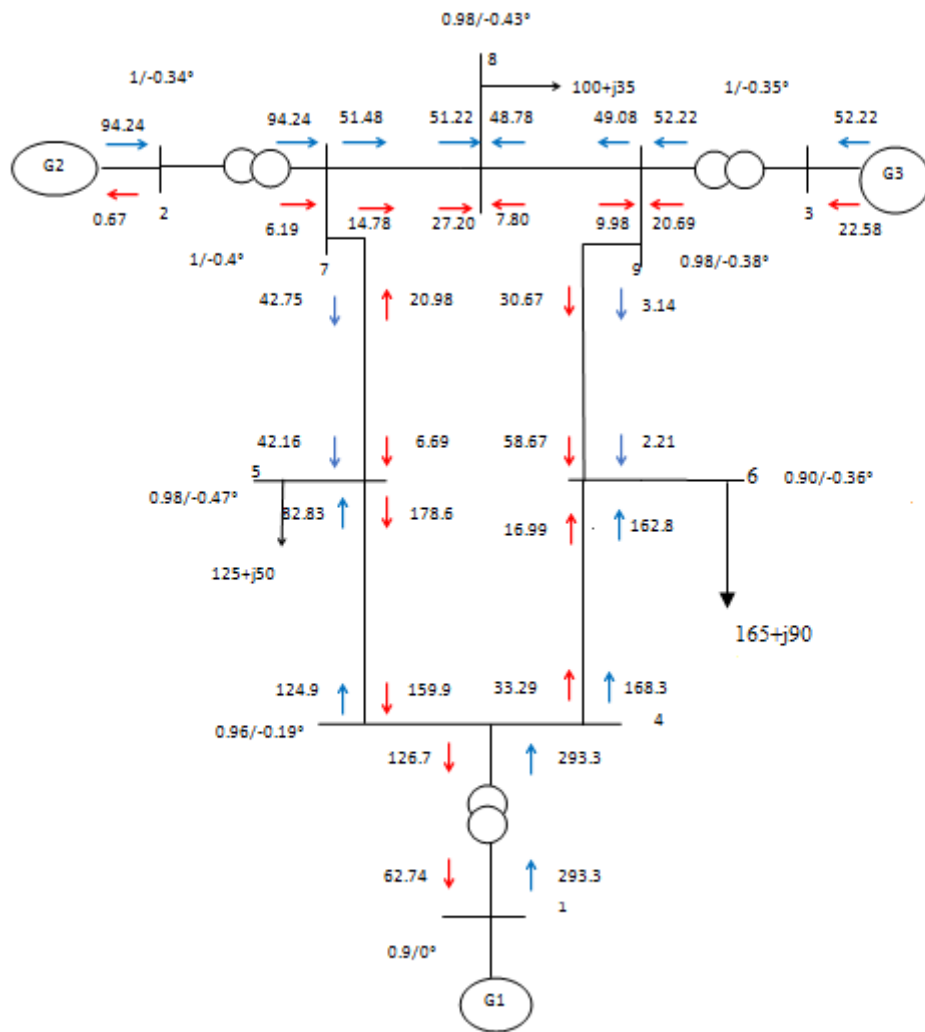


Figure. IV.7(a). Système étudié après intervention des compteurs intelligents

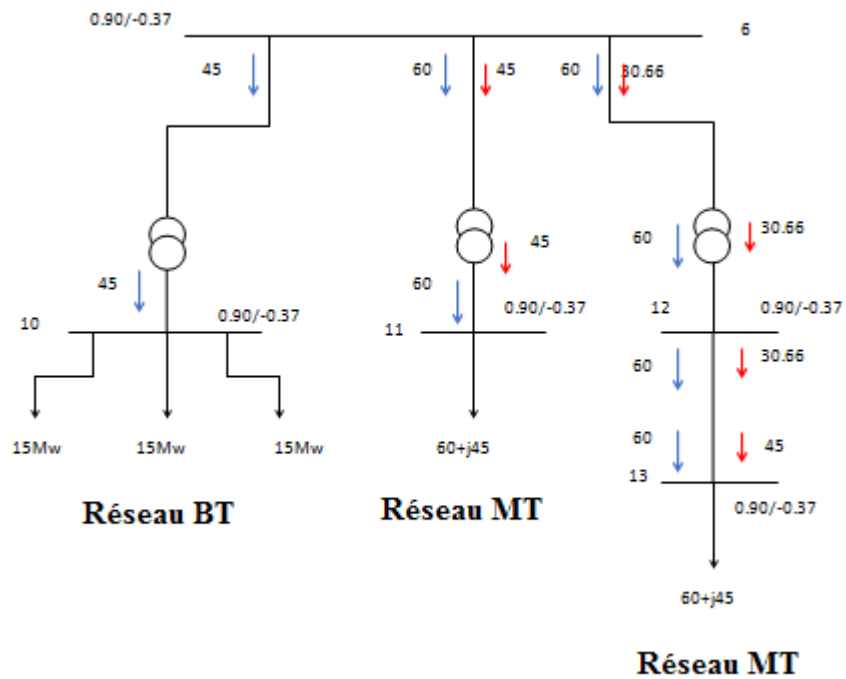


Figure. IV.7(b). Système étudié après intervention des compteurs intelligents

IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré l'efficacité des compteurs intelligents à garder les réseaux en fonctionnement normal et à gérer d'une manière optimale la facture d'énergie en rendant l'abonné actif dans la gestion des réseaux électriques.

On a montré que les compteurs intelligents, dans leur version AMM, sont capables d'agir et de réagir sans intervention humaine directe à différentes situations. En plus d'effectuer automatiquement des opérations de relevés d'information et d'automatiser la gestion des réseaux, ils peuvent aussi, compte tenu des dispositifs qui leur sont adjoints, modifier le fonctionnement d'une installation en fonction d'informations qu'ils perçoivent sur leur environnement.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Ce travail nous a permis d'aborder d'une façon générale les réseaux électriques du futur à savoir les réseaux intelligents (smart grids). Nous avons montré que le terme d'intelligence employé dans l'appellation de ces réseaux est sa faculté de veiller à garantir une consommation électrique aux usagers dans des conditions optimales de sécurité et d'économie. Nous avons montré que les outils tels que les FACTS ou ceux liés aux méthodes d'optimisation des réseaux sont d'un grand apport dans la conduite des réseaux quand ils sont associés au compteur intelligent cœur et base d'un réseau électrique intelligent. En effet, les communications que ces derniers autorisent sont appelées à jouer un rôle majeur dans les réseaux intelligents, en permettant les échanges bidirectionnels d'informations, ainsi que le suivi, la commande et la maintenance en temps réel. Les usagers pourront interagir dans une large mesure avec le réseau, que ce soit en fournissant leurs relevés de consommation ou en y injectant l'énergie qu'ils auront eux-mêmes produite, le cas échéant. Ces compteurs permettent la tarification et le relevé de la consommation nette en temps réel. En outre, le mécanisme du marché des échanges énergétiques entre opérateurs et entre pays bénéficiera de communications plus performantes. Les tâches au quotidien ne porteront plus sur le contrôle manuel des équipements mais sur la télésurveillance et la maintenance prédictive planifiée. La production ne sera plus centralisée mais distribuée, exploitant souvent des sources d'énergie renouvelable provenant de mini-réseaux qui combineront, par exemple, des panneaux solaires, des éoliennes, des piles à combustible, etc. La régulation des flux d'énergie sera entièrement automatisée, assortie d'une protection proactive. En d'autres termes, les incidents sont devancés rendant les réseaux autocorrecteurs (« autocatrisants »). Nous avons donc affaire à un réseau capable de se reconfigurer en des temps records, souvent sans même que les clients ne s'en aperçoivent, pour maintenir la qualité de distribution de l'électricité.

Les systèmes de surveillance et les capteurs seront omniprésents dans ce type de réseau. Cette gestion intelligente du réseau permet de préserver la sécurité d'approvisionnement, de réduire les coûts liés au réseau de distribution et d'intégrer les énergies renouvelables au réseau avec une meilleure efficacité. Les tests effectués actuellement sur les compteurs intelligents par certains fournisseurs d'énergie électrique constituent une première étape dans la mise en œuvre de ces réseaux intelligents. Cette technologie doit inciter les consommateurs finaux à économiser l'électricité et encourager la maîtrise de l'injection décentralisée. Leur introduction est toutefois freinée notamment par les questions relatives à la protection des données et par l'absence de normes claires. Le succès des réseaux intelligents dépendra en grande partie de l'intérêt économique des différentes parties prenantes. Mais aussi de la cybersécurité qui y est liée. En effet, toutes les données des usagers transitant par les TIC peuvent faire que le problème de protection d'informations personnelles se pose. Les fournisseurs d'électricité doivent donc avoir une liaison étroite avec les organismes officiels garantissant la vie privée des usagers.

Nous terminons cette conclusion par certaines recommandations qui pourraient faire l'objet de travaux futurs :

- entreprendre une recherche d'établissement d'un logiciel permettant le traitement des réseaux intelligents,
- étudier d'une manière approfondie les systèmes de communication à mettre en place avec les compteurs intelligents et voir s'il est possible d'entreprendre une relation de partenariat avec Sonelgaz principal intéressé par ce domaine,
- entreprendre une étude de stockage d'énergie faisant intervenir les véhicules électriques

Bibliographie

Bibliographie

[1] A. Geerts

Smart meter data unlocking energy saving & load shifting potential (Changing the energy consumption behavior of consumers through smart meter data)

These Master, University Marcel van Oosterhout, Holland, Juin 2013

[2] J. Cook, D. Nuccitelli, S. A. Green, M. Richardson, B. Winkler, R. Painting, R. Way, P. Jacobs, and A. Skuce

Quantifying the Consensus on Anthropogenic Global Warming in the Scientific Literature Environmental.

Lettre de Recherche, 2013.

[3] T. El-Fouly

Planification et exploitation de réseaux de distribution actifs

Canmet ÉNERGIE, Centre de Recherche de Varennes, Canada, 2011.

[4] L. Gyugyi,

Solide Stat Control of Electric Power in Flexible AC Transmission, Systems

International Symposium on Electric Energy Conversion in Power Systems, Italy, 1989

[5] E. G. Shahraki,

Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité

Thèse Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I. Nancy, France ,Octobre 2003.

[6] P. Vadda, S .M. Seelam

Smart Metering for Smart Electricity Consumption

Thèse Master, Blekinge Institute of Technology, Sweden, May 2013

[7] A. A. Fouad and P. M. Andersson

Power Systems Control and Stability

The Iowa State University, 1977

[8] A. A. Alcázar

Choix D'investissement Sous Incertitude des Gestionnaires des Réseaux de Distribution (GRD) en Europe à l'horizon 2030.

Thèse Doctorat, Université PARIS-DAUPHINE, Octobre 2012

[9] M. C. H. Alvarez

Architecture des Réseaux de Distribution du Futur en Présence de Production Décentralisé

Thèse Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, Décembre 2009

[10] D .Marquet, D .Mignardot , J .Schonek

Normes internationales CEI et nationales françaises NF, Guide de l'installation électrique

Schneider Electric, 2010

[11] G. Leboyer, A. Girodet, J. C. V. Bounezou

Systèmes D'énergie Electrique, Guide de Reference, Les postes THT / HT.

ELEC International Symposium, 1998.

[12] Eric Morel

Charte Smart Grid Côte d'Azur Solutions pour, l'Aménagement d'un Ecoquartier Innovant.

La Chambre de Commerce et d'Industrie Nice Côte d'Azur, Décembre 2012

[13] H .Bahnhofstrasse

Smart Grid, document connaissances de base,

Associations des entreprise électriques, suisse, février 2014

[14] S. Bouvier, P. Strubel

Déployer un réseau plus intelligent grâce à des solutions et services de câblage

Livre blanc, Réseaux d'énergie intelligents (Smart Grids), mars 2010

[15] ITEMS INTERNATIONAL

La chaîne de valeur du marché des smart grids

www.items.fr Consulté le 10/05/2015.

[16] J .Monereau

SMART GRIDS: Les réseaux électriques intelligents et le cyber sécurité

Technologies de l'information et développement durable, Juin 2011

[17] GIMELEC

« Réseaux électriques intelligents »

Livre blanc, Des industriels au service de l'intelligence énergétique, Gimélec – novembre 2010

www.gimelec.fr Consulté le 10/05/2015.

[18] A. J. Roehr

Smart Energy Services: Real Solutions in the Market Now

Energy, Utilities & Chemicals, Cap Gemini, 2010.

[19] A. Germond, H. B Püttgen

Planification et gestion optimale des réseaux d'énergie électrique

Bulletin technique, Suisse romande, Juin 2015.

[20] P. Periyaswamy, P. Vollet

Le véhicule électrique : vers une gestion de l'énergie intelligente

Livre blanc, Schneider Electric, Février 2011

[21] F. Klopfert, G.Wallenborn

Les « compteurs intelligents » sont-ils conçus pour économiser de l'énergie ?

Erd distribution, Pp 87-99, Janvier 2011

[22] G. Blanchon, J. F .Bonnans, J.C.Dodu

Application d'une méthode de programmation quadratique successive à l'optimisation des puissances dans les réseaux électriques de grande taille

EDF, Bulletin de la recherche des études et recherches, pp 67-101, 1991

[23] Dr. Belkacem MAHDAD

Dispatsching Economique par Matlab

Editions Al-Djazair

[24] E. Acha, C. R .Esquivel, H. A. Perez and C. A. Camacho,

FACTS Modelling and Simulation in Power Network

John Wiley & Sons Ltd,England, 2004

[25] ADAMA D. DIARRA

LA REPARTITION OPTIMALE DE LA PUISSANCE REACTIVE POUR LE CONTROLE
DES TENSIONS DE BARRE D'UN RESEAU ELECTRIQUE PAR SIMPLEX LP.

Thèse Master, UNIVERSITE DU QUEBEC, SEPTEMBRE 1984

[26] B. S. HOTA, A. K. MALLICK,

Load Flow Study In Power System.

Thesis of Bachelor of Technology, National Institute of Technology, India, 2011

[27] T. Wildi,

ÉLECTROTECHNIQUE,

De Boeck Université, Institut de Recherche d'Hydro-Québec, 1999

[28] R. Grünbaum, M. Noroozian, B .Thorvaldsson,

FACTS - Les Systèmes Performants pour le Transport Flexible de l'Energie Electrique,

ABB Power Systems, Mai 1999, pp. 4-17.

[29] A .Catz,

Evolution Technique du Système de Transport et de Distribution d'Electricité,

Areva, T&D, France, 1999

[30] C. R Patel, S.N Patel and Dr. A .J Mehta,

Static Synchronous Series Compensator (SSSC): An Approach for Reactive Power
Compensation for the Transmission System,

B.V.M. Engineering College, 13-14 May 2011. pp. 1-2.

[31] J .C. Passelergue,

Interaction des Dispositifs FACTS dans les Grands Réseaux Electriques,

Thèse de Doctorat de l'INPG, France, 26 Novembre 1998

[32] I. Sèvegrand, L. Baudon

Évolution Vers un Comptage Intelligent

www.itron.com Consulté le 10/05/2015

[33] E .Lafaye, S .Vandenboucke, B .Maresca

Les compteurs intelligents: Vecteur de changements comportementaux?

CREDOC, Cahier de recherche, Décembre 2013.

[34] K. Mc Slarrow, R.Perry

Communications Requirement of Smart Grid Technologies.

Department of Energy, United states, October 5, 2010.

CAPAS : Comité de l'Académie

[35] Accenture

Achieving high performance with smart meter data management systems

A leading practice approach for utilities, 2011

[36] G. Macqueron

Comment gérer sa consommation électrique avec un téléphone

Futura-Sciences, Janvier 2010

[37] J. Hinojo

Charge pour véhicule électrique.Quand, Comment et Où?

P2SE,Novembre, 2010

[38] J. Girvan

Initiative des compteurs intelligents

Rapport annuel du Bureau de la vérificatrice générale de l'Ontario, Conseil canadien des consommateurs (CCC), 2014

Annexe

Annexe

Système de gestion de l'énergie EMS

Un système de gestion de l'énergie EMS (Energy Management System) est une suite d'applications et de technologies qui permettent le suivi, le contrôle et l'optimisation de la performance des ressources distribuées et des charges dans le système de distribution.

Infrastructure de comptage avancée AMI

Une Infrastructure de comptage avancée AMI (Advanced Metering Infrastructure) est un système de mesure complet qui combine une unité de mesure de données avec une communication en continu. L'AMI est utilisée pour surveiller les informations de consommation d'énergie et d'envoyer des informations et l'état du système à un fournisseur d'énergie.

SCADA

Les systèmes SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition Systems) permettent de mesurer des milliers de points de mesure dans des réseaux électriques nationaux et régionaux. Le système modélise les réseaux, simule l'exploitation de la charge, localise les erreurs, prévient les défaillances et contribue au négoce de l'énergie.

Système de mesure étendu WAMS

Un système de mesure étendu WAMS (Wide Area Measurement System) est composée d'une technologie avancée de mesure, d'outils d'information et d'infrastructure opérationnelle qui facilitent la compréhension et la gestion du comportement de plus en plus complexe présenté par les grands réseaux électriques. C'est un système de mesure employant des communications par satellite de positionnement globales (GPS) capable de détecter et de rapporter en temps réel les variations des paramètres du réseau, comme les chutes de tension ou les défauts, au-dessus d'un large secteur géographique. Dans sa forme actuelle, un WAMS peut être utilisé comme une infrastructure autonome qui complète le système conventionnel de surveillance, de contrôle et d'acquisition de données SCADA

Home Area Network (HAN)

Une maison HAN (Home Area Network) peut intégrer des appareils électriques dans une maison à l'autre avec des systèmes d'automatisation et de contrôle d'énergie permettant de réduire la consommation d'électricité.

Gestion des données du compteur MDM

La gestion des données des compteurs MDM (Meter Data Management) permet le stockage de données à long terme et la gestion d'une grande partie des données qui sont reçus à partir d'un AMI ou d'une AMR (Automated Meter Reading). Ce système évalue et traite les données avant de les envoyer pour la facturation et l'analyse.

Plogg

Un plogg (mot dérivé de la contraction de power (énergie) et de log (enregistrer), petit adaptateur inséré entre la prise électrique murale et le cordon d'alimentation, enregistre la consommation de chaque appareil et la transfère à un ordinateur par signal radio.

Cloud Computing

Le *cloud computing* (en abrégé *cloud* Nuage » en français) ou l'**informatique en nuage** désigne un ensemble de processus qui consiste à utiliser la puissance de calcul et/ou de stockage de serveurs informatiques distants à travers un réseau, généralement internet. Ces ordinateurs serveurs sont loués à la demande, le plus souvent par tranche d'utilisation selon des critères techniques (puissance, bande passante...) mais également au forfait. Le *cloud computing* se caractérise par sa grande souplesse d'utilisation : selon le niveau de compétence de l'utilisateur client, il est possible de gérer soi-même son serveur ou de se contenter d'utiliser des applications distantes.

GPRS

Le GPRS (*General Packet Radio Service*) est une norme pour la téléphonie mobile dérivée du GSM et complémentaire de celui-ci, permettant un débit de données plus élevé. Le GPRS est une extension du protocole GSM : il ajoute par rapport à ce dernier la transmission par paquets. Cette méthode est plus adaptée à la transmission des données. En effet, les ressources ne sont allouées que lorsque des données sont échangées, contrairement au mode « circuit » en GSM où un circuit est établi – et les ressources associées – pour toute la durée de la communication.

Flux tendu

Flux tendu » ou « **just in time** » signifie que l'électricité doit être produite au moment où elle est consommée.

Régulation primaire

Lorsque de l'énergie cinétique est prélevée sur le rotor d'un groupe, sa vitesse de rotation décroît. Cette décroissance est perçue par le régulateur de vitesse, qui réagit en augmentant l'admission de

fluide (vapeur, eau) dans la turbine afin d'accélérer le rotor et de ramener la vitesse très près de sa valeur nominale. Ceci ne s'applique évidemment que si la turbine fonctionne en dessous de sa puissance maximale. Cette régulation locale, au niveau du groupe de production, est appelée **régulation primaire**. Elle se manifeste quelques secondes après la perturbation et termine d'agir au plus tard en 30 secondes.

Régulation secondaire

La **régulation secondaire** s'appuie sur la définition de zones de réglage. Dans l'UCTE, à l'heure actuelle, ces zones coïncident avec les pays, à quelques exceptions près. Le rôle de la régulation secondaire de fréquence est de ramener la fréquence à sa valeur nominale et les puissances échangées entre zones de réglage à leurs valeurs programmées. Alors que toutes les centrales participent au réglage primaire, dans le réglage secondaire c'est la zone responsable du déséquilibre production-consommation initial qui doit ajuster les productions de ses centrales.

Critère de sécurité N-1

En pratique, ces incidents sont définis comme la perte d'un élément de transport ou de production. Ceci conduit au **critère de sécurité N-1** qui examine le comportement d'un système de N composants suite à la perte d'un d'entre eux. La sécurité N-1 est assurée si le système peut subir chacun de ces incidents simples sans l'aide d'actions correctives, en particulier sans affecter les consommateurs.

Systèmes nodaux et systèmes dits « du timbre poste ».

Deux architectures dominent le débat : les **systèmes nodaux** et les systèmes dits « **du timbre poste** ». Dans un système nodal, la valeur économique d'un transport d'électricité entre deux noeuds est, par définition, la différence entre les prix locaux de l'énergie à ces deux noeuds. Dans un système du « timbre-poste », par contre, le prix est supposé le même dans chacune des zones sous le contrôle d'un gestionnaire de réseau.

Mix énergétique

Le terme de mix énergétique (ou bouquet énergétique) désigne la répartition des différentes sources d'énergie primaire dans la consommation énergétique finale d'une zone géographique donnée. Il inclut les énergies fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon), le nucléaire, les déchets et les diverses énergies renouvelables (biomasse, éolien, géothermie, hydraulique et solaire). Ces énergies primaires sont utilisées pour produire de l'électricité, des carburants pour les transports, de la chaleur ou du froid pour l'habitat ou l'industrie.

Pour chaque région ou chaque pays, la composition du mix énergétique dépend :

- de la disponibilité des ressources exploitables sur le territoire ou de la possibilité d'en importer ;
- de l'ampleur et de la nature des besoins énergétiques à couvrir ;
- des choix politiques qui découlent du contexte historique, économique et social, démographique, environnemental et géopolitique.

Cette diversité des situations peut être mesurée en examinant les chiffres de production et de consommation de chaque pays. Cette variété de facteurs fait que les bouquets énergétiques sont très variables d'un pays à un autre :

Le mix énergétique de la France est stable depuis le milieu des années 2000, avec environ 40 à 45 % de nucléaire, environ 30 % de pétrole, 15 % de gaz, autour de 8 % d'énergies renouvelables (hydraulique et autres) et 4 % de charbon. Le mix énergétique des Etats-Unis inclut plus de gaz (26 %) et de charbon (22 %) et beaucoup moins de nucléaire (10 %). La Chine appuie son développement sur le charbon (68 % de son mix énergétique). Les énergies renouvelables représentent 11 % et même si elle développe fortement le nucléaire, celui-ci ne constitue encore que 1 % du total. Les chiffres des bouquets énergétiques sont différents de ceux de la consommation finale d'énergie. Une partie importante des énergies primaires est en effet absorbée dans les opérations de transformation en énergies secondaires, notamment en électricité. Ainsi, en 2012, l'électricité représentait 22,6 % de la consommation finale en France, contre 45,1 % pour les produits pétroliers raffinés (les combustibles) et 20 % pour le gaz.

Mix électrique

Il définit la part du thermique, du nucléaire ou encore de l'hydraulique et des autres énergies renouvelables dans la production d'électricité. Pour la France, en 2013, le mix de la production électrique était :

- Nucléaire : 73,3 %
- Hydraulique ; 13,8 %
- Energies renouvelables (hors hydraulique) : 4,8 %
- Energies fossiles : 8,1 %

Vehicle to Grid » (V2G),

Le terme « Vehicle to Grid » (V2G), littéralement « du véhicule vers le réseau » caractérise l'action de réinjecter l'électricité contenue dans les batteries d'une voiture électrique dans le réseau électrique durant les périodes de stationnement. Avec le V2G, le producteur d'énergie optimise ses installations de production, y compris intermittentes (éolien et solaire). L'opérateur d'énergie achète l'énergie au meilleur prix et la revend au prix fort lors des pics de consommation. Enfin le « consom-acteur » achète de l'électricité à un prix compétitif en contrepartie d'une contrainte de branchement de son véhicule après sa journée de travail et sur les lieux où il stationne son véhicule (travail, supermarché, parking, etc.).

Transition énergétique

La notion de transition énergétique est un volet essentiel de la transition écologique, elle désigne le passage du système énergétique actuel utilisant des ressources non renouvelables vers un bouquet énergétique basé principalement sur des ressources renouvelables ; ce qui implique de développer des solutions de remplacement aux combustibles fossiles, qui sont des ressources limitées et non renouvelables (à l'échelle humaine). Certains y ajoutent les combustibles fissiles (matières radioactives telles que l'uranium et le plutonium). La transition énergétique prévoit leur remplacement progressif par des sources d'énergies renouvelables

pour la quasi-totalité des activités humaines (transports, industries, éclairage, chauffage, etc.). C'est donc aussi une transition comportementale et sociotechnique¹, qui implique une modification radicale de la politique énergétique : en passant d'une politique orientée par la demande à une politique déterminée par l'offre, et d'une production centralisée à une production décentralisée. Il s'agit aussi d'éviter la surproduction et les consommations superflues pour mieux économiser d'énergie, et bénéficier d'une meilleure efficacité énergétique.

CPL : Courants Porteurs en Ligne

La communication par CPL permet de construire un réseau informatique sur le réseau électrique. En 2010, un protocole CPL de communication global, simple et ouvert, dit «G3-PLC» (ou «*G3-Power Line Communication*»), a été spécialement développé pour le fonctionnement des Smart Grids. Il constitue un pas de plus vers les réseaux électriques intelligents, et l'internet de l'énergie. Il permet un meilleur contrôle du réseau de distribution électrique, et une gestion énergétique fine, y compris pour la gestion contrôlée de l'éclairage intérieur ou extérieur, le chargement de véhicules électriques, et d'autres applications des «*réseaux de demain*» (gestion de production et microproduction décentralisées d'énergie irrégulières de type solaire/éolien).

3x20

Trois fois 20 » : réduction des émissions de gaz à effet de serre de 20 % par rapport au niveau de 1990, amélioration de 20 % en matière d'efficacité énergétique et part des énergies renouvelables dans la consommation totale d'énergie augmentée à 20 % d'ici à 2020.

Bâtiment à énergie positive

Un **bâtiment à énergie positive** (parfois abrégé en «*BEPOS*») est un bâtiment qui produit plus d'énergie (électricité, chaleur) qu'il n'en consomme pour son fonctionnement. Cette différence de consommation est généralement considérée sur une période lissée d'un an.

Si la période est très courte, on parle plutôt de bâtiment autonome. Il s'agit généralement d'un bâtiment passif très performant et fortement équipé en moyens de production d'énergie par rapport à ses besoins en énergie. Les toits, murs, voire les fenêtres ou d'autres éléments (verrières de véranda ou balcons, murs d'enceinte, toiture de garage ou appentis, fondations, etc.) peuvent être mis à profit pour accumuler et restituer de la chaleur ou produire de l'électricité. Le caractère excédentaire en énergie («*positif*») est permis par des principes constructifs et bioclimatiques, mais aussi par le comportement des usagers (gestion efficace des usages, des consommations de l'électroménager et de l'informatique, de la mobilité...). La quantité d'énergie produite sur le toit, murs, ombrières... doit au moins compenser la somme des consommations énergétiques moyennes annuelles sous le toit.

Habitat passif

L'**habitat passif** est une notion désignant un bâtiment dont la consommation énergétique au m² est très basse, voire entièrement compensée par les apports solaires ou par les calories émises par les apports internes (matériel électrique et habitants). Pour être qualifiée de «*passive*» une maison doit réduire d'environ 80% ses dépenses d'énergie de chauffage par rapport à une maison neuve construite selon les normes allemandes d'isolation thermique de 1995, normes déjà très exigeantes. On parle alors de **bâtiment à énergie passive** ou BEPAS, pendant du «bâtiment à énergie positive» ou «BEPOS».

Efficacité énergétique

Efficacité énergétique ou **efficience énergétique** désigne l'état de fonctionnement d'un système pour lequel la consommation d'énergie est minimisée pour un service rendu identique. C'est un cas particulier de la notion d'efficience. Depuis quelques années on lui associe souvent le concept d'énergie intelligente ou de réseau intelligent. L'efficacité énergétique s'appuie généralement sur l'optimisation des consommations, qui passe par la recherche de la moindre intensité énergétique (à service égal), une «*utilisation rationnelle de l'énergie*», des processus et outils plus efficaces. Le volet économies d'énergie cherche à réduire les gaspillages et les consommations inutiles. C'est donc aussi un élément important de la performance environnementale. En Europe, une directive de 2006 la définit comme «*le rapport entre les résultats, le service, la marchandise ou l'énergie que l'on obtient et l'énergie consacrée à cet effet*».

Agrégateurs

Les **acteurs du demand-response, ou agrégateurs** comme on les appelle, rémunèrent les industriels énergivores qui acceptent de baisser ponctuellement leur consommation électrique, en différant certaines de leurs activités de quelques minutes.

Le potentiel considérable du marché des smart grids ouvre également la voie à de nouveaux métiers, notamment celui d'agrégateur »,. Ces derniers ont pour mission d'agréger des consommations électriques pour les effacer en cas de contraintes sur le réseau. Ils disposent pour cela d'un portefeuille de clients acceptant de voir certains de leurs appareils être momentanément coupés à distance, lors de pointe d'hiver par exemple, en échange d'une contrepartie financière. L'agrégateur est un acteur qui se place en intermédiaire entre les gestionnaires des réseaux de transport et de distribution, les producteurs décentralisés et les consommateurs. Ce rôle d'intermédiaire, voire de coordinateur, est prépondérant vis-à-vis de gros consommateurs, industriels et gros tertiaires par exemple. Il se double d'un rôle de « mutualisateur » pour les petits clients ; il aide à en gérer le foisonnement et, en agrégeant leurs consommations, en permet la prise en considération dans les mécanismes de réduction de la pointe de consommation ou, plus généralement, dans les processus de gestion de la demande. Il y a deux sortes d'agrégateurs : l'agrégateur technique et l'agrégateur économique. En combinant les effets d'une production décentralisée et d'éventuelles capacités de stockage électrique, d'une part, et l'ajustement de la consommation de ses clients d'autre part, l'agrégateur technique allège la demande en période de pic de consommation et évite de ce fait, soit une surcharge du réseau, soit une production supplémentaire très coûteuse. Il intervient notamment sur le marché d'ajustement qui est utilisé par le gestionnaire de transport pour assurer l'équilibre instantané du réseau. Notamment dans un contexte où les prix de l'électricité varient sur de courtes

périodes, l'agrégateur économique joue sur les mêmes paramètres que précédemment pour optimiser la facture énergétique de ses clients.

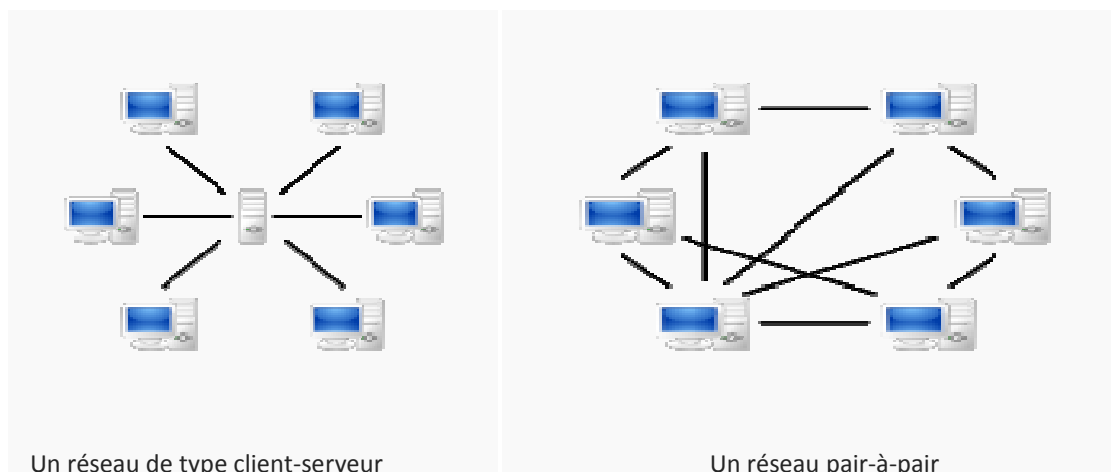
Centrale électrique virtuelle

Une **centrale électrique virtuelle** est une combinaison des petites sources d'énergie, qui sont optimisées par un système informatique centralisé ou des options d'achats auprès d'un producteur externe à l'entreprise de production. La différence essentielle entre l'opération seule et coordonnée de cette source d'énergie distribuée consiste en un réseau de communication et un poste de commande central capable d'optimiser la production en temps réel.

P2P : peer-to-peer

Le **pair à pair** est un modèle de réseau informatique proche du modèle client-serveur mais où chaque client est aussi un serveur. Le pair à pair peut être centralisé (les connexions passant par un serveur central intermédiaire) ou décentralisé (les connexions se faisant directement). Les systèmes pair-à-pair permettent à plusieurs ordinateurs de communiquer via un réseau, en y partageant simplement des objets – des fichiers le plus souvent, mais également des flux multimédia continus (*streaming*), le calcul réparti, un service (comme la téléphonie avec *Skype*), etc. La particularité des architectures pair-à-pair réside dans le fait que les données puissent être transférées directement entre deux postes connectés au réseau, sans transiter par un serveur central. Il permet ainsi à tous les ordinateurs de jouer directement le rôle de client *et* serveur. On appelle souvent *nœud* les postes connectés par un protocole réseau pair-à-pair.

Illustration de réseaux client-serveurs et pair-à-pair.



Auto-cicatrisation du réseau électrique :

Lorsqu'un incident survient, par exemple un défaut ou une « agression » de câble, le disjoncteur, par sécurité coupe l'alimentation de tous les postes situés sur la même maille, ce qui provoque une coupure de courant chez les clients du secteur géographique concerné. L'opérateur est alerté par son système de supervision, puis envoie une équipe d'intervention qui va « ouvrir » la maille et chercher le point de défaut. La réalimentation ne peut se faire que progressivement et dans la plupart des cas, dans un délai de 30 minutes. La solution qui permet au réseau électrique de se reconfigurer en des temps records, sans même que les clients s'en aperçoivent s'appelle auto-cicatrisation (self-healing). Chez EDF, aujourd'hui, lorsqu'un incident survient sur le réseau moyenne tension, des automates sont en mesure de rétablir le courant chez 70 % des clients coupés en moins de 2 minutes et ce avant toute intervention humaine. Ces procédés, connus sous le nom de - fonctions avancées de conduite - et d'auto-cicatrisation permettent de réalimenter automatiquement et à distance l'électricité. Ces termes décrivent de façon imagée les nouvelles qualités d'un réseau électrique, capable de se reconfigurer en des temps records, souvent sans même que les clients ne s'en aperçoivent, pour maintenir la qualité de distribution de l'électricité.

Résumé

Ce travail porte sur une étude des réseaux électriques intelligents (smart grids). Après avoir exposé les différents concepts qui régissent un réseau électrique traditionnel dont la gestion est unidirectionnelle, nous avons introduit la notion bidirectionnelle d'un réseau intelligent qui est basé essentiellement sur les compteurs intelligents (smart meters). Ces derniers utilisent les technologies de l'information et de la communication (TIC) qui sont donc un pivot important dans la modernisation des réseaux électriques. Nous avons aussi utilisé les autres technologies qui peuvent être liées aux réseaux intelligents : les technologies liées aux méthodes d'optimisation des réseaux et celles liées aux dispositifs FACTS. Des simulations ont été effectuées sur un réseau test 3 machines-9 nœuds pour montrer comment peuvent interagir les différents composants (optimisation, FACTS, compteurs intelligents) dans la gestion d'un réseau électrique intelligent.

Mots Clés : Réseaux Electriques, Réseaux Electriques Intelligents Smart Grids,, FACTS, Optimisation

ملخص

نتناول في هذا العمل محور الشبكات الكهربائية الذكية التي تعتبر محور البحث الحالي بهدف تطوير إدارة الشبكات و التحكم بطرق ذكية فالشبكات الكهربائية تعتمد في الأساس على دمج تكنولوجيات الاتصال الحديثة لإرسال و استقبال المعلومات المتعلقة باستهلاك الطاقة الكهربائية و إنتاجها مما يسهل للمحافظة على أداء الشبكة بالإضافة إلى الاعتماد على طريقة إنتاج الكهرباء بأقل تكلفة. التحكم في الشبكة ممكنة بغرض التخفيض في تكلفة الطاقة الكهربائية لقد تطرقنا إلى نقاط أهمها العداد الذكي الذي يعتبر حجر الأساس في الشبكة الكهربائية الذكية و كذلك الانضظمة المتطورة

Abstracts

This work deals with a study of smart grids. After explaining the various concepts that govern traditional electrical grid which management is unidirectional, we introduced the concept of smart grids that is primarily based on smart meters. The smart grids use information and communication technology which is an important pivot in the modernization of power systems. We also used other technologies that may be related to smart grids as the optimization methods and the FACTS (Flexible AC Transmission Systems) devices. Simulations were performed on a test network 3 machines-9 buses to show how the various components can interact in the management of a smart grid.

Keywords: Power Systems, Smart Grids, FACTS, Optimization