

I- Introduction

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

Le réseau électrique comprend des milliers de kilomètres de ligne, des milliers de postes de transformation, ainsi que de nombreux organes de coupure et d'automates de réglage dimensionnés pour assurer le bon fonctionnement de la fourniture d'énergie électrique. Ainsi, il existe aussi des contrôles hiérarchisés assurant la tenue en tension et en fréquence. Ceux-ci sont couplés aux divers automates et ont la charge de garantir la continuité de service du système [2].

Cependant le réseau peut être soumis à des perturbations se propageant vite et sur une grande étendue et qui peuvent avoir un impact critique pour tout le système électrique. Ces perturbations peuvent être, entre autres, accentuées par des productions locales ajoutées sur le réseau transport ou de distribution. On assiste donc à une prolifération de système de production décentralisée connectée pour l'essentiel à un système électrique non prévu pour les accueillir.

I- Gestion des réseaux électriques

I.1 Le système électrique verticalement intégré :

I.1.1 Définition :

L'énergie électrique étant alors et jusque dans les années 1990 produite de manière presque exclusivement centralisée et consommée de manière totalement décentralisée [2].

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

Le réseau de transport :

-La première de ces divisions est le réseau de transport (en Algérie 225kV, 400kV) ou Réseau de haute tension de niveau B (HTB). Sur ce réseau sont connectées les centrales de production classique comme les centrales nucléaires, thermiques, hydrauliques de l'ordre du millier de mégawatts. Ces réseaux ont une architecture maillée, ainsi les productions ne sont pas isolées mais toutes reliées entre elles, cette structure permet une sûreté de fonctionnement accrue par rapport à une structure de réseau dite radiale puisqu'elle assure la continuité du service ou d'alimentation en cas d'aléas comme la perte d'une ligne, d'une production, etc. En effet, lors de l'ouverture d'une ligne, le fait d'avoir cette structure maillée permet au flux De puissance de trouver un nouveau chemin pour contourner cette ligne en défaut et donc de garantir la continuité de l'alimentation en aval du problème. C'est à ce niveau de tension Sont assurées les interconnexions entre régions au niveau nationale et les échanges (importation/exportation) d'énergie électrique au niveau internationale (ex : Hassi Ameer (Algérie) – Bourdim (Maroc) et El-hadjar (Algérie) – Djendouba (Tunisie), en 400 kV).

-Le réseau de répartition (63kV, 90kV), celui-ci assure le transport des réserves en électricité composées de l'énergie puisée au réseau de transport et de production vers les zones de consommations et à quelques gros clients industriels directement connectés à celui-ci. La gestion de la tension et de la fréquence des réseaux de transport et de répartition est effectuée de manière centralisée. Des mesures de puissances active et réactive et de tension sont effectuées sur le réseau et sont transmis aux centres de télé conduite. Ces mesures sont ensuite disponibles aux opérateurs en charge du bon fonctionnement du réseau ainsi que de la coordination des productions. L'opérateur en charge du bon fonctionnement de ces réseaux est le gestionnaire du réseau de transport. (En Algérie c'est le gestionnaire du **R**éseau de **T**ransport d'**E**lectricité ou le GRTE. Cette unité exploite et entretient le réseau public de transport Algérien [1].

-Le réseau de distribution (20kV, 400V). Ce réseau a pour fonction d'alimenter l'ensemble de la clientèle principalement connectée à ce réseau. Son exploitation est gérée par un **G**estionnaire de **R**éseau de **D**istribution (GRD). Les réseaux de distribution ont

principalement une structure radiale. A la différence d'une structure maillée une structure radiale est une structure arborescente ; cette structure arborescente simplifie considérablement le système de protections puisque le transit de puissance se fait de manière unilatérale du poste source (HTB/HTA) vers les postes HTA/BT et les consommateurs finaux. Ceci permet notamment la localisation et l'élimination rapide des défauts, ainsi que le comptage de l'énergie aux postes sources. Cette structure est donc parfaitement adaptée à un système verticalement intégré dans lequel la production est centralisée et la consommation est distribuée [2].

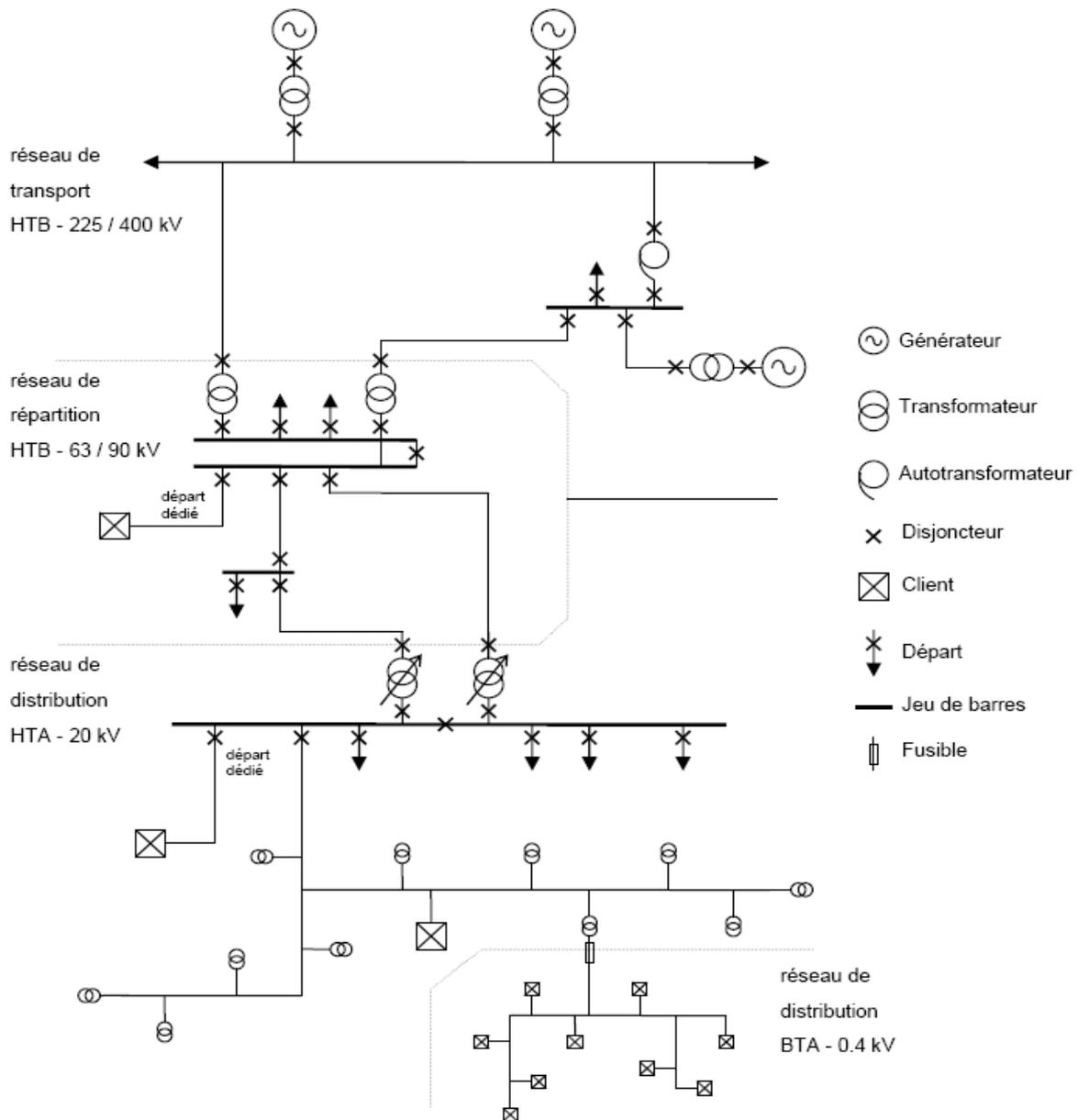


Figure I.1 : les différents niveaux de tension du système électrique [2].

I.1.2 Les raisons de choix du système électrique verticalement intégré [2] :

Généralement le système électrique est basé sur un monopole production – transport –

distribution pour des raisons économiques liées au coût de construction et d'entretien des installations électriques. Cette structure verticalement intégrée était aussi favorisée par les obligations de service public du distributeur d'énergie électrique comme la continuité de service, la qualité de l'énergie, l'égalité de traitement des consommateurs, ou l'obligation de fourniture [2].

Les tensions normalisées selon la CEI : Figure I.2.

La nouvelle norme CEI (ainsi que les textes législatifs en vigueur en Algérie depuis juin 2002) définissent les niveaux de tension alternative comme suit (Figures I.3. et I.4) :

HTB : pour une tension composée supérieure à 50 kV.

HTA : pour une tension composée comprise entre 1 kV et 50 kV.

BTB : pour une tension composée comprise entre 500 V et 1 kV.

BTA : pour une tension composée comprise entre 50 V et 500 V.

TBT : pour une tension composée inférieure ou égale à 50 V.

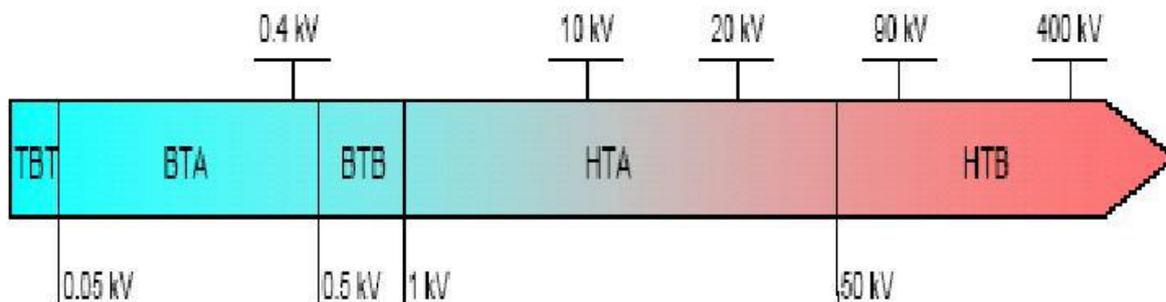


Figure I.2 : Niveaux de tension normalisés [2].

Par convention on adoptera dans ce qui suit :

- HTB désignera la haute tension HT.
- HTA désignera la moyenne tension MT.
- BTB et BTA désignerons le domaine de la basse tension BT.

I.2.1 Les poste sources HTB/HTA :

Les postes sources, en général alimentés par le réseau de répartition à 63 ou 90 kV (quelquefois directement par le réseau de transport à 225 kV) constituent l'interface entre les

réseaux de transport/répartition et les réseaux de distribution. Ils sont constitués en phase initiale d'un transformateur alimenté par une arrivée HTB (HT1) et alimentant lui-même une ou deux rames, ou jeux de barres (Figure I.3.a). En seconde phase, avec l'augmentation des charges à desservir, un second transformateur est ajouté (Figure I.3.b) et le poste est généralement raccorde à une deuxième arrivée HTB (HT2) appelée " ligne de garantie ". En phase finale, un troisième (et quelquefois plus) transformateur est ajouté en double attaché (Figure I.3.) [2].

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

Les départs HTA sont regroupés par demi-rame en fonction de leur nature (aérienne ou souterraine) et de la similarité de leur courbe de charge, c'est-à-dire du type de clients raccordés [2].

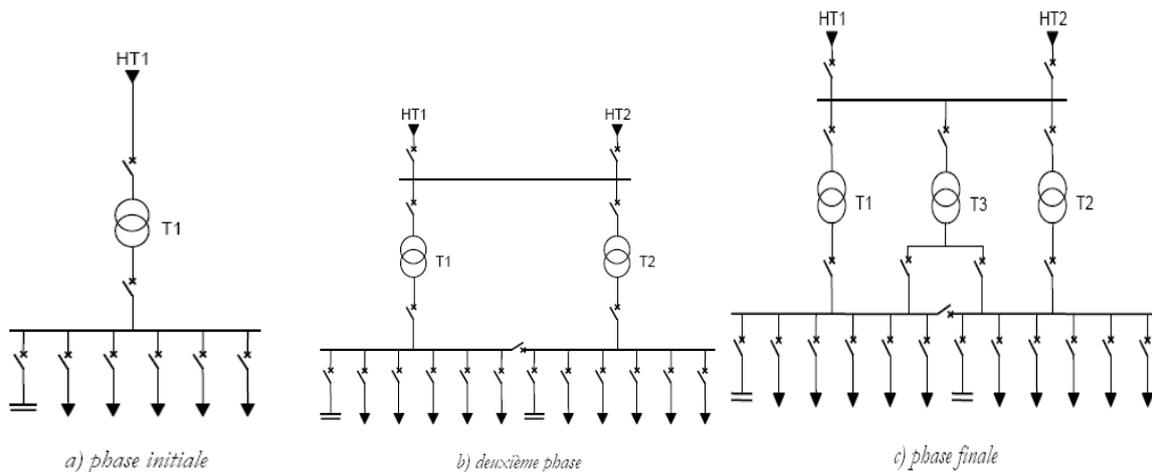


Figure I.3 : Schéma de principe des postes sources HTB/HTA.

I.2.2 Les lignes HTA

Le réseau HTA a une structure arborescente radiale le plus souvent bouclable par une autre demi-rame ou un autre poste source pour la sécurité d'exploitation. Il est en général constitué d'une artère ou ossature principale et de dérivations. Selon la densité des charges à desservir,

le réseau de distribution sera réalisé soit en lignes aériennes, soit en câbles souterrains [2].

I.3.1-Architecture des réseaux électriques :

Un réseau électrique est un ensemble d'outils destiné à produire, transporter, distribuer l'énergie électrique et veiller sur la qualité de cette énergie, notamment la continuité de service et la qualité de la tension. L'architecture ou le design du réseau est un facteur clé pour assurer ces objectifs. Cette architecture peut être divisée en deux parties ; D'une part, l'architecture du poste, et de l'autre part l'architecture de la distribution [1].

I.3.1.1-Production :

La production qui sert à produire l'énergie électrique grâce à des turbo-alternateurs qui transforme l'énergie mécanique des turbines en énergie électrique à partir d'une source primaire (gaz, pétrole, hydraulique...). Les sources primaires varient d'un pays à l'autre. Exemple en Algérie le gaz naturel couvre plus de 70% de la production, en France, 75% d'électricité est d'origine nucléaire. En générale, chaque source de production (centrale électrique) regroupe plusieurs groupes turbo-alternateurs pour assurer la disponibilité pendant les périodes de maintenance.

Par ailleurs, on trouve dans les pays industrialisés des puissances installées de plus en plus élevées pour répondre à la demande croissante en énergie électrique, exemple la centrale nucléaire de Gravelines en France 6×900 MW, la central hydro- électrique des Trois-Gorges en Chine 34×700 MW et 2×50 MW (devenue la plus grande central dans le monde en 2014 [2]).

I.3.1.2-Transport :

Un alternateur produit la puissance électrique sous moyenne tension (12 à 15 kV), et elle est injectée dans le réseau de transport à travers des postes de transformation pour être transmise sous haute ou très haute tension afin de réduire les pertes dans les lignes. Le niveau de la tension de transport varie selon les distances et les puissances transportées, plus les distances sont grandes plus la tension doit être élevée, la même chose pour la puissance. Par exemple, le réseau de transport en Algérie utilise une tension de 220 kV (voir 400 kV pour certaines lignes dans le sud notamment), le réseau européen utilise 400 kV, et le réseau nord-américain 735 kV.

I.3.1.3-Répartition :

Le réseau de répartition prend sa source dans le réseau de transport à partir des postes d'interconnexion THT/HT(MT) et sert à fournir les gros consommateurs industriels sous haute ou moyenne tension, et à répartir les puissances dans différentes régions rurales ou urbaines. Ce type de réseau utilise des tensions typiques de 60 kV et 30 kV.

I.3.1.4-Distribution :

La distribution sert à alimenter les consommateurs en moyenne ou en basse tension (Typiquement 400V), grâce à des postes de transformation MT/BT. Figure I.4.

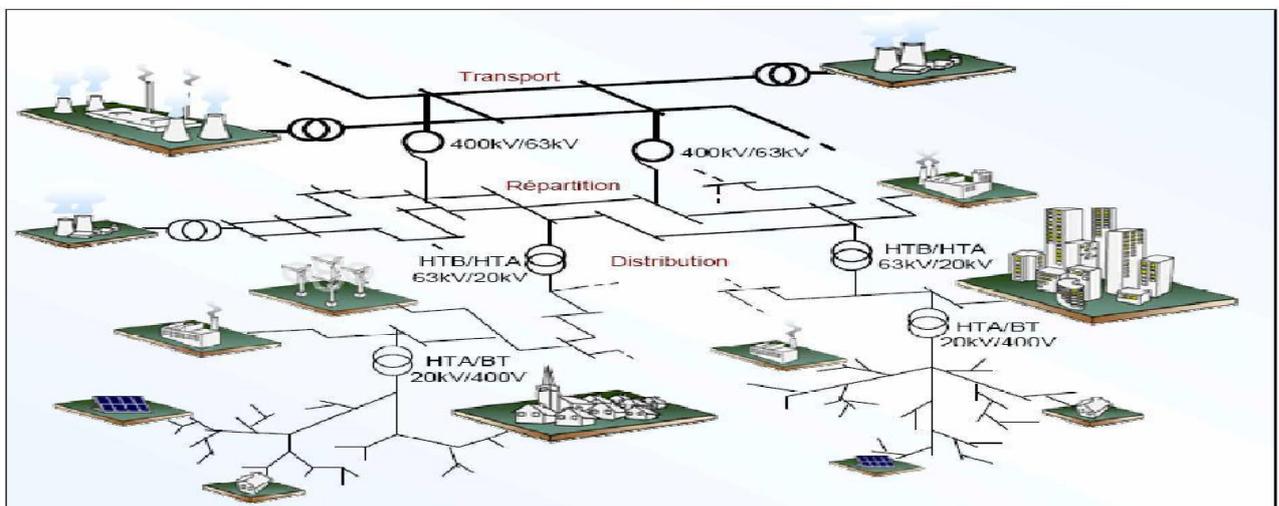


Figure I.4 : Architecture du réseau électrique [1].

I-4-Topologies des réseaux électriques :

Les topologies diffèrent d'un type de réseau à un autre. Cette topologie est dictée par : Le niveau fiabilité recherché, la flexibilité et la maintenance, ainsi que les coûts d'investissement et d'exploitation. Les différentes topologies qu'on trouve souvent sont illustrées sur la Figure I.5 [1,2].

-Réseau maillé :

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

-Réseau bouclé :

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

-Réseau radial :

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

-Réseau arborescent :

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

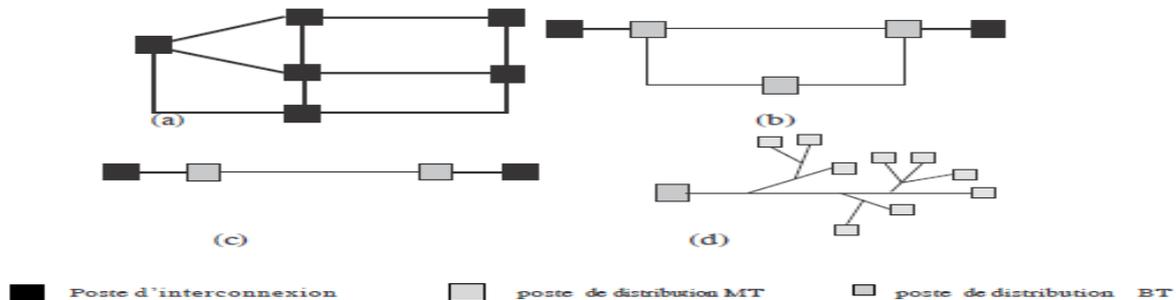


Figure I.5 : Différentes topologies des réseaux électriques : (a) Réseau maillé, (b) Réseau bouclé, (c) Réseau radial, (d) Réseau arborescent [1].

I-5-Équipements et architectures des postes :

Dans une analyse globale d'un réseau électrique un poste est considéré comme une barre ou tout simplement un nœud où transitent des flux de puissances. Pour le désigne et la planification du réseau, ce poste constitue une pièce majeure dans le système de répartition ou de distribution, dans la mesure où c'est à ce niveau qui est organisée la configuration de la topologie du réseau, et c'est aussi un point de surveillance de contrôle et de protection [1].

Un poste électrique est un ensemble d'appareillage arrangé de sorte à :

- Faire transiter la puissance d'un niveau de tension à un autre, en général s'ils 'agit d'un poste de répartition ou de distribution, le poste sert à baisser la tension ;
- Réglage de la tension, comptage de puissance, surveillance, etc. Cet ensemble d'appareillage comporte
- Des jeux de barres ;
- Des transformateurs ;
- Des disjoncteurs et sectionneurs (appareillage de coupure) ;
- Des compensateurs ;
- Appareillage de mesure et de comptage de puissance ;
- autres.

I-6-1-Qualités recherchées d'un poste :

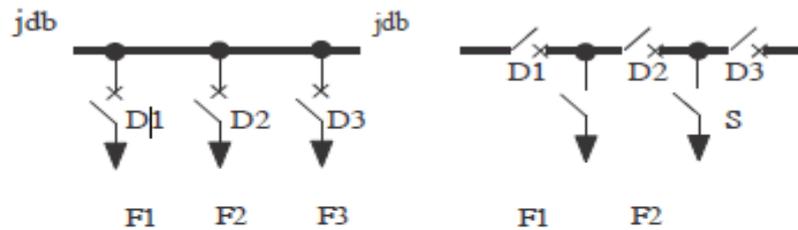
Les qualités recherchées lors d'un choix d'architecture d'un poste électrique sont : La sécurité qui est l'aptitude à conserver un maximum de dérivations (départs) saines en service, en cas de non ouverture du disjoncteur chargé d'isoler une partie en défaut. La souplesse ou l'aptitude d'un poste à réaliser plusieurs découplages et y raccorder n'importe quels départs. Une maintenabilité permettant la poursuite de l'exploitation d'une dérivation malgré l'indisponibilité d'un disjoncteur, et finalement, une simplicité de sorte à pouvoir changer de configuration en manœuvrant le minimum d'appareils. La focalisation sur une qualité donnée dépend du type de poste et des options d'exploitation. En général, les postes THT et HT couvrent des très large zones, c'est pourquoi on favorise avant tout la sécurité. Pour les postes MT, la charge couverte est beaucoup moins importante, alors on favorise plutôt l'économie [1].

I-6-2-Architectures des postes :

Le choix de l'architecture d'un poste dépend de plusieurs paramètres technico-économiques (Fiabilité, flexibilité, maintenance, les coûts d'investissement et de maintenance). La fiabilité et la flexibilité d'un poste sont déterminées par son architecture, et plus précisément du nombre et disposition des jeux de barres, nombre et disposition des appareils de coupure (disjoncteurs), et éventuellement des lignes qui alimentent le poste.

Les postes peuvent être classés en fonction de leurs architectures indépendamment de leurs types en deux familles ;

- ❖ **Poste à couplage de barres** où les jeux de barres couplent en eux les différents départs comme c'est indiqué à la Figure I.6
- ❖ **Poste à couplage de disjoncteurs** où les disjoncteurs couplent entre eux les différents départs comme c'est indiqué à la Figure I.6 [1].



(a) Couplage de barres.

(b) Couplage de disjoncteurs

Figure I.6 : Les deux principales architectures des postes. D : Disjoncteur, S : Sectionneur [1]

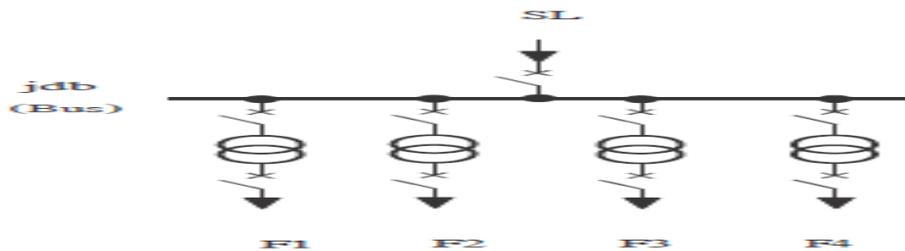


Figure I.7 : Simple jeu de barres, simple antenne et plusieurs départs [1].

La Figure I.7 montre la différence entre ces deux familles de postes. De point de vue fiabilité, on peut remarquer qu'un défaut sur le départ F1 par exemple nécessitera l'ouverture du disjoncteur D1 pour l'architecture à couplage de barre, alors que pour l'autre architecture il faudra ouvrir D1 et D2 pour isoler le départ en défaut.

Cependant, en cas de maintenance de disjoncteur D1 le départ est F1 est condamné pour l'architecture à couplage de barre, mais peut rester en service grâce à D2 pour l'architecture à couplage de disjoncteurs. Donc, à la lumière de cette exemple, on peut dire que l'architecture à couplage de disjoncteur est plus fiable, cependant de point de vue coût, il est évident qu'elle revient plus chère du fait qu'il nécessite plus de disjoncteurs pour protéger le même nombre de départ (exemple : trois disjoncteurs pour trois départs dans une architecture à couplage de

barres, le même nombre de disjoncteurs pour deux départs pour une architecture à couplage de disjoncteurs.).

I-6-3-Schémas des postes à couplage de barres :

La Figure 4 représente le schéma d'un poste à couplage de barres simples souvent appelé simple antenne ou simple jeu de barres. Ce schéma est constitué d'une ligne d'arrivée (SL) alimentant un jeu de barres sur lequel plusieurs départs sont raccordés pour alimenter des charges à travers des transformateurs normalement abaisseurs de tensions. Ce type de schéma a l'avantage d'être simple et économiquement pas cher, mais il présente plusieurs inconvénients de point de vue sécurité. En effet, il n'est pas difficile de remarquer qu'un défaut sur n'importe quel départ ou une maintenance l'un de ses équipements associés (disjoncteur ou transformateur), le mettra immédiatement hors service. D'autre part, un défaut sur le jeu de barres ou une maintenance de celui-ci condamnera tous les départs et mettra le poste hors service. Enfin, la perte de la ligne d'arrivée à cause d'un défaut sur la ligne, défaut ou maintenance de son disjoncteur entrainera encore la perte du poste [1].

I-6-4-Postes de distribution BT :

Les postes de distribution basse tension (MT/BT) sont relativement plus simples. En termes de puissance, ce sont des postes qui ne dépassent pas 10 MW. Selon leurs puissances ils peuvent être soit mis sur poteaux (en zones rural surtout ou semi urbaine) soit dans des cellules maçonnés (zone urbaine). La Figure 5 montre deux schémas de poste de distribution BT ;

- **Poste MT/BT en zone rurale ou semi urbaine**

- Le poste est alimenté côté MT par une arrivée aérienne simple et alimente un ou plusieurs départs BT comme le montre la Figure I.8.
- L'organe de protection côté MT peut être un simple sectionneur ou un Disjoncteur si le courant nominal est supérieur à 45 A.
- Le poste est soit mis sur le poteau pour des puissances faible (inférieures ou égale à 63 kVa, 100 kVa, 160 kVa), soit dans une cellule au bas du poteau pour des puissances plus grandes 250 kVa ou 400 kVa [1].

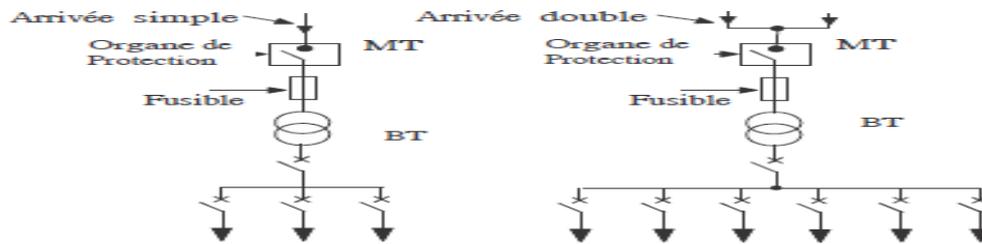


Figure I.8 : Postes de distribution basse tension [1].

Poste MT/BT en zone urbaine

- ❖ Le poste est alimenté côté MT par une arrivée souterraine en double dérivation ou en coupure d'artère. Côté BT, souvent plusieurs départs ;
- ❖ L'organe de protection côté MT peut être un simple sectionneur ou un disjoncteur si le courant nominal est supérieur à 45 A.
- ❖ Le poste est obligatoirement mis en cellule maçonnée.

Organe de Protection Organe de Protection BT BT

A-L'équilibre entre la production, la consommation et la distribution :

Nous venons d'aborder les fondements d'un réseau électrique traditionnel. Les équipes de prévision, de production électrique et de conduite du réseau cherchent en permanence et simultanément un équilibre entre production, consommation et distribution. L'exposé du fonctionnement de ce réseau nous a amené à comprendre que les opérateurs d'énergie électrique sont en constante gestion de la production et de la distribution de l'électricité en fonction de la consommation de l'ensemble des entités connectées au réseau (qu'ils s'agissent des individus, des entreprises ou autres organisations). Nous pouvons alors prétendre l'idée que les fournisseurs d'électricité, dans un réseau électrique traditionnel, ne gèrent pas la consommation. Seuls les compteurs électriques standards (ceux qui précèdent les compteurs « intelligents ») mesurent la consommation électrique afin d'aider les opérateurs à gérer et anticiper la production et la distribution.

Avec l'insertion des moyens de production décentralisés, des individus ou collectifs autres que des compagnies énergétiques, commencent à produire de l'énergie. C'est à dire,

que l'équation entre consommation, production issue des moyens de production centralisés et distribution n'est plus suffisante. L'électricité peut également être générée par des moyens de production décentralisés.

« Imaginons qu'à un moment donné, une proportion importante des logements produisent simultanément de l'électricité grâce à des panneaux solaires sur leur toiture. Si elle est envoyée directement et intégralement dans le réseau, celui-ci peut recevoir plus de débit que ce qu'il est capable d'encaisser. Autrement dit, si l'on investit dans les moyens de production décentralisés, il faut également investir dans la consolidation du réseau de distribution¹. »

Schématiquement, les courbes de production pour les énergies renouvelables telles que les panneaux solaires, ne sont généralement pas superposables avec les courbes de consommation. Autrement dit, une partie de l'énergie électrique produite doit être stockée un moment donné

Pour être distribuée dans un intervalle de temps adéquat à cette opération. Le stockage est alors nécessaire pour pouvoir distribuer l'électricité produite par les énergies renouvelables, lorsque les individus en ont besoin.

« Actuellement, un grand nombre d'individus décident d'installer des moyens de production à domicile. L'impact énergétique de cette production sur le réseau est minime, tant que ce nombre de particuliers reste faible. Nous pouvons considérer, en quelque sorte, le réseau comme un très grand stockeur. Cependant si une proportion importante des bâtiments est producteur d'énergies renouvelables mais que le réseau électrique n'a pas évolué, il ne pourra plus encaisser les moments de forte production locale. Or, si le particulier peut investir dans un moyen de production sur sa toiture, il n'est pas vraiment conscient ni prêt à investir simultanément dans la consolidation du réseau de distribution. Là apparaît le besoin de stocker localement l'énergie produite dans des batteries électriques et/ou des moyens de stockage thermiques. Autrement dit, quand on pense énergie renouvelable donc intermittentes, il faut prendre en compte la consommation, la production, le stockage et le réseau de

distribution [1]. »

Aujourd'hui, les distributeurs d'électricité doivent aussi trouver un équilibre entre une production venue des moyens de production décentralisés (énergies renouvelables), le réseau de distribution et la consommation. Mais qu'en est-il du stockage de l'énergie ?

Si ces individus ou collectifs connectés au réseau peuvent stocker l'énergie qu'ils produisent, ils n'auraient, semble-t-il, pas besoin de déléguer leur énergie aux opérateurs d'électricité. Ce serait une alternative à la gestion de l'équilibre production, distribution et consommation, des grands acteurs des réseaux électriques [].

« Si l'on admet qu'un individu investit et utilise à domicile des moyens de production d'énergie renouvelable, il faut penser simultanément les moyens de stockage de l'énergie. Comme nous avons pu l'expliquer, les courbes de consommation et de production sont différentes. L'énergie produite par ces moyens de production locaux doit être stockée et ensuite utilisée au moment voulu. Or, le stockage de l'électricité en grande quantité s'avère difficile et coûteux. L'alternative est alors de déplacer l'énergie produite par cet individu à un autre endroit du réseau où elle sera consommée par d'autres personnes. Cela demande alors des investissements dans les câbles de transport de l'électricité, ainsi que dans des compteurs qui mesurent la production et la consommation électrique.

En effet le stockage de l'électricité en grande quantité est difficile à l'échelle d'un bâtiment. Les opérateurs investissent alors dans la consolidation des câbles, et dans les compteurs « intelligents ». Pour remplir leur objectif, ils ont alors développé et expérimentent actuellement en France, des technologies de mesures qui permettent de récupérer les données de consommation et de production de chaque entité (individu et collectif) connectée au réseau

I.7.- Gestion et pilotage global des systèmes électriques :

L'optimisation globale des systèmes énergétiques nécessite la mise en œuvre de technologies de « Centres de contrôle » opérant en tant que « tour de contrôle » des flux énergétiques temps réels dans les réseaux de transport et de distribution. Ces centres de

contrôle sont distribués à différents niveaux des réseaux (nationaux, régionaux et urbains) et opérés par les gestionnaires de réseau dans le cadre de leurs fonctions d'opérateurs systèmes comme l'exprime la Figure I.9 [8].



Figure I.9 : L'optimisation globale des systèmes énergétiques [8].

Ces centres de contrôle interagissent en temps réel d'une part avec les capteurs, équipements de protection et de contrôle répartis dans les postes électriques et d'autre part, avec les clients offrant une flexibilité suffisante pour contribuer à l'équilibre des réseaux.

Alors qu'historiquement seules les centrales de production conventionnelles offraient ce type de services, la pénétration croissante d'énergies intermittentes nécessite l'interfaçage de nouvelles ressources de production, de stockage et de clients consommateurs prêts à mieux synchroniser leur demande en énergie, ce qui correspond à une thématique-clé des réseaux intelligents[8].

La migration des réseaux vers les réseaux intelligents nécessite donc une refonte significative de ces systèmes d'information temps réel avec de nouveaux enjeux liés à l'intégration de très grands volumes de données – ces données devront potentiellement être issues de chaque consommateur et de nouvelles technologies de visualisation en support à l'aide à la décision. Cela nécessite par ailleurs la mise en œuvre de nouvelles structures d'agrégation d'information en lien avec les services (responsabilité d'équilibre) requis au niveau de la gestion des marchés [8].

I.8-Courbe de charge

Le terme "courbe de charge" désigne l'évolution dans le temps de l'ensemble des

grandeurs électriques représentatives de la consommation d'une installation. Les grandeurs directement mesurées sont généralement le courant et la tension. D'autres grandeurs électriques comme les puissances actives ou réactives peuvent en être déduites.

La courbe de charge générale ou agrégée (« Aggregated load » en anglais) désigne la courbe de charge disponible au point d'entrée d'une installation électrique,. Elle est la somme des courbes de charge individuelles de chaque usage (chauffage électrique, réfrigérateur, éclairage) présent dans l'installation observée.

Une courbe de charge agrégée ou individuelle, porte de nombreuses informations sur la composition, les caractéristiques et l'évolution de l'installation électrique considérée [3].

I.8.1- Objectifs des méthodes de suivi des courbes de charge:

L'objectif général est d'extraire les diverses informations transmises par la consommation électrique d'une installation. Cet objectif peut être décliné en fonction des informations recherchées qui peuvent être plus ou moins précises et de différentes natures :

- identification de la présence ou de l'absence d'un usage, c'est-à-dire l'estimation de la probabilité de présence d'un usage donné,
- caractérisation d'un usage, c'est-à-dire l'estimation de grandeurs intrinsèques des appareils (puissance nominale par exemple) ou l'estimation du nombre de composantes d'un usage (nombre de radiateurs électriques dans une maison par exemple),
- décomposition ou désagrégation de la courbe de charge, c'est-à-dire l'estimation des courbes de charge individuelles à partir de la courbe de charge agrégée, permettant par exemple d'estimer la consommation individuelle de chaque usage,
- détection d'un défaut ou du comportement anormal d'un appareil, comme par exemple la surconsommation d'un réfrigérateur. Le point le plus couramment étudié est la décomposition de la courbe de charge générale (« Disaggregation Load » en anglais), car il permet de traiter la plupart des autres problèmes (estimation de la puissance nominale des appareils, détection de défauts) a posteriori en utilisant les courbes de charge individuelles estimées [3].

I.8.2- Motivations :

Les motifs du développement de méthodes de suivi de courbe de charge sont plusieurs et différents en fonction des intérêts du consommateur ou du fournisseur ou du producteur.

-Motivations pour le consommateur : Les bénéfices des méthodes de suivi de courbe de charge pour le consommateur portent essentiellement sur la maîtrise de sa consommation électrique. En effet il peut ainsi disposer, en plus du relevé de sa consommation totale, d'une estimation de la consommation individuelle de chaque usage. L'accès à des informations plus précises permettrait de mieux gérer la consommation en adaptant leur comportement afin d'économiser sur la dépense totale. De nombreuses études montrent que fournir ce type d'information aux consommateurs (facture détaillée, consommation électrique affichée en temps réel) permet de réduire leur consommation électrique. Selon certaines études, cette réduction pourrait atteindre 15% de la consommation totale [3].

Cette économie d'énergie peut naturellement être valorisée d'un point de vue écologique, mais également d'un point de vue économique, d'autant plus dans un contexte de hausse des prix de l'énergie.

Un autre aspect intéressant le consommateur est la surveillance systématique et à distance de son installation électrique, lui permettant d'être averti automatiquement d'une défaillance ou encore de la mise en route ou de l'arrêt inopiné d'un appareil à son domicile. On peut également imaginer des applications en matière de pilotage à distance de l'installation électrique.

-Motivation pour le producteur : Les informations détaillées obtenues sur la consommation des usages servent au producteur afin d'identifier le profil énergétique exact de chaque consommateur et de pouvoir ainsi prédire de façon plus fiable sa consommation. L'intérêt est de pouvoir prédire la consommation globale de tous les usagers d'affiner la compréhension des variations de la consommation en période de pointe. Ces informations sont utiles aux producteurs pour améliorer sa gestion des moyens de production en temps réel . De tels outils sont nécessaires au développement de réseaux décentralisés de nouvelle génération. Les méthodes de suivi de courbe de charge permettraient la mise en place de tels moyens.

- Motivation pour le fournisseur : Pour le fournisseur, l'intérêt de ces méthodes réside dans le fait de fournir à ses clients des services supplémentaires. Ces services peuvent être sous forme d'une facture détaillée usage par usage, ou encore sous forme d'audit énergétique alimenté par les informations obtenues par surveillance.

Dans le prolongement de ces services, l'identification du profil de l'utilisateur permettrait de lui proposer des moyens ciblés de maîtrise de l'énergie [3].

I.9- Généralités sur l'analyse de courbes de charge :

Le domaine du suivi de courbe de charge fait appel à quelques notions élémentaires d'électronique de puissance et de réseaux électriques. Dans ce paragraphe nous rappelons ces notions de bases ainsi que quelques hypothèses fondamentales pour les travaux qui suivent [3].

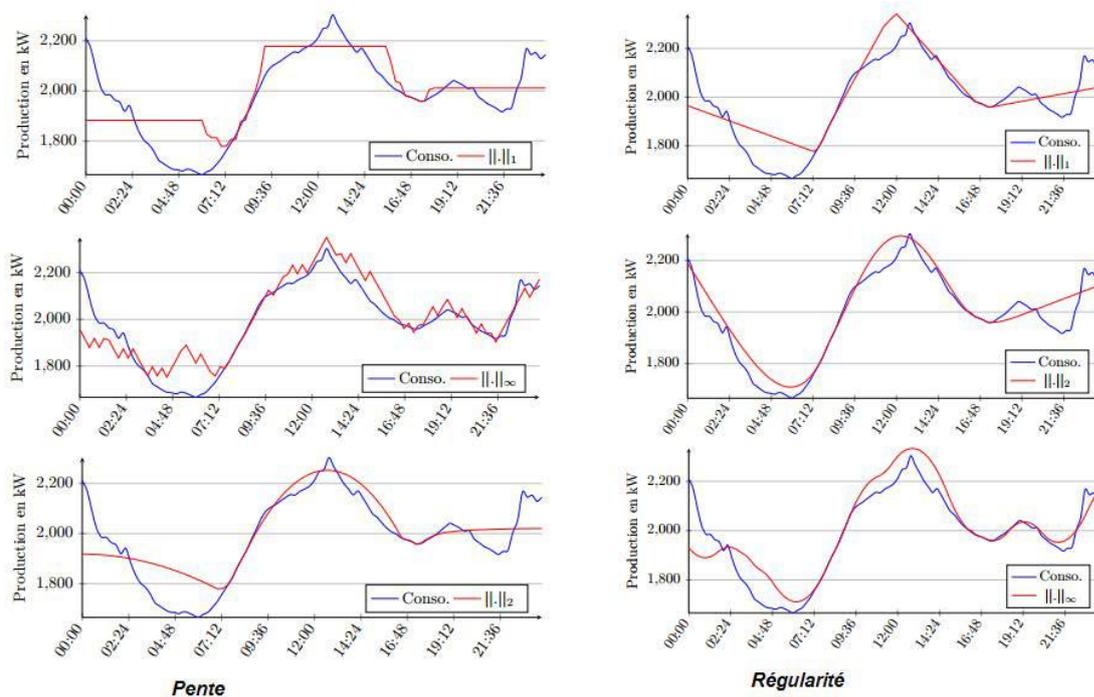


Figure : I.10- : Impact des normes de la pente et de la régularité sur la courbe de charge.

La figure : I.10 présente la courbe de charge standard et la courbe définie par une norme de cette dernière. Il semble que les fonctions-objectifs basées sur la régularité tendent bien à éviter les cassures brutales de pentes. Seulement ces optimisations sont sources de très fortes pentes qui durent dans le temps et collent beaucoup à la courbe de production ce qui n'est que peu satisfaisant en raison de leurs pics. Il suffit de comparer les optimisations sur la fin de journée pour voir que les fonctions-objectifs basées sur les régularités y sont beaucoup plus efficaces.

Au niveau du modèle, nous avons les données de F_k, F_{k+1} (représentant les données en

I-1 et i) et de l'intervalle de temps, l'objectif est de trouver $F_{k+2} = F(x)$ tel que la norme 2 de la régularité soit minimale, nous considérons F_k et F_{k+1} connus, $F_{k+2} - 2F_{k+1} + F_k = F(y)$:

I.9.1 - Courant et tension :

On considère la distribution de l'énergie électrique à une installation domestique. La source d'énergie est le réseau électrique de distribution. La charge est constituée de l'ensemble des appareils sur le réseau domestique. Ces appareils sont branchés en parallèle.

On fait l'hypothèse que le réseau électrique de distribution est un générateur parfait de tension alternative. C'est-à-dire que quelle que soit la charge, la tension au niveau du compteur électrique (et donc de tous les appareils puisqu'ils sont branchés en parallèle) est une sinusoïde d'amplitude et de fréquence constante. La fréquence fondamentale F_f est connue (respectivement $F_f = 50$ Hz en Europe, Asie et Afrique et $F_f = 60$ Hz aux États-Unis). L'amplitude efficace de cette sinusoïde

Est $V_e = 230$ V. On note donc :

$$I-1 : \quad v(t) = \sqrt{2}V_e \cos(2\pi F_f t + \theta_0)$$

Cette hypothèse est théoriquement fautive puisque un générateur parfait de tension ne peut exister.

En particulier, l'enclenchement d'appareils sur les réseaux génère de faibles perturbations de la tension théorique $v(t)$. Il existe d'ailleurs des travaux visant à utiliser ces perturbations pour caractériser les appareils branchés. Cependant ces perturbations sont suffisamment faibles pour être négligées dans le cadre de nos travaux. On supposera que seul le courant est caractéristique de la charge en présence, la tension étant fixée par le réseau de distribution.

Le courant appelé par la charge n'est pas nécessairement sinusoïdal. En effet de nombreux appareils domestiques comportent des charges non linéaires (tout appareil doté d'une alimentation à découpage par exemple). Le courant appelé est alors simplement périodique de fréquence fondamentale F_f puisque que la tension est elle-même périodique. La représentation en série de Fourier est adaptée à la modélisation du courant appelé $i(t)$, on notera : I-2 :

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \cos(2\pi F_f n t + \theta_n)$$

Où I_n et θ_n

Sont les coefficients de Fourier de $i(t)$. On suppose que la valeur moyenne du courant sur une période est nulle.

1.9.2- Puissance :

La puissance active est la puissance moyenne consommée sur une période I-3 :

$$P = \frac{1}{T} \int_T v(t) i(t) dt$$

$$\text{Où } T = \frac{1}{F_f}$$

Est la période des signaux de tension et de courant.

On remarque que seule la composante fondamentale du courant participe à la puissance active. En effet, en prenant en compte les expressions de $i(t)$ et $v(t)$ obtenues précédemment, on obtient : I-4 :

$$P = V_e I_1 \cos \varphi$$

$$\text{Avec } \varphi = \theta_0 - \theta_1$$

Dans le cas où la charge est purement résistive, le courant et la tension sont parfaitement en phase ($\cos(\varphi) = 1$). Alors la puissance instantanée $v(t)i(t)$ est positive à tout instant t , c'est-à-dire que l'énergie ne circule que de la source vers la charge. Cependant dans le cas général, la charge comporte des éléments inductifs ou capacitif ($\cos(\varphi) < 1$). Alors il existe des instants t où la puissance instantanée $v(t)i(t)$ est négative, c'est-à-dire que la charge renvoie temporairement de l'énergie vers la source. Pour caractériser ce phénomène on définit

la

Puissance réactive : I-5 :

$$Q = V_g I_1 \sin \varphi$$

On a remarqué que les harmoniques du courant ne participent pas en moyenne à la transmission de puissance de la source vers la charge. Cependant ces grandeurs dépendent de la nature de la charge et peuvent être utiles à sa caractérisation dans le cadre du suivi de courbe de charge. On définit les puissances actives P_n et réactives Q_n harmoniques du courant : I-6 :

$$P_n = V_g I_n \cos(\theta_0 - \theta_n)$$

$$Q_n = V_g I_n \sin(\theta_0 - \theta_n)$$

Pour tout $n > 1$.

I.9.3- Régime permanent et régime transitoire :

La relation entre la tension et le courant appelé par la charge est régie par une équation différentielle

Dont l'expression exacte dépend des composants de la charge et de leur organisation. La solution de cette équation différentielle est la somme de deux parties, une solution libre et une solution forcée. La première correspond à la réponse de la charge à une perturbation ponctuelle, la seconde à la réponse de la charge à une contrainte extérieure continue [3].

En électricité, ces deux parties de la solution correspondent respectivement au régime transitoire et au régime permanent. Lors d'une mise en fonctionnement, ou lors d'un changement de mode de fonctionnement, la charge est soumise à une perturbation instantanée ce qui génère un régime transitoire et la tension du réseau lui est appliquée ce qui génère le régime permanent. Le régime transitoire disparaît avec un temps caractéristique qui dépend de la charge (généralement quelques secondes). Le régime permanent dure jusqu'à ce que l'appareil soit à nouveau perturbé (changement de mode de fonctionnement ou arrêt de l'appareil) [3].

I.10.1- Signature électrique des usages :

L'un des enjeux scientifiques principaux du suivi de courbe de charge est l'identification de la signature électrique des usages. On entend ici par "signature" le

comportement électrique de l'usage tel qu'il peut être mesuré au niveau du compteur (ou d'un autre point d'intérêt considéré).

Dans l'état de l'art, les méthodes développées exploitent des signatures de natures très variables. On

se référera à où des inventaires exhaustifs de ces signatures sont réalisés [4].

I.10.2-Signature macroscopique :

On appelle "signature macroscopique" toute signature extraite à une fréquence d'échantillonnage faible par rapport à la fréquence fondamentale des signaux de courant et tension F_f . Cela correspond typiquement à des fréquences de l'ordre de 1 Hz. À de telles échelles, on observe essentiellement les changements globaux de la consommation dus à des changements d'états des appareils (événements ON/OFF, changement de mode de fonctionnement, etc.). On peut alors utiliser la valeur des sauts pour identifier les appareils, ou encore essayer d'identifier des cycles de fonctionnement répétés au cours du temps comme le cycle compression/détente d'un réfrigérateur (voir un exemple sur la fig. I.10). La puissance moyenne consommée ainsi que la durée de fonctionnement typique des usages sont les exemples les plus courants de signatures macroscopiques [3].

I.10.3-Signature microscopique :

On appelle "signature microscopique" toute signature extraite à une fréquence d'échantillonnage élevée par rapport à F_f . Cela peut correspondre à des fréquences allant de quelques kHz à 1 MHz. À ces échelles, des informations telles que la forme du régime transitoire lors des changements de consommation sont maintenant observables. De plus comme on dispose de suffisamment de points par cycle, il devient possible d'utiliser la forme des ondes de courant, d'admittance ou de puissance instantanée pour caractériser des appareils que ce soit dans le domaine temporel ou fréquentiel.

I.10.2- Classification générale des usages électriques :

Le groupe de travail du M.I.T propose une classification des usages électriques en fonction du profil de la courbe de charge individuelle de chacun des appareils. Celle-ci permet de rendre compte de la haute variabilité que peut présenter l'allure des courbes de charge

individuelles de chaque usage. Cette classification est la suivante :

1. Les usages à consommation permanente : cette catégorie regroupe les usages consommant une puissance constante, 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7. Une alarme incendie fait typiquement partie de cette catégorie.
2. Les usages ON/OFF : cette catégorie est constituée d'appareils possédant deux états seulement. Un état OFF où ils ne consomment pas, un état ON où ils consomment une puissance approximativement constante. De nombreux appareils courant dans le secteur résidentiel appartiennent à cette catégorie (bouilloire, ampoule électrique, grille pain).
3. Les usages à nombre d'états fini : cette catégorie inclut les usages passant par plusieurs états distincts où ils consomment une puissance constante. Typiquement, une machine à laver ou un sèche-linge font partie de cette catégorie [3].

I.10.3.- Les usages à nombre d'états infini :

Cette catégorie inclut les usages dont la puissance consommée peut varier continûment sur une certaine plage de valeur, en général en fonction d'un réglage utilisateur. Cela inclut, par exemple, les aspirateurs à puissance variable.

Il est important de noter que cette classification est faite du point de vue de la consommation électrique de l'appareil et non des modes de fonctionnement qu'ils offrent à l'utilisateur, même si ces deux points de vue coïncident éventuellement. Par exemple, un réfrigérateur, allumé en permanence, semble, du point de vue de l'utilisateur appartenir à la première catégorie. Cependant fonctionnant selon une alternance de phase de compression (ou une puissance constante est appelée de phase de détente (ou aucune puissance n'est nécessaire) du fluide réfrigérant, cet usage appartient à la seconde catégorie.

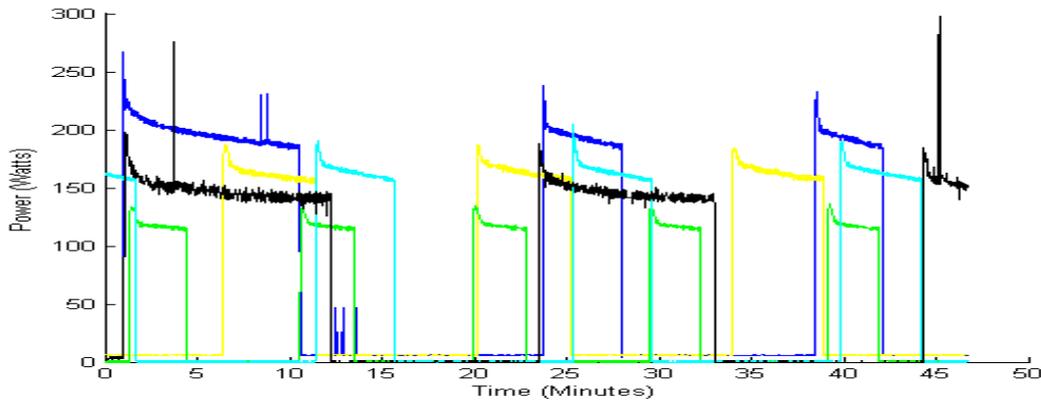


Figure I.11: Exemple de courbe de charge décomposée à échelle macroscopique tirée de la base de données REDD [3].

Chaque couleur de courbe correspond à la courbe de charge individuelle d'un réfrigérateur. Figure I.11.

Les méthodes développées jusqu'à présent se concentrent sur l'étude des usages appartenant à la deuxième et à la troisième catégorie. En effet les usages de la première catégorie ne se manifestent au niveau de la courbe de charge que par un niveau de consommation constant et permanent.

À moins de disposer d'informations a priori, ces appareils sont indétectables. Tout au plus, on peut déterminer leur absence si la courbe de charge présente des plages de consommation nulle. Quant aux usages de la quatrième catégorie, leur comportement complexe et généralement non reproductible, rend leur détection/caractérisation extrêmement difficile, si bien que leur cas est rarement traité dans la littérature scientifique.

I.10.4-Identification de changements des puissances active et réactive

La méthode développée par Hart analyse conjointement deux grandeurs, la puissance active et la puissance réactive, à une fréquence d'échantillonnage de 1 Hz.

Sa méthode consiste en cinq étapes :

1. un algorithme type "détection de contours" extrait les changements de régime à partir de la puissance active,
2. un algorithme de classification non-supervisée (« clustering ») regroupe ces changements de régime dans un espace à deux dimensions, la puissance active P et la puissance réactive Q ,

3. les groupes symétriques par rapport à l'origine de l'espace $P=Q$ sont associés, ils correspondent aux événements ON et OFF d'un même usage,
 4. cette étape, dite de résolution d'anomalie, permet d'associer les groupes restants, soit en les fusionnant avec des groupes déjà associés, soit en étant associés entre eux.
 5. l'étape finale consiste à donner un nom à chaque association de groupe d'événements en utilisant des données d'apprentissage
-].

I.10.5-Limites des approches macroscopiques :

Au cours des derniers paragraphes, un état de l'art des méthodes de suivi de courbes de charge utilisant les signatures macroscopiques des usages a été présenté. Il est important de noter qu'il existe des limites inhérentes à ce type de méthodes. En effet, puisque les courbes de charge utilisées sont collectées à de faibles fréquences, le risque que deux usages changent d'état simultanément (au même instant d'échantillonnage) est important. De plus les grandeurs accessibles à ces fréquences sont essentiellement les puissances active et réactive du fondamental ainsi qu'éventuellement des puissances d'ordre supérieur. À ces fréquences, ces grandeurs s'avèrent parfois insuffisantes pour deux usages différents [3].

I.10.6 -Analyse microscopique :

Pour surmonter les difficultés inhérentes à l'analyse macroscopique, de nombreux auteurs se sont penchés sur l'utilisation de caractéristiques microscopiques souvent en complément de l'analyse Macroscopique. L'analyse microscopique des signaux permet de récolter des informations relatives au régime transitoire des usages observés. Ces informations sont particulièrement intéressantes du point de vue de l'analyse de la courbe de charge car les caractéristiques du régime transitoire sont directement reliées à la tâche physique exécutée par la charge. Ainsi le régime transitoire d'une lampe à filament et celui d'un réfrigérateur sont extrêmement différents car la tâche consistant à chauffer le filament est fondamentalement différente de la mise en route du compresseur. La figure I.12, représente le régime transitoire de 5 modèles différents de réfrigérateur. On peut constater qu'il existe indéniablement des caractéristiques communes à ces signaux, même si l'amplitude ou la forme exacte du signal varient d'un réfrigérateur à l'autre. L'intérêt de l'analyse microscopique sera donc de pouvoir étiqueter chaque changement d'état identifié sur la courbe de charge agrégée avec le type

d'appareil [3].

L'analyse du régime transitoire dans son intégralité est une tâche complexe. En effet, contrairement au régime permanent, le régime transitoire ne se réduit pas à quelques caractéristiques simples (changement dans le plan puissance active/réactive). Les méthodes proposées dans la littérature pour résoudre ce point différent beaucoup. Certains auteurs proposent de réduire le régime transitoire à une ou deux caractéristiques élémentaires, d'autres proposent d'apprendre des portions entières de

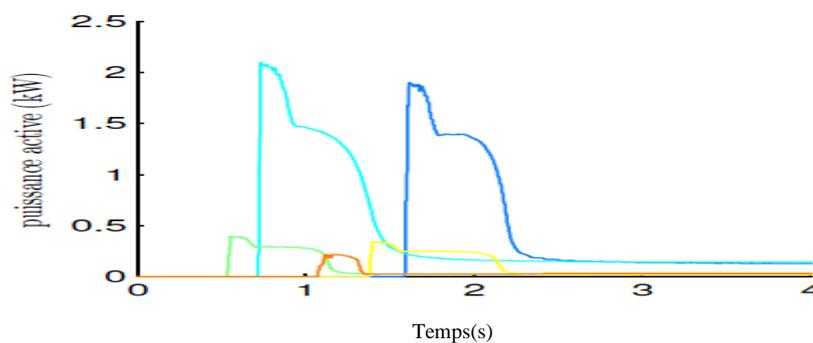


Figure I.12: Signature microscopique : évolution de la puissance active en fonction du temps en régime transitoire. Chaque couleur de courbe correspond à un réfrigérateur différent transitoire.

I.10.7-Utilisation de caractéristiques élémentaires :

Dans, l'auteur propose d'utiliser simplement la longueur du régime transitoire combinée à des caractéristiques macroscopiques pour caractériser le régime transitoire.

Alternativement, dans, les auteurs proposent de caractériser le régime transitoire par l'énergie consommée lors de la mise sous tension d'un usage (« turn-on transient energy ») : I-7 :

$$W_{\tau} = \int_{t_a}^{t_a + \delta\tau} v(t)i(t) dt$$

Où chaque instant de départ t_s est testé et la longueur du régime transitoire τ est calculée durant une phase d'apprentissage. L'énergie W_{τ} , la puissance active P et la puissance réactive Q en régime permanent sont ensuite utilisées pour entraîner un réseau de neurones à la reconnaissance d'appareils.

I.10.8-Régression de la forme du transitoire : Plutôt que de se limiter à l'extraction de quelques caractéristiques du régime transitoire, certains auteurs ont cherché à modéliser

entièrement la forme des variations de la puissance active en régime transitoire.

Dans, les auteurs proposent de modéliser la puissance active en régime transitoire par un changement abrupt « edge », une pente douce « slope » suivi du régime permanent constant.

Ce modèle de régression, quoique très simple, permet de reconnaître certaines classes d'appareils. Dans, cette modélisation repose sur les sections du signal transitoire qui présentent des variations significatives de la puissance active, appelées « v-

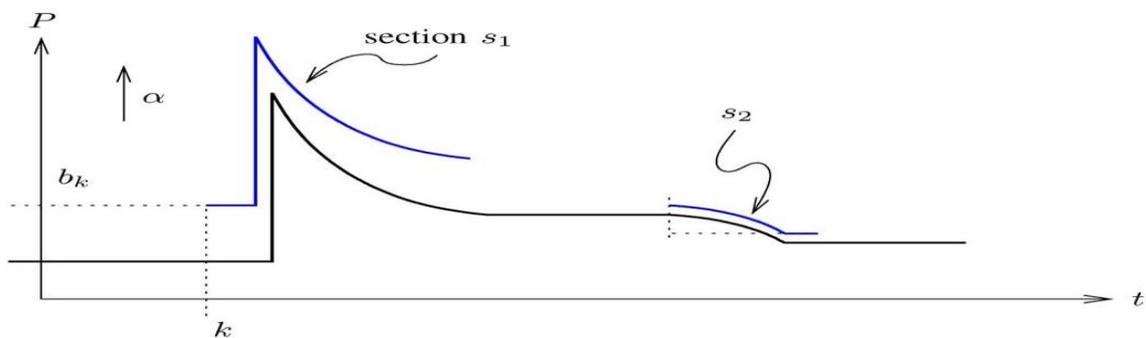


Figure I.13: Modélisation du régime transitoire par la méthode des « v-sections » [3].

La puissance active P est tracée en fonction du temps t . Deux « v-sections » sont notées s_1 et s_2 . Les paramètres k et b_k représentent respectivement la position et l'amplitude initiale des « v-sections ». α est le paramètre global de gain d'amplitude [3].

Sections ». Ces « v-sections » sont dans un premier temps apprises pour chaque classe de transitoire sur une base d'exemples. Puis, durant la phase de reconnaissance, l'algorithme cherche à identifier des séquences de « v-sections » dans le signal observé. Pour cela, la position k et les amplitudes initiales b_k de chaque « v-section » s_k sont estimées conjointement à un paramètre de gain d'amplitude α qui s'applique à toutes les « v-sections » simultanément. Cette estimation est réalisée par un algorithme des moindres carrés. La figure I.13 schématise le fonctionnement de cette méthode. Cette approche a été appliquée avec succès aussi bien à la surveillance de bâtiments industriels et commerciaux qu'à l'identification d'usages électriques dans une automobile. Notons enfin l'approche de qui consiste à appliquer la modélisation précédente en « v-sections » au signal de tension au lieu de la puissance active. En effet, l'enveloppe du signal de tension présente d'infimes variations

($\pm 0.01V$) similaires aux variations du courant. L'intérêt de la méthode est de ne nécessiter qu'une seule mesure (tension) au lieu de deux (courant et tension) [3].

I.10.9-Utilisation du bruit très haut fréquence généré par les usages

Une solution originale au problème de la caractérisation des usages électriques a été apportée dans. Elle consiste à exploiter la signature très haute fréquence générée par la mise sous tension ou la mise hors tension d'usages de type ON/OFF sur la tension mesurée.

I.10.11- Limites des approches microscopiques :

Nous avons relevé dans les derniers paragraphes différents méthodes d'analyse microscopique. Ces méthodes permettent de lever certaines ambiguïtés de l'analyse macroscopique en permettant l'accès à de nombreuses caractéristiques potentielles liées au régime transitoire. Cependant ces méthodes nécessitent des fréquences d'échantillonnage élevées ce qui implique une acquisition plus coûteuse des signaux et surtout le stockage d'un grand nombre de données [3].

I.10.12- Base de données de courbes de charges :

L'intérêt accru de la communauté scientifique à la thématique des courbes de charge a donné lieu à la création de plusieurs bases de données scientifiques. Ces bases de données sont constituées de relevés de courbes de charge globales ainsi que des courbes de charge individuelles étiquetées qui constituent ainsi la vérité terrain.

I.13- Conclusions :

Nous avons dans ce chapitre expose une vision sur le réseau électrique et architecture et schémas d'exploitation, et les poste sources HTB/HTA et les lignes HTA, le Objectifs premier d'un réseau est pouvoir alimenter la demande des consommateurs avec l'énergie .peut-être Le réseau électrique doit permettre de livrer aux utilisateurs un bien adapté à leurs besoins, caractérisé par :

-une puissance disponible, fonction des besoins quantitatifs du client ;

-une tension fixée, fonction de cette puissance et du type de clientèle ;...

Etudier La problématique et les enjeux de la décomposition de courbe de charge, et les cycles de fonctionnement globaux des usages, et les approches microscopiques qui utilisent les spécificités du régime transitoire pour identifier des classes D'usages avec le développement de méthodes d'analyse microscopiques pour l'identification des usages.