Table des matières

Résumé ii

Remerciements iv

Table des matières v

Liste des tableaux ix

Liste des figures x

Liste d'abréviations et acronymes xii

Chapitre 1 - Introduction 1

1.1 Problématique. 4

1.2 Objectifs 7

1.2.1 Objectif général 7

1.2.2 Objectifs spécifiques 7

1.3 Méthodologie 7

1.4 Organisation du Mémoire 9

Chapitre 2 - Gestion de la demande d'énergie dans les réseaux électriques intelligents 10

2.1 Réseaux électriques intelligents 10

2.2 Gestion de la demande locale et méthodes de gestion de charges 11

2.3 Systèmes de gestion 15

2.4 Surveillance des charges 23

2.4.1 Méthodes de surveillance non-intrusive 24

2.4.2 Systèmes de surveillance commerciaux 26

2.5 Conclusion 28

Chapitre 3 - Modélisation de charges électriques résidentielles 30

3.1 Définition et types de charges électriques 30

3.2 Modélisation des charges 31

3.3 Modèles statiques de la charge 34

3.3.1 Modèle polynomial ou modèle ZIP 35

3.3.2 Modèle exponentiel 35

3.3.3 Dépendance de la fréquence : 36

3.4 Modèles dynamiques de la charge 37

3.4.1 Modèle dynamique exponentiel 37

3.4.2 Modèle de moteur à induction 38

3.5 Modèle composé 39

3.6 Modèles de régression 40

3.7 Modèles multi-physiques 41

3.8 Algorithmes d'estimation des paramètres 43

3.9 Conclusion 44

Chapitre 4 - Modélisation de charges résidentielles de type thermostatique 46

4.1 Modèle du chauffe-eau 47

4.1.1 Modèle mathématique 47

4.1.2 Modèle REM thermique du chauffe-eau 52

4.2 Structure de commande pour le chauffe-eau 53

4.3 Conclusion 55

Chapitre 5 - Approximation de Taylor du modèle polynomial: application aux charges résidentielles 57

5.1 Analyse des données 58

5.1.1 Analyses de linéarité 59

5.1.2 Analyses de corrélation 60

5.2 Proposition du modèle polynomial par approximation de séries de Taylor .. 60

5.2.1 Équivalence entre les paramètres du modèle par approximation de séries de Taylor et ceux du modèle ZIP 62

5.3 Estimation des paramètres 64

5.4 Comparaison des estimations en utilisant les modèles ZIP et celui par approximation de séries de Taylor 66

5.5 Validation par simulation 67

5.5.1 Simulations sous variations imposées de la tension 67

5.5.2 Simulations sur des conditions réelles de variation de la tension 72

5.6 Validation expérimentale 76

5.6.1 Détermination expérimentale des paramètres de charges 76

5.6.2 Estimation hors-ligne pour les charges R, RC, RL et RLC 78

5.6.3 Analyse de l'erreur quadratique moyenne par rapport aux variations de la tension 83

5.6.4 Estimation en ligne de la puissance active et réactive avec le modèle par approximation de séries de Taylor 84

5.7 Conclusion 88

Chapitre 6 - Conclusion 90

6.1 Discussion et perspectives 92

Liste des tableaux

Tableau 3-1 Éléments de base de la REM [109]. 42

Tableau 5-1 Équivalence entre les paramètres du modèle ZIP et du modèle par approximation de séries de Taylor 64

Tableau 5-2 Résultats d'estimation des paramètres de P et Q avec modèles ZIP et Taylor sous des variations réelles de la tension nominale, donnés des charges pris dans [116], [117]. 75

Tableau 5-3 Valeurs nominales des composants des charges. 76

Tableau 5-4 Détermination expérimentale des paramètres du modèle ZIP pour les charges utilisées. 77

Tableau 5-5 Détermination des paramètres du modèle par approximation de séries de Taylor. 77

Tableau 5-6 Comparaison des paramètres estimés en utilisant les modèles de ZIP et Taylor avec l'algorithme LMS pour la puissance active. 79

Tableau 5-7 Comparaison des paramètres estimés en utilisant les modèles de ZIP et Taylor avec l'algorithme RLS pour la puissance réactive. 80

Tableau 5-8 Comparaison des paramètres estimés en utilisant les modèles de ZIP et Taylor avec l'algorithme LMS. 82

Tableau 5-9 Comparaison des paramètres estimés en utilisant les modèles de ZIP et Taylor avec l'algorithme RLS. 82

Tableau 5-10 Estimation en ligne des paramètres de la puissance active pour le charges d'étude. 86

Tableau 5-11 Estimation en ligne des paramètres de la puissance réactive pour le charges d'étude. 88

Liste des figures

Figure 1-1 Schéma de la problématique du projet de recherche 6

Figure 2-1 Classification des méthodes de gestion des charges 14

Figure 2-2 Schéma de l'architecture et interface du système proposé dans [40] 16

Figure 2-3 Interface de visualisation du système «ALIS» [41] 17

Figure 2-4 Architecture du système «WattDepot» [47] 18

Figure 2-5 Architecture des principaux composants de «NOBEL» [48] 19

Figure 2-6 Structure du système «KNIVES» [50] 20

Figure 2-7 Système «ViridiScope» [51] 21

Figure 2-8 Interface de visualisation du system DEHEMS [52] 22

Figure 2-9 Structure du système «PERSON» [53] 23

Figure 2-10 Techniques de surveillance de la charge [57]. 24

Figure 2-11 Structure de système NIALM 25

Figure 3-1 Triangle de puissances 31

Figure 3-2 Classification des approches de modélisation. 33

Figure 3-3 Classification des modèles de charge selon la dynamique [57]. 34

Figure 3-4 Schéma équivalent du modèle de moteur à induction 38

Figure 3-5 Circuit équivalent du modèle composé [97] 40

Figure 3-6 Schéma d'identification des paramètres 44

Figure 4-1Modèle du chauffe-eau en schéma-blocs 48

Figure 4-2 Schéma sous Simulink du chauffe-eau 49

Figure 4-3 Profil typique de consommation d'eau chaude 50

Figure 4-4 Température de l'eau à l'entrée du chauffe-eau, données prises de [115]. 51

Figure 4-5 Puissance active consommée et température de l'eau 52

Figure 4-6 Modèle REM du chauffe-eau 53

Figure 4-7 Schéma-bloc du contrôleur PI. 53

Figure 4-8 REM du chauffe-eau avec la structure de contrôle. 54

Figure 4-9 Puissance active moyenne consommée par le chauffe-eau et température de l'eau. 55

Figure 5-1 Schéma des étapes du travail de recherche 57

Figure 5-2 Représentation du système. 59

Figure 5-3 Courbes PV et QV. 68

Figure 5-4 Schéma sous Simulink pour la création des données à partir des informations dans [116] 69

Figure 5-5 Estimation de puissances active et réactive 70

Figure 5-6 Estimation des paramètres pour la puissance active (a) et la puissance réactive (b) par le modèle ZIP et par approximation de séries de Taylor 71

Figure 5-7 Courbes P-V et Q-V pour le réfrigérateur dans [116]. 73

Figure 5-8 (a) Estimation de puissances active et réactive. (b) Zoom sur figure 5-8 (a) 74

Figure 5-9 Estimation hors ligne de la puissance active pour charge RLC. 79

Figure 5-10 Estimation hors ligne de la puissance réactive pour charge RLC. 81

Figure 5-11 Erreur quadratique moyenne en fonction de la variation de la plage de tension. 83

Figure 5-12 Modèle sous Simulink pour estimation en ligne. 85

Figure 5-13 Estimation de puissance active et puissance réactive en ligne. 86

Figure 5-14 Estimation des paramètres en ligne pour la puissance réactive 87

Rapport-Gratuit.com

Liste d'abréviations et acronymes

ALIS	*«Adaptative Living Interface System»*
FPGA	*«Field-Programmable Gate Array»*
GDL	*Gestion de la demande locale d'énergie*
IALM	*Intrusive appliance load monitoring*
IEEE	*Institut des ingénieurs électriciens et électroniciens (Institute of Electrical and Electronics Engineers)*
KWH	Kilowattheure
LMS	*«Least Mean Square»*
NIALM	*«Non-intrusive appliance load monitoring»*
NIST	*«National Institute of standards and Technology»*
NOBEL	*«Neighborhood Oriented Brokerage Electricity and monitoring system»*
P	*Puissance active*
Q	*Puissance réactive*
PERSON	*«Pervasive Service-Oriented Networks»*
REI	*Réseau électrique intelligente («Smart Grid»)*
REM	*Représentation énergétique macroscopique («Energetic Macroscopic Representation»)*

R	*Résistif*
RC	*Résistif-Capacitif*
RL	*Résistif-Inductif*
RLC	*Résistif-Capacitif-Inductif*
RLS	*Algorithme des moindres carres récursifs «Recursive Least Square»*
TCP/IP	*«Transmission Control Protocol/Internet Protocol»*
UE	*Union européenne*

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Chapitre 1 - Introduction

Le système d'énergie électrique conventionnel comprend trois grands segments : les producteurs, le réseau et les consommateurs. Les producteurs sont normalement des entreprises qui possèdent des moyens de transformation d'une source d'énergie primaire en énergie électrique. Le réseau électrique, incluant la génération d'électricité, comporte quatre entités reliées entre elles [1]:

- Le système de génération, situé dans le plus haut niveau hiérarchique du réseau, rend possible la production d'électricité à partir de sources d'énergie primaires telles que : l'énergie fossile (charbon, gaz naturel ou pétrole), l'énergie nucléaire, ou les énergies renouvelables (hydroélectrique, solaire, éolienne et biomasse).

- Le réseau de transport qui achemine l'électricité à haute tension des centrales de production aux abords des grands centres de consommation.

- Le réseau de répartition qui a pour rôle de distribuer cette énergie aux différents centres de consommation. Cette répartition est faite selon des normes afin d'assurer une meilleure sécurité d'alimentation pour l'ensemble des consommateurs.

- Le réseau de distribution, à moyenne et à basse tension, qui permet l'approvisionnement direct aux consommateurs à partir du réseau de répartition.

L'infrastructure de distribution de l'énergie électrique conventionnelle est basée sur une structure hiérarchique dans laquelle la production est accomplie de façon unidirectionnelle

vers les clients selon leur demande. Généralement, les centres de production sont éloignés des consommateurs et l'énergie électrique doit être transportée sur de grandes distances. Cela demande une infrastructure complexe et coûteuse [2].

D'après l'agence internationale de l'énergie, la demande d'électricité a augmenté d'environ 23% au Canada et de 25% au monde entre 1972 et 2012 [3]. En 2013, la demande d'électricité au Canada a augmenté de 1.6 % par rapport à l'année précédente avec un total de 510.99 TWh. Cette demande d'électricité est répartie, pour la même année, par secteur de la façon suivante : 29.5 % résidentiel, 26.47 % commercial, 38.8% industriel, 1.8% agricole et 0.2 % transports [4].

Les 79% de la production d'électricité totale au Canada proviennent de sources avec un faible taux d'émission de gaz à effet de serre. Ceci est grâce au potentiel hydraulique et des politiques qui encouragent la production d'électricité avec des technologies vertes. En 2012, la production à partir des sources solaire et éolienne a connu des augmentations de 3% et 9% respectivement [5].

En effet, le besoin de suivre cette croissance de la consommation d'électricité, de moderniser les réseaux électriques, d'atteindre les objectif environnementaux et économiques du pays et de subvenir aux besoins des clients a permis l'émergence à la fin du *XX*^{e} siècle d'un nouveau concept de réseau électrique appelé: réseau électrique intelligent (REI) «Smart Grid» [6]. Ce nouveau concept est appuyé sur le développement des technologies de l'information, de communication et de l'électronique. Les réseaux intelligents visent, principalement, l'augmentation de la fiabilité, la sécurité et la disponibilité du service et une participation plus active et harmonieuse des clients dans la consommation et éventuellement dans la production d'électricité avec l'optimisation de la

gestion de l'énergie électrique [7], [8]. La communication bidirectionnelle supportée par ces réseaux permettrait une interaction entre les consommateurs et les fournisseurs afin de produire une énergie électrique avec un faible impact environnemental et un haut niveau d'efficacité énergétique [9].

La gestion, la surveillance et le contrôle, aux différents niveaux du réseau, est indispensable dans les REI, tout en cherchant l'optimisation dans l'utilisation des ressources disponibles. La gestion de la demande locale (GDL) a un rôle important dans le développement et l'amélioration de la sécurité et la fiabilité du réseau intelligent. En plus, elle offre plusieurs avantages pour les différentes parties impliquées, à savoir le gouvernement, les fournisseurs et les consommateurs [10]. Pour le gouvernement, la GDL est un moyen d'atteindre des objectifs environnementaux et énergétiques. Pour les fournisseurs, c'est l'innovation et l'amélioration de l'infrastructure, de l'efficacité énergétique, de la gestion et l'efficacité de leurs réseaux en minimisant les pertes, et en garantissant la stabilité de la tension et la réduction de la congestion des réseaux de transport et de distribution. Pour les consommateurs, la GDL se traduit par une amélioration dans la gestion de la consommation d'énergie et par une participation plus active incluant la production locale d'électricité avec une conscience environnementale.

Cependant, en ce qui concerne la participation active des clients, il est nécessaire de mieux gérer la consommation locale via une « gestion locale intelligente de la demande d'énergie». Cette gestion doit être basée sur des modèles de consommation et de charges qui devront permettre de connaître et de prévoir la consommation à court et à moyen terme. Une telle gestion doit permettre de modifier, au besoin, les profils de

consommation de manière à répondre dynamiquement aux besoins du producteur d'électricité tout en respectant le confort du client [11].

1.1 Problématique.

Une caractéristique distinctive du REI est la bidirectionnalité de l'échange de l'information et de l'énergie électrique entre les fournisseurs et les consommateurs. Ceci permet au client de mieux gérer sa consommation totale. Plusieurs études démontrent qu'une gestion adéquate de la demande d'énergie peut réduire d'environ 15% la consommation totale d'électricité au niveau résidentiel [11]-[13]. Ainsi, la gestion de la demande d'énergie est une des composantes majeures dans le REI. Cette gestion se base principalement sur la surveillance des charges afin de changer le profil de consommation de puissance pendant les périodes de pointe de consommation. L'impact direct d'une telle gestion est une réduction du coût opérationnel du réseau et dans la plupart des cas une réduction de la facture d'électricité au profit des clients[15]. Donc, une connaissance détaillée de la consommation de puissance, grâce à la modélisation des charges au niveau local, peut faciliter notablement l'introduction des techniques de gestion de la demande et ainsi améliorer l'opération du réseau électrique. Les informations de consommation détaillée permettront, d'une part, aux clients de prendre des décisions de contrôle et de gestion de l'utilisation de l'électricité, et d'autre part aux utilités électriques de prévoir la consommation globale, de planifier la production et d'élaborer des programmes pour optimiser l'opération du réseau. Des systèmes de gestion automatique de la consommation pourront être mis en place et basés sur une connaissance détaillée de l'utilisation domestique de l'électricité. La mise en place des méthodes, des programmes et des

systèmes de gestion de la demande locale bénéficiera les générations futures et sera une nécessité réelle en vue de l'augmentation prévue de consommation d'énergie [16].

À la recherche d'une gestion locale de la demande appropriée, surgissent les problèmes de la surveillance de la consommation par usage et de la modélisation des charges électriques. Pour ce qui est la surveillance, les techniques d'identification des charges proposées jusqu'à date peuvent être divisées en deux catégories : (i) les techniques intrusives (Intrusive Appliance Load Monitoring –IALM) basées sur l'installation de capteurs sur chaque charge dans la maison et (ii) les techniques non-intrusives (Non Intrusive Appliance Load Monitoring - NIALM) basées sur la mesure globale des données physiques au niveau du panneau de distribution d'une installation permettant l'identification des différentes composantes de la charge. Cette deuxième catégorie réduit les coûts et le matériel requis mais requiert des algorithmes d'identification plus élaborés, qui doivent être capables d'identifier les caractéristiques des charges à l'intérieur d'une résidence.

De façon globale, la technique de surveillance de charges non-intrusive peut être illustrée par la Figure 1-1Figure 1-1. Dans cette approche, la mesure de la puissance agrégée est d'abord passée par un bloc de prétraitement, et ensuite par un bloc qui contient des algorithmes d'identification qui permettent de désagréger les cycles d'opération des charges. Dans cette structure, les algorithmes d'identification ont besoin d'une deuxième entrée qui contient les modèles des charges résidentielles.

Pour l'étape de modélisation des charges électriques résidentielles, les modèles de charge doivent permettre de représenter avec une bonne précision les caractéristiques statiques et/ou dynamiques des charges pour bien représenter leur opération afin que

l'algorithme d'identification puisse désagréger correctement chacune des charges à partir de la courbe de puissance agrégée.

Un bon modèle permettra aussi d'améliorer le processus de prévision de la consommation et conséquemment d'améliorer la performance des méthodes de gestion d'énergie et de puissance. Dans ce contexte, plusieurs types de modèles ont été proposés dans la littérature, certains de type statique et d'autres de type dynamique. Ainsi ce projet de recherche se focalisera sur l'étape de modélisation statique des charges (en rouge dans le schéma de la Figure 1-1 dans le contexte d'identification des charges pour la gestion de la demande d'énergie.

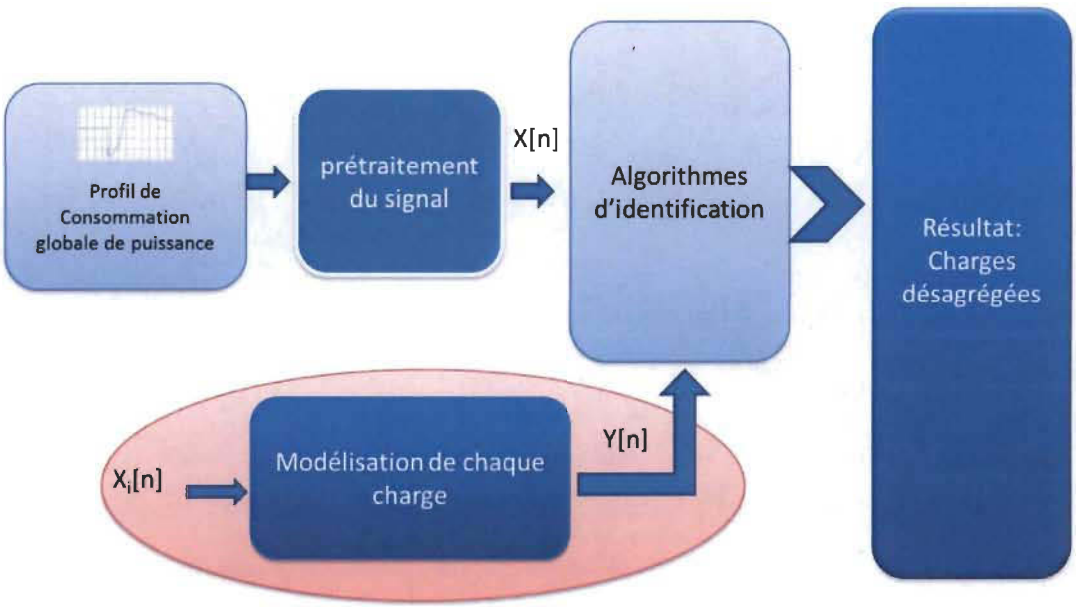


Figure 1-1 Schéma de la problématique du projet de recherche

1.2 Objectifs

1.2.1 *Objectif général*

L'objectif principal de ce projet est de faire une étude approfondie sur la modélisation électrique de charges typiques résidentielles dans un contexte de gestion locale de la demande d'énergie électrique.

1.2.2 *Objectifs spécifiques*

Les objectifs spécifiques sont résumés comme suit :

- Faire une revue bibliographique concernant la gestion locale de la demande d'énergie électrique comme point de départ du projet;
- Faire une revue bibliographique des méthodes et modèles existants pour l'identification des charges, et une analyse des avantages et des inconvénients de chaque méthode et modèle;
- Adapter/proposer des modèles pour les charges électriques résidentielles typiques Canadiennes;
- Proposer des modèles d'identification des paramètres des charges dans un contexte de gestion locale non-intrusive;
- Valider expérimentalement les propositions.

1.3 Méthodologie

La problématique et l'objectif général étant déterminés, la méthodologie utilisée dans ce projet est divisée en quatre principales étapes.

Étape 1 : Revue bibliographique

Tout d'abord, afin de mieux comprendre le sujet et de le mettre dans son contexte ainsi que de relever les lacunes dans les travaux qui ont précédé, une recherche bibliographique approfondie a été réalisée. Cette revue porte sur les deux principaux thèmes de ce travail. Premièrement, l'état d'avancement de la gestion locale de la demande d'énergie électrique et les différents systèmes implémentés au niveau éducatif (universitaire) et commercial.

Deuxièmement, l'identification des différentes méthodes qui ont été utilisées pour la modélisation des charges résidentielles.

Étape 2 : Analyse des charges et construction de base de données

Une analyse de l'influence des types des charges résidentielles sur les résultats des méthodes de gestion de la demande a été réalisée. Cette analyse a permis de cibler certaines charges ayant plus d'impact dans la consommation globale et dans la gestion locale de la demande.

Dans cette étape, une base de données a été construite à partir du système de mesure développé par le groupe de recherche [17].

Étape 3 : Étude des modèles statiques et proposition d'une nouvelle approche

Dans cette troisième étape, les techniques de modélisation statique ont été étudiées et appliquées à différents types de charges. Une nouvelle approche de modélisation a été proposée, cette approche permet d'améliorer l'identification de paramètres des charges avec des faibles variations de la tension d'alimentation.

Rapport-Gratuit.com

Étape 4 : Validation Expérimentale

Finalement, une validation expérimentale de l'approche de modélisation proposée a été réalisée avec des charges résidentielles.

1.4 Organisation du Mémoire

La suite de ce mémoire est organisée en 6 chapitres. Le deuxième chapitre, intitulé «Gestion de la demande d'énergie dans les Réseaux électriques intelligents», comprend la recherche bibliographique sur les systèmes de gestion de la demande d'énergie. Le troisième chapitre, intitulé «Modélisation des charges électriques résidentielles», présente une étude approfondie sur la modélisation des charges électriques résidentielles, incluant une analyse des avantages et des inconvénients de chaque modèle. Le quatrième chapitre, intitulé «Modélisation des charges résidentielles de type thermostatique », présente la modélisation d'un système de chauffage d'eau résidentiel en utilisant la représentation énergétique macroscopique (REM). Le cinquième chapitre, intitulé «Approximation de Taylor du modèle polynomial : application aux charges résidentielles», présente la proposition d'une formulation du modèle de charges polynomial par une approximation de séries de Taylor, ainsi que les résultats de simulation et expérimentaux. Le sixième chapitre présente la conclusion générale et les perspectives pour les travaux futurs.

Chapitre 2 - Gestion de la demande d'énergie dans les réseaux électriques intelligents

Ce chapitre présente la théorie de base pour le développement de ce projet : le réseau électrique intelligent, la gestion de demande locale d'énergie et la gestion de charges. Une revue bibliographique des méthodes de gestion et un résumé des systèmes de gestion proposés dans le marché actuel et dans la littérature scientifique sont exposés.

2.1 Réseaux électriques intelligents

Selon l'institut national de standard et technologie des États-Unis : NIST [18], le modèle du réseau intelligent est composé de sept parties spécifiques : le client, les marchés, les fournisseurs des services, les opérations, la génération, la transmission et la distribution. Les systèmes de gestion de la demande d'énergie pour la génération, transmission et distribution d'électricité ont été massivement étudiés pendant des décennies. Plusieurs modèles et protocoles ont été proposés et implantés dans les systèmes pratiques [19]. Cependant, des recherches concernant ces systèmes au niveau du client ont commencé récemment et visent le développement de nouvelles technologies avec un faible impact environnemental, une mise en œuvre simple et une performance élevée [20].

Une des finalités du Réseau Électrique Intelligent (REI) consiste à contrôler et optimiser tous les éléments interconnectés au réseau afin de garantir le bon déroulement de la génération, transmission et distribution de l'électricité [21] et par conséquent d'ajuster dynamiquement la demande d'énergie à l'offre tout en respectant le confort du client. À ce

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

stade, le client devient non seulement un consommateur mais aussi un fournisseur d'électricité. Le REI peut intégrer des énergies renouvelables telles que : l'énergie solaire, l'énergie éolienne, la biomasse et l'hydrogène comme vecteur énergétique pour le stockage d'énergie. Dans ce nouveau contexte, un véhicule électrique rechargeable branché sur le REI peut agir comme une charge ou comme une source d'énergie selon la période de la journée. À un niveau supérieur, grâce aux compteurs intelligents, la caractéristique bidirectionnelle propre du REI permet la connaissance de la consommation et la production de chaque usager du réseau et permet la gestion aux différents points du réseau électrique. Tous ces composants permettent d'atteindre les objectifs de réduction du coût d'opération et d'exploitation du système, l'accroissement de l'efficacité énergétique et la diminution des émissions de gaz à effet de serre.

2.2 Gestion de la demande locale et méthodes de gestion de charges

Le principe fondamental de la Gestion de la Demande Locale (GDL) vise à modifier les profils de consommation d'électricité à travers l'intégration des énergies renouvelables, la surveillance et le contrôle local et global de tous les composants du réseau électrique déjà énumérés auparavant. Ainsi, la GDL consiste principalement à réduire la consommation d'électricité, pendant certaines périodes, sans perturber l'équilibre entre la demande et l'offre et sans augmenter les coûts d'opération du réseau électrique.

Les systèmes de GDL sont nombreux dans la littérature, chacun d'entre eux utilise une approche différente de gestion locale (ou méthode de gestion des charges) afin d'atteindre les objectifs en termes d'optimisation du système et d'efficacité énergétique [20]. Les différentes méthodes de GDL proposées dans la littérature ainsi que les systèmes commercialement disponibles sont ci-après présentées.

Les systèmes de gestion peuvent être divisés en deux catégories (voir Figure 2-1) : directes ou indirectes [22]. Dans les méthodes indirectes, le contrôle de la charge est fait par les utilisateurs, où les fournisseurs du réseau n'ont pas le droit d'intervenir directement sur les charges. Celles–ci regroupent toutes les méthodes qui incitent le consommateur à changer son comportement par rapport à la consommation de l'énergie électrique. Parmi ces méthodes on trouve les politiques du gouvernement qui encouragent les changements des vieux appareils à la maison, et les schémas de tarification de la consommation ($/KWh) en fonction du moment de la journée [23],[24], [25].

Les méthodes directes de gestion des charges permettent aux fournisseurs et aux consommateurs de faire le contrôle sur les charges afin d'accomplir les objectifs de gestion définis. Celles-ci sont divisées en trois grands groupes: méthodes classiques [26], méthodes basées sur des algorithmes optimaux [27] et méthodes préventives [28].

Les méthodes de gestion classique sont divisées en : méthodes de régulation, de programmation temporelle, de délestage et de décalage de consommation. Elles sont efficaces, de réponse rapide et elles permettent le contrôle en temps-réel. Cependant, vu que ces systèmes ne sont pas flexibles, ils ne permettent pas de réduire la consommation de façon optimale.

Les méthodes basées sur les algorithmes optimaux sont utilisées pour atteindre un objectif déterminé selon les conditions du système (exemple : fonction de coût) à partir de la formulation d'un modèle mathématique pour la gestion énergétique. Celles-ci peuvent être [22]: déterministes [29], énumératives [30] ou stochastiques [31].

Les méthodes préventives utilisent la prévision de la demande d'énergie comme mécanisme principal pour déterminer les stratégies de gestion à utiliser. Celles-ci sont

classifiées en deux groupes : statistiques ou paramétriques [32] et fondées sur l'intelligence artificielle [33]. Les méthodes paramétriques se divisent en : prévisionnelle [34], théorie grise [35] et régression [36]. Les méthodes basées sur l'intelligence artificielle se divisent en trois grands groupes : les réseaux de neurones [37], la logique floue [38] et les algorithmes génétiques [39]. La figure 2-1 illustre les différentes méthodes de gestion de charges expliquées dans cette partie ainsi que leurs sous catégories.

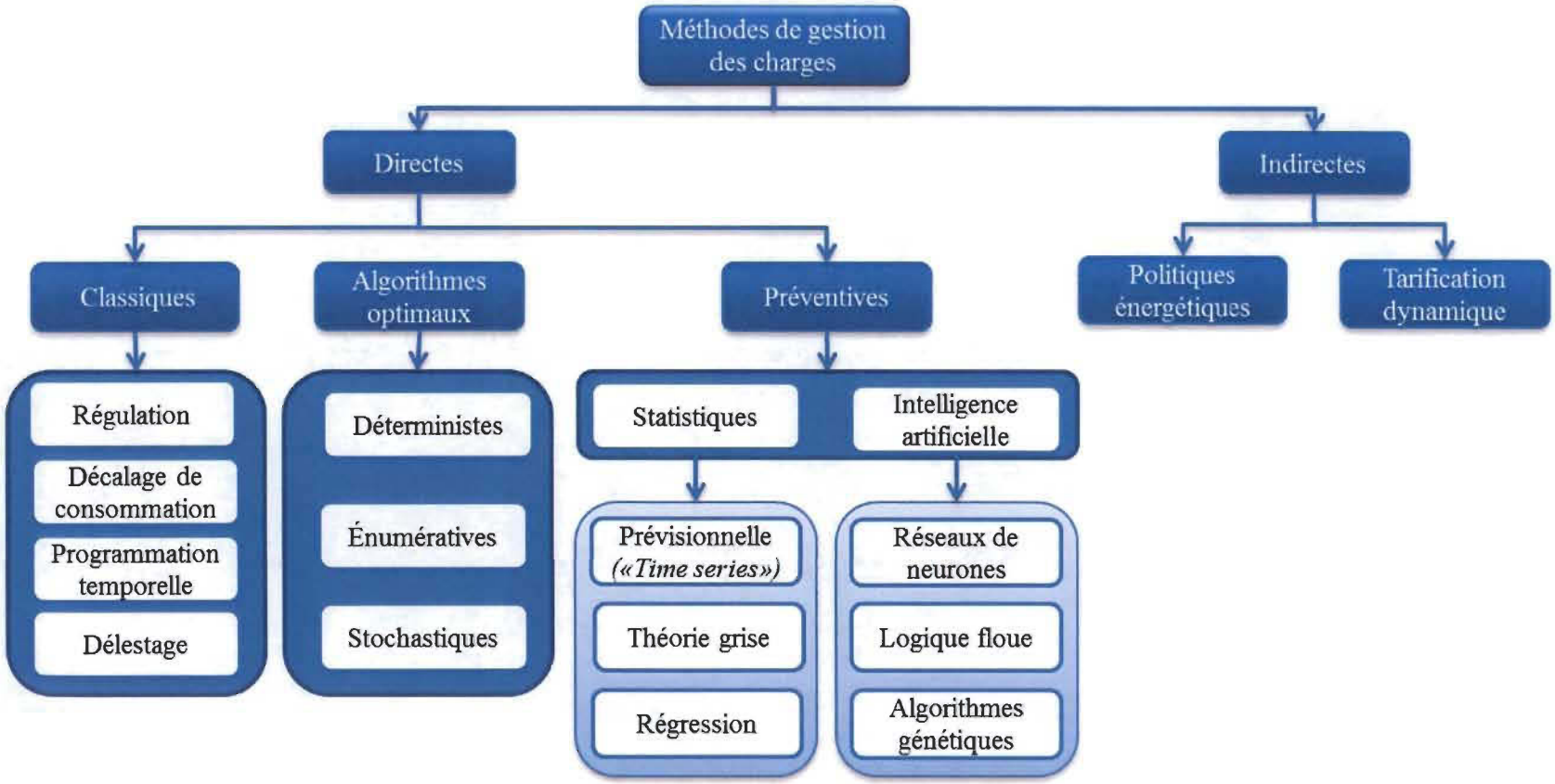


Figure 2-1 Classification des méthodes de gestion des charges

2.3 Systèmes de gestion

Tel que mentionné dans la section 2.2, la gestion des charges a des avantages pour les clients et pour les utilités électriques. Cette gestion, peut être réalisée soit par le client lui-même ou par l'utilité avec le consentement du client. Dans les deux cas, des systèmes de mesurages sont utilisés pour assurer la rétroaction de l'information et confirmer si les modes de gestion ont les effets attendus sur la courbe de puissance.

Dans ce qui suit, les caractéristiques des principaux systèmes de gestion proposés dans la littérature seront énumérées. Cette liste n'étant pas exhaustive présente les principales caractéristiques des systèmes de gestion.

Système mobile avec connexion au compteur intelligent - ETH (2009) : C'est un système interactif qui permet de connaitre, en temps-réel, la consommation d'électricité des appareils qui sont en fonctionnement. Le système comprend trois composants: un compteur intelligent (Landys + Gyr), une passerelle et un dispositif mobile pour l'interface. La passerelle est développée sous Java et elle est connectée au compteur intelligent. Cette passerelle contient un module analyseur, une base de données (SQL Server) et un petit serveur web (RECESS). Les données sont transmises à la base de données à travers la passerelle avec une période d'échantillonnage d'une seconde [40].

Figure 2-2 Schéma de l'architecture et interface du système proposé dans [40]

<u>Système ALIS (2010) :</u> ALIS *«adaptative living interface system»* est un système d'interfaces distribué permettant de surveiller la consommation d'électricité et d'eau à la maison. Ceci est permis grâce aux outils de visualisation tels que: l'ordinateur, les téléphones intelligents, et les écrans tactiles. Le système permet au client d'être un consommateur et en même temps un gestionnaire de sa consommation d'énergie. Le système permet aux clients d'une communauté la visualisation et la gestion de la consommation à travers différentes techniques de conservation d'énergie selon les conseils qu'il offre. Ainsi, ce système permet aussi au client de partager et comparer l'information avec d'autres usagers [41].

Figure 2-3 Interface de visualisation du système «ALIS» [41]

Système WATTDEPOT (2010) : WattDepot est un système de code ouvert sur internet pour la collecte, le stockage, l'analyse et la visualisation de la consommation d'énergie. Ce système comprend trois différentes sections: les capteurs, le serveur et le client.

Les données sont recueillies en utilisant les systèmes de mesurage de puissance Veris [42] et TED 5000 [43] à travers le système en ligne de gestion du bâtiment. Ce système utilise aussi le compteur d'énergie Acuvim [44] qui supporte le protocole ModBus/TCP. Le serveur a été conçu afin d'améliorer sa capacité de généralisation, son extensibilité et sa flexibilité. Ainsi, le système utilise un protocole RESTful «REpresentational State Transfer» [45] et une base de données relationnelle embarquée Apache Derby [46]. La partie client du système prépare les données pour la visualisation et l'analyse[47].

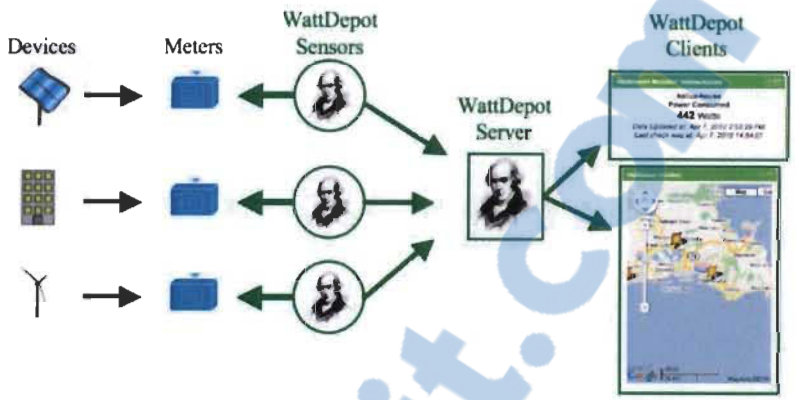


Figure 2-4 Architecture du système «WattDepot» [47]

Système NOBEL (2011) : NOBEL pour *«Neighborhood Oriented Brokerage Electricity and monitoring system»* est un projet en construction, initié par plusieurs pays de l'Union Européenne (UE) à grande échelle qui propose la construction d'une ville (cité) intelligente basée sur la gestion de l'énergie. Le projet est basé sur trois principes : (i) proposer des solutions et des outils afin de diminuer les coûts de gestion du réseau intelligent (ii) offrir le service de gestion aux fournisseurs et consommateurs d'énergie avec l'intégration des énergies renouvelables et la gestion de la demande (iii) utiliser des compteurs intelligents avancées à faible coût [48].

Afin d'atteindre les objectifs, ce projet est divisé en quatre parties :

1) «Security Manager», qui comprend le contrôle de sécurité des services offerts par le système, l'authentification de l'utilisateur et une politique d'autorisation pour chaque transaction.

2) «Device Manager», qui comprend la gestion des données de tous les éléments liés à la production et à la consommation chez les clients. Le module «Business Data Manager» consiste à gérer des données commerciales du client tels que : factures, paiements, tarification, information de profil de consommation etc.

Rapport-Gratuit.com

3) «Trusted Third Party» qui permet l'interaction et la connexion avec un troisième agent dans les cas où il y aura besoin.

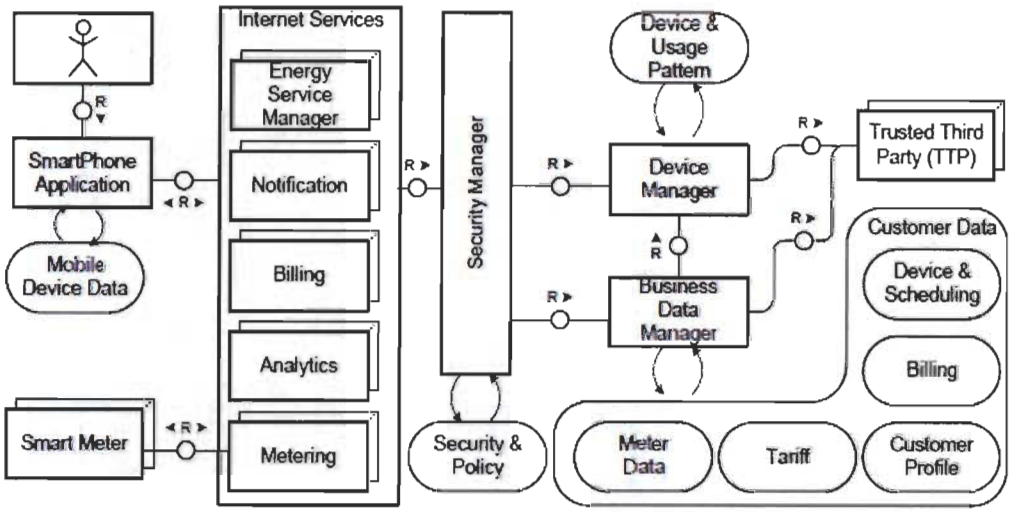


Figure 2-5 Architecture des principaux composants de «NOBEL» [48]

Une fois le projet fini, il sera testé en conditions réelles dans cinq emplacements qui font partie de l'UE : le fournisseur Alginet en Espagne, Ecopower en Belgique, Carbon-coop au Royaume-Uni, DSO ASM Terni en Italie et Meltemi Eco-Village en Grèce [49].

<u>Système KNIVES (2008) :</u> KNIVES est un système de gestion de la demande d'énergie qui a pour objectif l'équilibrage de la demande par rapport à la production d'électricité. Ainsi, le système détermine la corrélation entre les conditions environnementales et la demande d'énergie [50]. Quand la demande d'énergie est supérieure à la production, le système fait un contrôle direct sur certaines charges selon les caractéristiques de priorité établies au préalable.

Le système comprend un serveur et un terminal KNIVES. Le serveur est constitué d'un système de serveur distribué basé sur une topologie en arbre et un logiciel d'arrière-plan. Le terminal joue le rôle d'un module sous la plateforme de Linux qui connecte le client

avec les serveurs. Un réseau de capteurs sans-fil (ZigBee) et un module de contrôle embarqué sur un microcontrôleur qui est utilisé pour le contrôle direct de la charge.

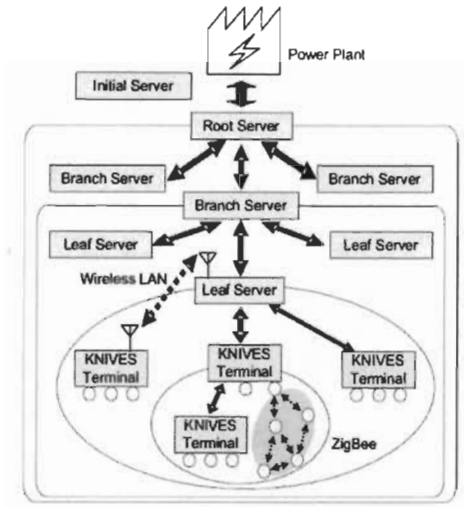


Figure 2-6 Structure du système «KNIVES» [50]

Système VIRIDISCOPE (2009) : C'est un système de surveillance approfondie en temps-réel de la consommation de puissance de chaque appareil dans une résidence. Le système comprend un réseau de capteurs indirects sans-fil (magnétique, de luminosité et acoustique) et un modèle basé sur des algorithmes d'apprentissage (machine learning). Ce dernier roule dans un ordinateur qui estime la consommation de puissance de chaque appareil électroménager à partir de la consommation globale de puissance dans la maison. Les résultats de la Figure 2-7 montrent un exemple d'application où on remarque une erreur d'estimation de 10% [51].

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

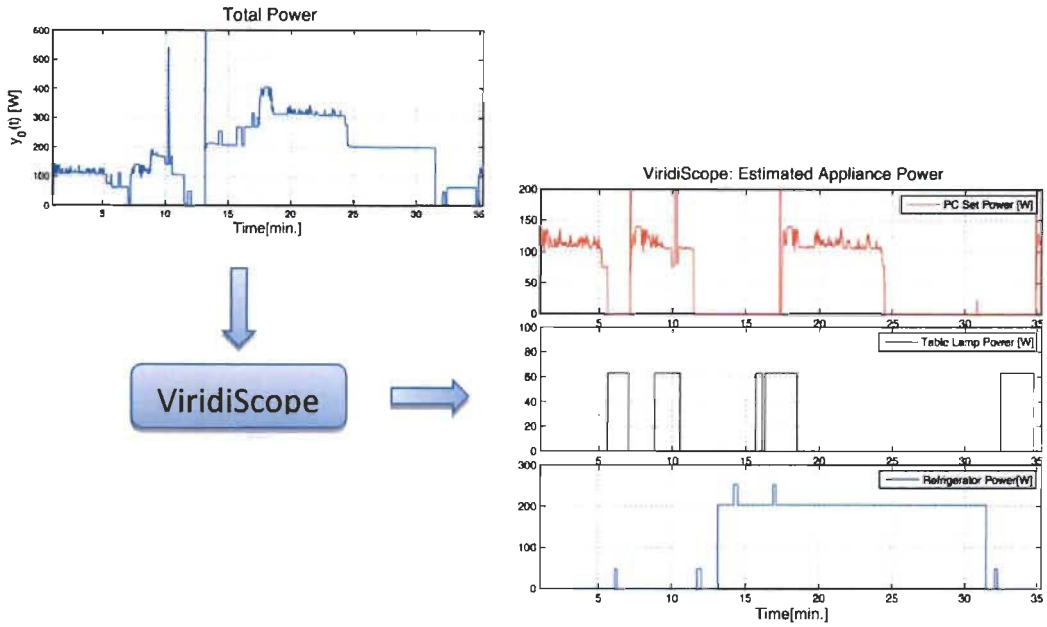


Figure 2-7 Système «ViridiScope» [51]

<u>System DEHEMS (2010) :</u> Le système comprend un réseau de capteurs sur chaque appareil de la maison, une passerelle, un serveur et un écran de visualisation [52]. Le réseau de capteurs est connecté à un radio-modem à une fréquence de 433 MHz et utilise une période d'échantillonnage de 6 secondes. La passerelle est développée sur OpenWRT et elle contient un module TCP/IP pour communiquer avec le serveur DEHEMS.

L'écran de visualisation montre, en temps-réel, la consommation d'énergie en KWh, le prix, la quantité de CO_2 équivalente à la consommation, des conseils pour économiser l'énergie, les données historiques de consommation et la comparaison avec d'autres consommateurs.

Figure 2-8 Interface de visualisation du system DEHEMS [52]

Système PERSON (2010) : PERSON pour *«Pervasive Service-Oriented Networks»* est un système de gestion de la demande d'énergie pour le client basé sur l'idée d'utiliser un réseau hétérogène comme infrastructure d'information [53]. La structure du système comporte trois couches :

1) La couche «Heterogeneous Network Platform» construit une interface de programmation («API») permettant la circulation du flux d'information dans toute l'infrastructure.

2) La couche *«Service Oriented network»* est conçue pour permettre l'interopérabilité, la modularité et la réutilisabilité du système. Cette couche permet aussi la gestion des fournisseurs et des consommateurs.

3) La dernière couche *«Context –Aware Intelligent Algorithms»* permet de contrôler certaines charges selon les contraintes de la production d'électricité d'après les données accessibles grâce à la couche *«Service Oriented network»*.

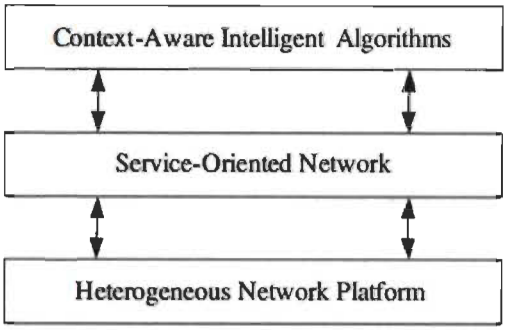


Figure 2-9 Structure du système «PERSON» [53]

2.4 Surveillance des charges

La surveillance de charge ou suivi de la courbe de charge fait référence à l'évolution dans le temps du profil de consommation d'énergie électrique dans une installation résidentielle, commerciale ou industrielle. Il y a deux types de systèmes de surveillance de consommation pour le client (voir Figure 2-10): approche intrusive *«IALM : Intrusive Appliance Load Monitoring»* et approche non-intrusif *«NIALM : Non-Intrusive Appliance Load Monitoring»* [54]–[56].

Le système intrusif est basé sur une méthode multipoint qui doit être installée dans chaque appareil dans une installation. Cette approche rend cette méthode très coûteuse et en plus elle requiert des centres de stockage de données. Par contre, la connaissance des caractéristiques de chaque charge est exacte. Le système non-intrusif mesure de façon globale la consommation d'énergie dans une installation. Ce qui abaisse le coût de la méthode de surveillance avec une exactitude acceptable mais avec une complexité plus élevée par rapport aux algorithmes de désagrégation de chaque appareil à partir du profil de consommation globale de l'installation.

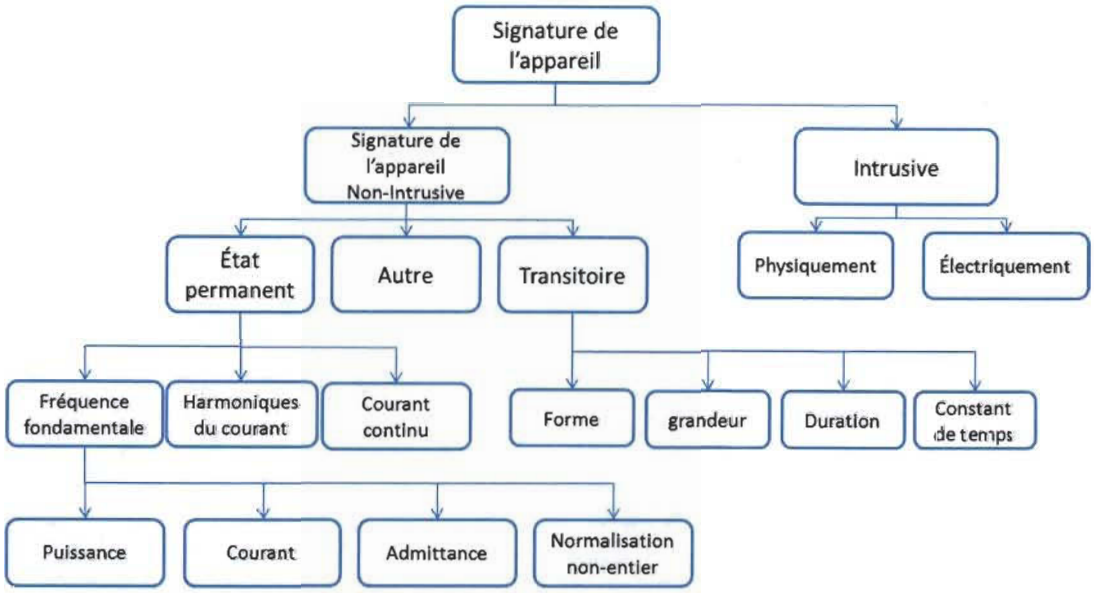


Figure 2-10 Techniques de surveillance de la charge [57].

2.4.1 *Méthodes de surveillance non-intrusive*

Cette idée a été développée en 1982 à partir d'une étude de la compilation et d'analyse de l'information de la charge comme une partie d'un système photovoltaïque résidentiel fait par le professeur George W. Hart dans l'Institute Technologique de Massachusetts [54] [58]. Le principal enjeu de cette méthode est l'identification de l'appareil qui est en fonctionnement à partir du profil global de la consommation de puissance mesurée au niveau du compteur du client.

Le système non-intrusif est divisé en trois parties : la première section comprend l'acquisition, le prétraitement, l'analyse et le stockage des données globales. La deuxième correspond la connaissance et l'extraction des caractéristiques de chaque appareil à travers la modélisation des charges (ce point sera expliqué plus en détail dans la section 3.2). La troisième contient les algorithmes pour faire la désagrégation ou l'identification de chaque charge (Figure 2-11).

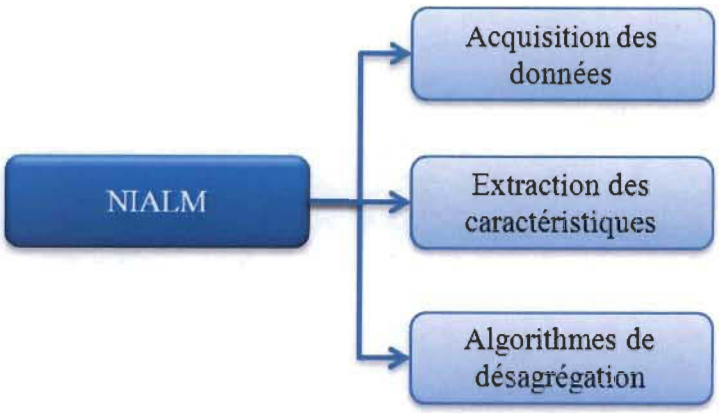


Figure 2-11 Structure de système NIALM

Le NIALM est basé sur le fait que chaque charge a une signature propre à sa nature électrique. Il y a deux types des signatures [12]: macroscopique et microscopique. La première approche prend en considération les changements globaux de la consommation d'un appareil avec une basse fréquence d'échantillonnage. La deuxième approche consiste à déterminer les informations obtenues avec des systèmes de mesure à une haute fréquence d'échantillonnage.

Le premier produit commercial qui utilise cette approche a été développé aux États-Unis à la fin du dernier siècle par l'Institut «EPRI : Electric Power Research Institute». Ensuite, cette technique a été utilisée et améliorée dans d'autres pays tels que Japon, France, Finlande et Danemark [59]. Actuellement, un des systèmes le plus développé dans le marché s'appelle «SPEED: Single Point End-use Energy Disaggregation». C'est un produit de la compagnie Enectics INC [60]. Il y a différents algorithmes utilisés dans la littérature pour identifier chaque appareil à partir du profil de consommation d'énergie de chaque maison. Certains d'entre eux utilisent: l'algorithme Viterbi [61], les signatures des puissances active et réactive [6-13], le filtre de Kalman [62], les régimes transitoire et stable des charges [63], la décompositions en ondelettes [64][65], le contenu harmonique et

les réseaux de neurones [66]–[70], les algorithmes génétiques [71], les modèles de Markov et de Monte Carlo [72] et subtractive clustering [73].

2.4.2 *Systèmes de surveillance commerciaux*

Chez le client, la compréhension de l'impact ou l'effet de la gestion des charges est très importante. Cette compréhension peut être améliorée par l'utilisation de produits d'affichage d'information sur la puissance et l'énergie consommées. Dernièrement, plusieurs appareils d'affichage de la consommation de puissance et/ou d'énergie au niveau résidentiel sont apparus dans le marché. Parmi les plus populaires on peut citer :

- *«kill-a-watt»*, c'est un système intrusif développé par « P3 International » et qui doit être connecté à la prise de courant où sera branché chaque appareil. Ce système mesure et visualise la tension, le courant, le facteur de puissance, la puissance apparente et la fréquence du réseau électrique ainsi que la puissance consommée par chaque appareil connecté avec une exactitude de 98%. Le système Kill-a-watt permet aussi de faire un contrôle programmé sur chaque charge tel que sa durée de fonctionnement [74].
- *«Wireless energy monitor»*, c'est un système non-intrusif de surveillance de la consommation d'énergie dans une installation résidentielle. Le système est constitué de deux modules; le premier est connecté au panneau de distribution et le deuxième est connecté au modem d'internet de la maison via un câble Ethernet. La communication entre les modules est sans-fil. Le système visualise et sauvegarde l'historique de consommation par jour, semaine, mois et/ou année. De plus, ce système comprend d'autres modules qui offrent plus de fonctionnalités telles que la surveillance de la quantité d'énergie générée à partir des panneaux solaires.

Actuellement, la dernière version du *«Wireless energy monitor»* permet la connexion et la déconnection de cinq charges [75].

- «*Wattson solar plus monitor*» c'est un système non-intrusif qui mesure l'énergie générée à partir des systèmes de micro-génération solaires et éoliens. Il mesure aussi la consommation de la puissance de l'installation. Le système est capable de donner des informations utiles pour le client par rapport à sa production, sa consommation, le prix, et la quantité de CO2 émise [76].

D'autres systèmes offrent la possibilité d'enregistrer l'information sur des serveurs web. Ces informations peuvent aussi être comparées avec d'autres consommateurs qui ont des systèmes plus énergivores en utilisant des appareils plus développés tels que:

- *«Power Cost monitor»,* c'est un système composé de trois éléments. Le premier est le capteur optique installé sur le compteur de l'installation résidentielle, il mesure chaque 32 secondes avec une exactitude de 99% pour les installations résidentielles et de 96% pour les installations commerciales. Le deuxième dispositif visualise l'énergie consommée en kWh et le prix de celle-là dans une installation. Le troisième dispositif permet de garder l'historique de consommation sur un serveur web où les clients ont l'accès via leurs téléphones intelligents ou leurs ordinateurs [77].
- « *TED Pro Home* », c'est un système non-intrusif résidentiel qui permet de visualiser la consommation de la puissance globale d'une maison. La communication entre le module de mesure et le module de visualisation est faite à travers Ethernet, zigbee, USB, XBee, wifi ou « Power line communication » selon la préférence du client. La visualisation est aussi possible sur les ordinateurs ou les téléphones intelligents. Il y a

plusieurs produits offerts par TED pour les clients résidentiels, commerciaux, industriels et pour la micro-génération solaire [78].

- «Smart circuit 20», c'est un système de surveillance et de contrôle de la consommation de chaque appareil connecté à ses modules (intrusif). Chaque module est connecté à un serveur web à travers TCP/IP et permet la visualisation de la puissance consommée ce qui permet au client de configurer le contrôle direct sur la charge [79].
- «*General electric nucleus home energy manager*», est un autre système qui permet de contrôler les appareils à la maison. Ce système est composé de trois grands modules. Le premier dispositif mesure la consommation d'énergie à partir du compteur de l'installation résidentielle. Le deuxième groupe de dispositifs inclut les thermostats intelligents et les écrans de visualisation qui montrent certaines analyses telles que la consommation de l'énergie de la maison en kWh, le prix ainsi que l'historique de consommation. Le troisième dispositif est un interrupteur pour la connexion et la déconnexion de la charge que le client souhaite contrôler [80]. Ce produit permet seulement le contrôle sur la nouvelle génération d'électroménagers de la marque «General Electric».

2.5 Conclusion

La GDL est très prometteuse pour atteindre les objectifs des réseaux électriques intelligents en termes d'efficacité énergétique, de la satisfaction des clients et des réductions des émissions de gaz à effet de serre. La mise en place de la GDL exige l'intégration de différentes technologies: de détection, de surveillance et mesure (incluant

Rapport-Gratuit.com

les compteurs intelligents), de gestion (acquisition, traitement et échange) de l'information, de capteurs et actionneurs, de conversion, de distribution et de stockage d'énergie.

Plusieurs exemples de systèmes de gestion proposés dans la littérature ont été brièvement présentés dans cette section, certains plus orientés à la surveillance et certains au contrôle des charges.

Dans un contexte de gestion locale, la connaissance de la consommation de l'énergie à partir des caractéristiques de la charge ou les courbes de profil des charges au niveau résidentiel devient très importante. Cette connaissance qui peut être obtenue à partir de la modélisation des charges; où la nature du modèle dépend premièrement du type de méthode de gestion à implémenter.

L'étude des différents modèles des charges proposés dans la littérature est présentée dans le chapitre suivant.

Chapitre 3 - Modélisation de charges électriques résidentielles

Dans ce chapitre, nous présentons les concepts de charge électrique et une courte description des méthodes de modélisation des charges. Les différents types de modèles proposés dans la littérature y sont présentés.

3.1 Définition et types de charges électriques

La charge électrique a plusieurs définitions dans le domaine du génie électrique [81]. Une des meilleures à nos propos est : « *un dispositif connecté dans un système électrique qui consomme de la puissance* ». Cette définition comprend les charges qui ont une source d'alimentation commune, même si les charges ont des composants électriquement différents [57]. Par exemple : la sécheuse (sèche-linge) est une charge électrique que l'on peut diviser en deux composants avec un comportement électriquement différent. C'est le moteur qui a un comportement inductif et l'élément chauffant qui a un comportement résistif. De cette façon, le moteur électrique et la résistance, les deux dans le même appareil, sont des charges électriques de natures différentes; l'une avec un comportement électromécanique et l'autre avec un comportement purement électrique. Cette machine présente une troisième caractéristique, c'est le contrôle de température de séchage qui fait que la puissance dissipée par la résistance varie en fonction de la température. Alors, on peut trouver dans le même appareil plusieurs domaines qui font en sorte que différentes formes d'ondes de courant et différents cycles de fonctionnement peuvent être observés pour le même appareil en fonction du temps par rapport à la même source d'alimentation.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Les charges électriques qui utilisent des éléments passifs peuvent être divisées en trois types : charges résistives, inductives et capacitives. Dans la charge purement résistive, la puissance instantanée est toujours positive, le courant et la tension sont parfaitement en phase. C'est-à-dire que cette puissance est toujours fournie en une seule direction de la source vers la charge. Le sens de la puissance des charges purement inductives ou capacitives est bidirectionnel. C'est-à-dire qu'elle est fournie de la source à la charge et vice-versa. Selon les éléments de la charge, la puissance peut être divisée en deux types, la puissance active (P) qui est consommée par les charges résistives et la puissance réactive (Q) qui est consommée par les charges inductives et capacitives. Une troisième puissance est obtenue quand les vecteurs P et Q sont additionnés. Celle-là correspond à la puissance apparente (S) qui représente la puissance totale consommée par la charge (Figure 3-1) [82].

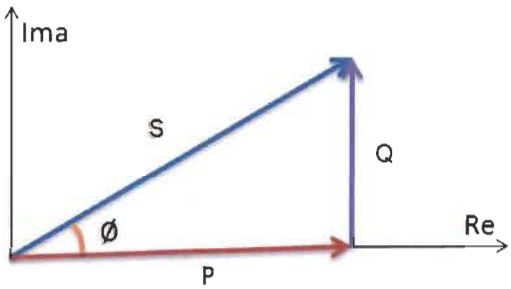


Figure 3-1 Triangle de puissances

3.2 Modélisation des charges

De façon générale, un modèle est une description ou une représentation, souvent mathématique, qui décrit le comportement d'un system physique [83]. Pour modéliser un système physique, il faut faire un processus d'abstraction avec l'application des lois et des relations entre les magnitudes physiques afin d'analyser les caractéristiques physiques qui sont importantes. On peut ainsi obtenir une représentation simplifiée de la réalité [57].

Spécifiquement, un modèle de charge décrit la relation entre la tension du bus (magnitude et fréquence) et la puissance active et réactive [84]. Les modèles peuvent être classifiés en deux grandes catégories : paramétrique et non-paramétrique [85] (Figure 3-2). Les modèles non-paramétriques peuvent être représentés par des graphiques ou des tableaux qui décrivent leurs propriétés via un nombre non fini de paramètres. Par exemple, un système qui est défini à partir de sa réponse impulsionnelle ou indicielle. Dans la deuxième catégorie, les modèles paramétriques peuvent être classifiés en quatre grands groupes: statiques et dynamiques qui sont considérés dans cette étude et seront présentés aux sections 3.3 et 3.4; et continus et discrets représentés par des équations différentielles ou des équations aux différences respectivement. Les modèles déterministes et stochastiques, représentés par des concepts probabilistes [86]–[88].

Dans une autre classification, les modèles peuvent être basés sur des notions physiques, semi-physiques, ou de boîte noire; c'est-à-dire que les modèles peuvent être construits totalement (modèle blanc) ou en partie (modèle gris) à partir de lois physiques ou utilisant des paramètres sans aucune signification physique (modèle de boîte noire). Cette dernière classification de boîte noire peut être linéaire ou non-linéaire et typiquement basée sur des réseaux de neurones [67], [89], logique floue [90], [91], ou d'autres approches. Tel que mentionné précédemment, il existe toute une variété de méthodes ou approches de modélisation; ainsi dans le cadre de ce travail seulement les modèles statiques et dynamiques des charges seront étudiés en détail (sections 3.3 et 3.4).

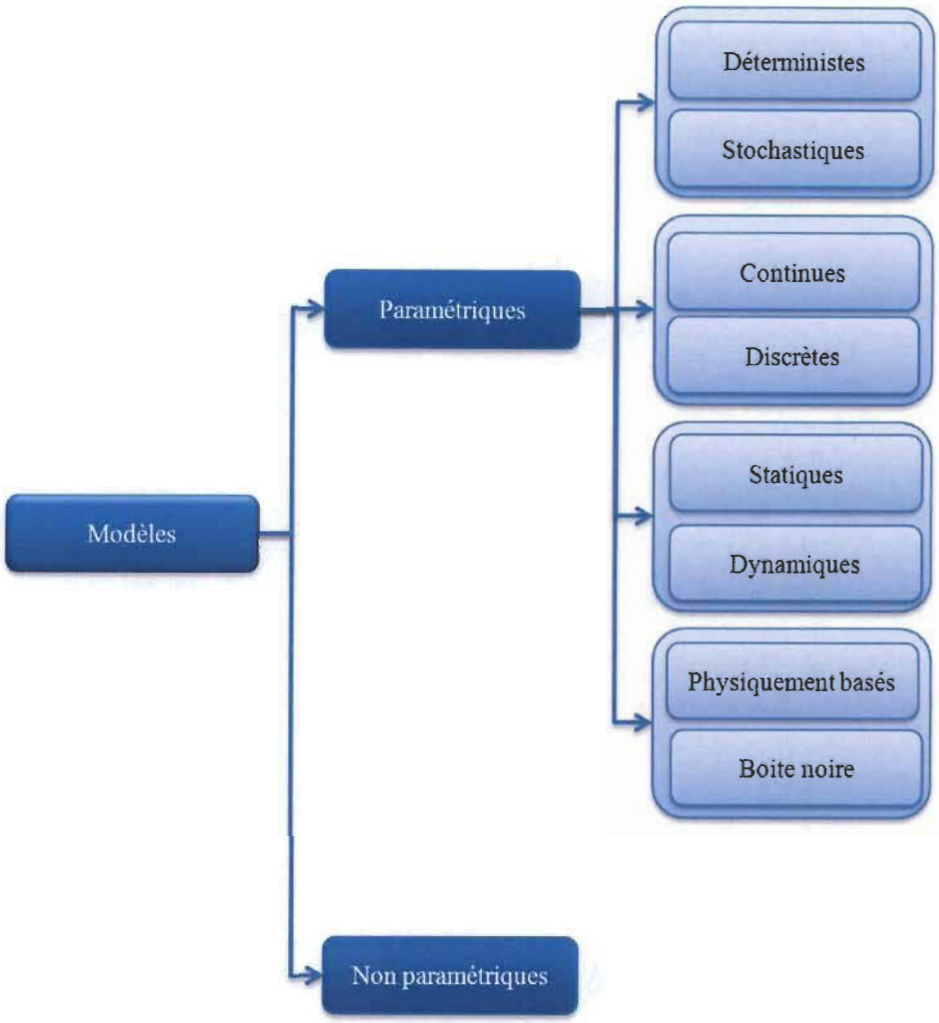


Figure 3-2 Classification des approches de modélisation.

À partir de l'analyse d'une série d'articles sur la modélisation des charges énoncés dans la publication *«IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance »* concernant la modélisation des puissances active et réactive, on peut classer les approches de modélisation en deux grands groupes: statique et dynamique [92]. Une classification des modèles statique et dynamique est présentée dans la Figure 3-3. Les modèles statiques sont les plus utilisés grâce à leur simplicité d'application. Dans ces modèles on estime la puissance active et réactive par rapport aux valeurs instantanées de la tension et de la fréquence.

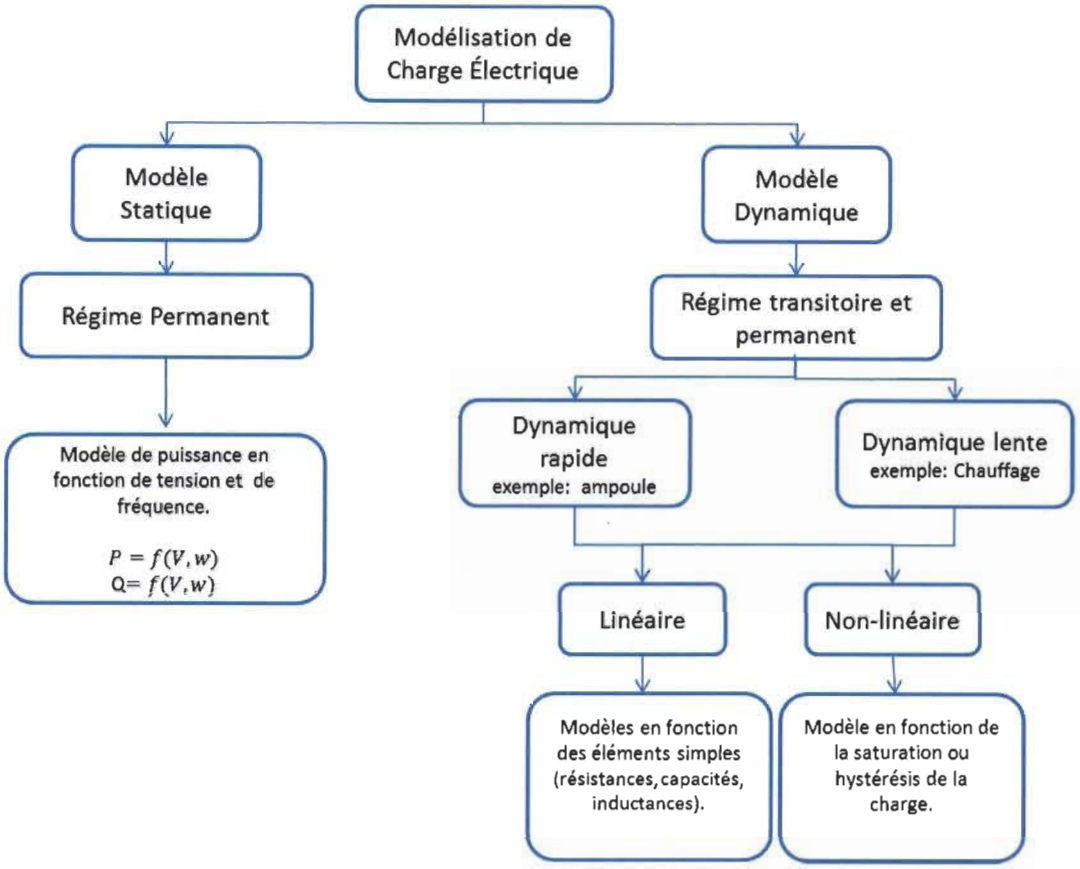


Figure 3-3 Classification des modèles de charge selon la dynamique [57].

3.3 Modèles statiques de la charge

Le modèle statique représente les caractéristiques des charges en régime permanent. Il décrit la relation entre la puissance active et réactive avec le niveau de tension et la fréquence dans une période de temps déterminée. Dans ces modèles de charge, les puissances active et réactive sont représentées sous forme polynomiale ou exponentielle et peuvent dans certains cas inclure la dépendance de la fréquence. Ces modèles sont aussi utilisés pour faire une approximation des caractéristiques dynamiques des charges [93]–[95].

3.3.1 *Modèle polynomial ou modèle ZIP*

Ce modèle représente les caractéristiques de la charge comme la somme des constantes d'impédance Z_P et Z_q, de courant I_P et I_q et de puissance P_P et P_q pour les puissances active et réactive respectivement (Équations (3-1) et (3-2)). Pour une charge d'impédance constante, la relation (ou dépendance) de la puissance avec la tension est quadratique. Pour une charge de courant constant, cette dépendance est linéaire et pour une charge de puissance constante, la puissance de la charge est indépendante des variations de tension.

$$P = P_0 \left[Z_p \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 + I_p \left(\frac{V}{V_0}\right) + P_p \right] \tag{3-1}$$

$$Q = Q_0 \left[Z_q \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 + I_q \left(\frac{V}{V_0}\right) + P_q \right] \tag{3-2}$$

P_0 et Q_0 sont les paramètres nominaux de puissances active et réactive de la charge, V_0 est le paramètre de tension nominale du réseau [94]. Le modèle doit satisfaire les conditions suivantes :

$$[Z_P + I_P + P_P] = 1; \tag{3-3}$$

$$[Z_q + I_q + P_q] = 1; \tag{3-4}$$

Les valeurs de ces paramètres changent selon le type de la charge connectée au réseau.

3.3.2 *Modèle exponentiel*

Le modèle exponentiel utilise les coefficients de la puissance active (*np*) et réactive (*nq*) pour définir la relation entre les deux puissances avec la tension d'alimentation du réseau électrique. Lorsque le coefficient est 0, la charge se comporte comme une charge de puissance constante. Si le coefficient est 1, la charge se comporte comme une charge de courant constant et si le coefficient est 2, la charge se comporte comme une charge

d'impédance constante. Le coefficient change selon les caractéristiques de la charge modélisée [94].

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{np} \tag{3-5}$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{nq} \tag{3-6}$$

Les modèles exponentiel ou polynomial, sont suffisants pour la représentation du comportement stationnaire de la plupart des charges [93], [94]. On trouve aussi des modèles dynamiques qui utilisent des modèles exponentiels statiques dans leur formulation. Dans ce cas, on part d'une équation différentielle de premier ordre qui définit la relation entre les puissances active et réactive et leurs variations dans le temps, ainsi qu'avec d'autres variables intermédiaires. Ces modèles sont utilisés principalement pour l'étude de la stabilité de la tension et de la variation de la puissance suite à une perturbation de tension [96].

3.3.3 *Dépendance de la fréquence :*

Les modèles de charge polynomiale et exponentielle, peuvent être améliorés en ajoutant l'effet de la fréquence. Les équations (3-7) et (3-8) présentent respectivement les modèles exponentiel et polynomial pour la puissance active en considérant la variation de la fréquence du réseau.

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^{np} * [1 + A(f - f_0)] \tag{3-7}$$

$$P = P_0 \left[Z_p \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 + I_p \left(\frac{V}{V_0}\right) + P_p\right] * [1 + A(f - f_0)] \tag{3-8}$$

où f et f_0 sont respectivement la fréquence nominale et la fréquence mesurée du réseau, et A est le paramètre qui représente la sensibilité du système aux variations de fréquence [94]. En analysant les dernières études traitant ce sujet [94], nous remarquons que l'effet de la variation de la fréquence du réseau a été exclu dans plusieurs cas sous l'hypothèse d'une bonne stabilité de la fréquence du réseau.

3.4 Modèles dynamiques de la charge

Un modèle dynamique de la charge montre la relation entre la puissance (active ou réactive) dans une période de temps en fonction de la tension et de la fréquence du temps passé et présent [97]. Parmi les modèles dynamiques les plus utilisés on peut citer le modèle exponentiel [98], le modèle de moteur à induction [99] et le modèle composé, qui comprend un modèle statique et un modèle dynamique [97]. Une description de chacun est présentée dans les sections suivantes.

3.4.1 *Modèle dynamique exponentiel*

Le modèle est présenté comme un groupe d'équations non-linéaires, où les puissances active et réactive ont une dépendance non-linéaire par rapport à la tension. Ce modèle a été formulé en 1993 à partir des observations de mesures expérimentales [100].

$$Tp\frac{dPr}{dt} + Pr = P_0\left(\frac{V}{V_0}\right)^{\alpha s} - P_0\left(\frac{V}{V_0}\right)^{\alpha t} \tag{3-9}$$

$$Pl = Pr + P_0\left(\frac{V}{V_0}\right)^{\alpha t} \tag{3-10}$$

$$Tp\frac{dQr}{dt} + Qr = Q_0\left(\frac{V}{V_0}\right)^{\alpha s} - Q_0\left(\frac{V}{V_0}\right)^{\alpha t} \tag{3-11}$$

$$Ql = Qr + Q_0\left(\frac{V}{V_0}\right)^{\alpha t} \tag{3-12}$$

où V_0, P_0 et Q_0 sont respectivement, les valeurs nominales de la tension et des puissances active et réactive avant une perturbation de tension. Pr et Qr sont les puissances active et réactive après la perturbation de tension, c'est-à-dire pendant une période de récupération. Pl et Ql sont les puissances active et réactive globales. Tp est la constante de temps de la période de récupération. αt est le coefficient de variation de la puissance par rapport à la tension dans l'état transitoire (αt dépend du type de charge modélisée) et αs est le coefficient de variation de la puissance par rapport à la tension dans l'état permanent et V représente la tension dans le régime permanent [94].

3.4.2 *Modèle de moteur à induction*

Le modèle simplifié du moteur à induction est montré dans la Figure 3-4 :

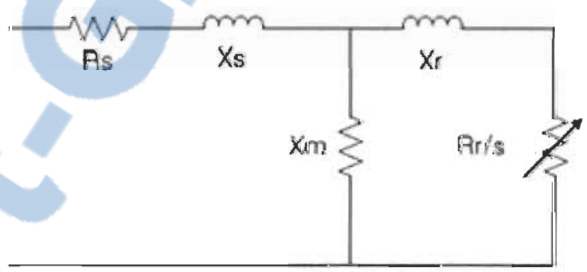


Figure 3-4 Schéma équivalent du modèle de moteur à induction

où R_S est la résistance du stator, X_S est la réactance de fuite du stator, Xm est la réactance magnétisante, Xr est la réactance de fuite du rotor, Rr est la résistance du rotor et S est le glissement du rotor. Le modèle mathématique du moteur à induction est présenté dans [99] par les équations suivantes:

$$\begin{cases} \frac{dE'_d}{dt} = -\frac{1}{T'}\left[E'_d + (X - X')I_q\right] - (\omega - 1)E'_q \\ \frac{dE'_q}{dt} = -\frac{1}{T'}\left[E'_q + (X - X')I_d\right] + (\omega - 1)E'_d \\ \frac{d\omega}{dt} = -\frac{1}{2H}\left[T_0(A\omega^2 + B\omega + C + D\omega^E) - \left(E'_d\, I_d + E'_q\, I_q\right)\right] \end{cases} \tag{3-13}$$

Rapport-Gratuit.com

$$I_d = \frac{1}{R_s^2+X'^2}\left[R_s(U_d - E'_d) + X'(U_q - E'_q)\right]$$
$$I_q = \frac{1}{R_s^2+X'^2}\left[R_s(U_q - E'_q) + X'(U_d - E'_d)\right] \quad (3\text{-}14)$$

$$S = \frac{(\omega_s-\omega)}{\omega_s} \quad (3\text{-}15)$$

$$X' = X_s + \frac{((X_m)(X_r))}{(X_m+X_r)} \quad (3\text{-}16)$$

$$T' = \frac{(X_r+X_m)}{(\omega R_r)} \quad (3\text{-}17)$$

$$X = X_s + X_m \quad (3\text{-}18)$$

$$C = A{\omega_0}^2 - B\omega_0 - D{\omega_0}^E \quad (3\text{-}19)$$

L'équation du couple de la charge est exprimée comme suit:

$$T_L = T_0(A\omega^2 + B\omega + C + D\omega^E) \quad (3\text{-}20)$$

où T_0 est le couple stable nominal. X' est la réactance transitoire ou réactance du rotor bloqué ou en court-circuit. X, est la réactance du moteur sans charge ou en circuit ouvert. T' est la constante de temps du transitoire en circuit ouvert, H est la constante d'inertie du rotor, ω vitesse de rotation du rotor, E'_d et E'_q sont les transitoires de l'EMF du moteur dans les axes d et q respectivement. I_d et I_q sont les courants du stator dans les axes d et q. U_d et U_q sont les composantes de tension dans les axes d et q. A, B, C et D sont les coefficients de l'équation du couple de la charge et qui doivent satisfaire l'équation (3-20).

3.5 Modèle composé

Un modèle composé est une combinaison des modèles statique et dynamique. Ceci est un des modèles le plus utilisé dans la littérature pour la représentation dynamique d'une charge. C'est un modèle qui combine le modèle statique de la charge polynomial ou ZIP

présenté à la section 3.3.1 et le modèle de moteur à induction expliqué en détail dans la section 3.4.2 (voir Figure 3-5) [90]. De cette façon, il est possible de représenter les charges avec caractéristiques statiques telles que le chauffage, l'éclairage, etc.; et la partie dynamique du modèle permet de représenter les charges avec un effet dynamique telles que celles avec des moteurs comme la machine à laver, la sécheuse, etc. Le principal désavantage de ce modèle est la quantité de paramètres à estimer, par contre une réduction de paramètres est proposée dans [102].

$$P_T = \gamma_1 * P_{ZIP} + \lambda_1 * P_M \tag{3-21}$$

$$Q_T = \gamma_1 * Q_{ZIP} + \lambda_1 * Q_M \tag{3-22}$$

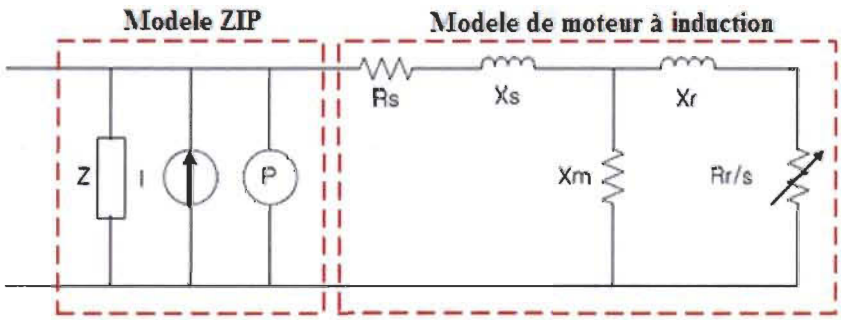


Figure 3-5 Circuit équivalent du modèle composé [97]

Le modèle composé utilise les équations (3-1) et (3-2) pour les puissances active et réactive du modèle ZIP et les équations (3-13) et (3-14) du modèle de moteur à induction. Ce modèle est normalement utilisé dans le contexte de l'analyse de la stabilité de tension, la conservation de tension et l'analyse de flux de puissance [103].

3.6 Modèles de régression

En contraste aux modèles décrits précédemment, il est possible d'utiliser d'autres types de modèles basés sur des régressions. Ces modèles, qui représentent le comportement de la

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

charge, utilisent des paramètres qui n'ont pas une interprétation physique évidente. Ces modèles sont utilisés couramment dans l'identification des systèmes dans plusieurs domaines. Dans cette catégorie on peut citer : les modèles autorégressifs linéaires [104] *«Output Error: OE», «Auto-Regressive :AR»* [105], *«Auto-Regressive with eXogenous inputs : ARX», «Auto-Regressive Moving Average with eXogenous inputs: ARMAX»* [106], *«Auto-Regressive Integrated Moving Average with eXogenous inputs: ARIMAX»* [107]; et les modèles autorégressifs non-linéaire des séries de Volterra, *«NARX», «Non-linear Auto-Regressive Moving Average with eXogenous inputs NARMAX»*[108].

3.7 Modèles multi-physiques

La modélisation du comportement d'une charge qui met en jeu l'interaction de phénomènes physiques de natures différentes a besoin d'une approche multi-physique. Un exemple de cela, est le chauffe-eau résidentiel, où son comportement est thermoélectrique, alors une bonne représentation de ses caractéristiques ne peut pas être obtenue par un modèle purement électrique. Ainsi, le modèle utilisé afin de représenter son comportement doit permettre la modélisation des interactions entre les changements des températures d'entrée et de sortie de l'eau, le débit de l'eau et la puissance électrique consommée en lien avec chacune de ces interactions. Un des outils de représentation qui permet de bien visualiser ce type de modélisation est la Représentation Énergétique Macroscopique (REM) [109].

La REM permet une description homogène des composants d'un système énergétique et propose une structure maximale de commande globale à l'aide des règles d'inversion [109]. Les différents composants de la REM qui décrivent un système sont reliés par des

vecteurs d'échanges selon le principe d'action et réaction. Le Tableau 3-1 présente les éléments de base de la REM.

Les éléments sources : possèdent une seule entrée et une seule sortie ou des vecteurs d'entrée et de sortie. L'entrée peut produire une perturbation sur la sortie de la source.

Les éléments de conversion : ils assurent une conversion énergique entre deux sources. Les conversions n'ont ni accumulation ni pertes d'énergie. Ils ont une entrée de réglage supplémentaire.

Les éléments d'accumulation : ces éléments accumulent de l'énergie en considérant les pertes. Il n'y a pas d'entrée de réglage.

Les éléments de couplage : ils ont pour objectif d'assurer la distribution de l'énergie dès la source vers plusieurs chaines ou de collecter l'énergie de plusieurs chaines à une seule chaine d'énergie.

Tableau 3-1 Éléments de base de la REM [109].

REPRÉSENTATION ÉNERGÉTIQUE MACROSCOPIQUE (REM)			
	Variables d'action et réaction		Source d'énergie
	Élément d'accumulation		Inversion indirecte (Boucle fermé)
	Élément de conversion multi-Physique (Conversion d'énergie)		Inversion direct (boucle ouvert)
	Élément de conversion multi-physique (Conversion d'énergie)		Inversion rejection de perturbation

REPRÉSENTATION ÉNERGÉTIQUE MACROSCOPIQUE (REM)			
	Élément de conversion mono-physique (Répartition d'énergie)		Stratégie de gestion d'énergie
	Élément de couplage multi-physique (Répartition d'énergie)		Inversion de couplage (pondération)
	Modèle ou estimateur		Inversion de couplage (Répartition)

3.8 Algorithmes d'estimation des paramètres

La Figure 3-6 montre de façon simplifiée le concept d'identification des paramètres. En effet, l'estimation des paramètres consiste à faire une approximation des valeurs des paramètres à partir des données expérimentales, où la valeur de l'estimation des paramètres change en changeant les observations utilisées. Toutefois l'estimation des paramètres peut être plus ou moins précise selon la méthode employée, et sa précision est normalement évaluée en considérant l'erreur quadratique moyenne par rapport à la valeur réelle. Il y a plusieurs méthodes d'identification des paramètres dans la littérature selon les caractéristiques du système, elles peuvent être linéaires ou non-linéaires [110], [111]. Les méthodes utilisées dans le cadre de ce travail sont de type linéaire; plus spécifiquement nous nous intéressons aux algorithmes d'inversion de matrice, aux algorithmes des moindres carrés et des moindres carrés récursifs (*Least Mean Square: LMS* et *Recursive Least Square :RLS*) [112].

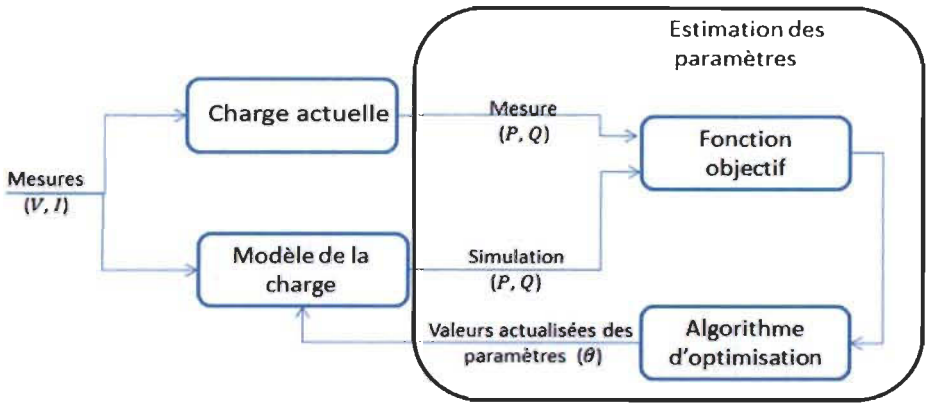


Figure 3-6 Schéma d'identification des paramètres

Les algorithmes d'estimation des paramètres utilisés sont basés sur la minimisation de l'erreur quadratique moyenne entre la valeur mesurée et la valeur estimée, ainsi la fonction de coût est :

$$J = \min_{\theta \in Z} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N} \left[\left[P(k) - \hat{P}(k) \right]^2 \right]$$
$$J = \min_{\varphi \in Z} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N} \left[\left[Q(k) - \hat{Q}(k) \right]^2 \right] \qquad (3\text{-}23)$$

où θ est le vecteur des paramètres à estimer, N est le nombre total de données, Z est l'espace des paramètres, $P(k)$ et $Q(k)$ sont les valeurs des puissances active et réactive mesurées et $\hat{P}(k)$ $\hat{Q}(k)$ sont les valeurs des puissances active et réactive estimées.

3.9 Conclusion

La surveillance des charges est une étape clé dans la gestion de la demande résidentielle. Celle-ci permet la connaissance de la consommation de chaque appareil, ce qui permet aux consommateurs et aux fournisseurs de faire une bonne gestion de la consommation d'énergie.

Dans ce chapitre nous avons abordé les différents types et méthodes de modélisation de charges électriques, passant par les modèles statiques, dynamiques et composés. L'approche de modélisation multi-physique à l'aide de la représentation énergétique macroscopique a été également introduite.

Un exemple de modélisation multi-physique est présenté au chapitre 4 et l'utilisation du modèle polynomial et la proposition d'un modèle par approximation de séries de Taylor pour les charges résidentielles sont introduites au chapitre 5.

Chapitre 4 - Modélisation de charges résidentielles de type thermostatique

Les charges de type thermostatique sont très présentes dans les installations résidentielles au Québec. Parmi ces charges nous pouvons citer les systèmes de chauffage, les fours, les cuisinières, les réfrigérateurs et les chauffe-eaux. La modélisation de ce type de charge, un peu particulière, requiert l'utilisation d'une approche multi-physique (thermique et électrique) étant donné que leur profil de puissance électrique dépend de l'évolution de la température du système vis-à-vis de la température de réglage. Ainsi, on parle de deux segments : le segment électrique et le segment thermique.

De ce fait, le travail réalisé dans le cadre de ce projet a été divisé en deux grandes parties : la première comprend l'analyse d'une des charges énergivores au niveau résidentiel : le chauffe-eau, en utilisant la REM comme outil de représentation. Cette phase du travail, abordée dans ce chapitre, donne une idée globale de ce type de modélisation et sur la possible gestion d'énergie au niveau local afin de moduler la consommation de puissance électrique d'une charge énergivore tel que le chauffe-eau. La deuxième partie comprend l'analyse des charges purement électriques (de type R, RC et RLC) en utilisant le modèle polynomial, cette partie sera abordée au chapitre 5.

Dans les sections suivantes, l'exemple de modélisation d'un chauffe-eau résidentiel est présenté.

4.1 Modèle du chauffe-eau

L'eau chaude est une nécessité dans notre vie quotidienne. Différents types de chauffe-eaux sont disponibles commercialement pour ce besoin tel que le chauffe-eau solaire, le chauffe-eau au gaz naturel et le chauffe-eau électrique [113]. Au canada, les chauffe-eau électriques sont les plus présents dans les résidences [114]. Ainsi, vu que cet équipement est énergivore, il est démarré à plusieurs reprises pendant la journée. Il est important de bien le modéliser afin d'améliorer les informations sur les charges dans une résidence.

Le chauffe-eau a différents paramètres qui doivent être pris en compte : les températures d'eau à l'entrée et à la sortie, les débits d'eau à l'entrée et à la sortie, la puissance des éléments chauffants. Un autre paramètre très important qu'on doit prendre en considération est la résistance thermique équivalente entre le chauffe-eau et l'air ambiant de la pièce où le chauffe-eau est installé. Cette résistance permet de déterminer les pertes de chaleur avec le milieu extérieur selon la température de la pièce. Cette dernière pouvant être obtenue à partir du modèle de bâtiment.

4.1.1 *Modèle mathématique*

Le modèle mathématique d'un chauffe-eau peut être décrit par le bilan énergétique dans un système ouvert. L'équation de bilan énergétique peut être écrite selon le modèle présenté par [114] comme suit:

$$C_w \frac{dT_w(t)}{dt} = P_e(t) - HW_D(t)\big(T_W(t) - T_{in}(t)\big) - G\big(T_W(t) - T_{air}(t)\big) \tag{4-1}$$

avec:

$$H = \rho C_p \qquad G = \frac{A}{R} \qquad \text{et} \qquad C_W = \rho C_p V$$

où C_W est la capacité thermique du réservoir, ρ est la densité de la masse de l'eau (kg/m^3), C_p est la chaleur spécifique de l'eau $(J/°CKg)$, V est le volume du réservoir, $T_W(t)$ est la température de l'eau (°C), $P_e(t)$ est la puissance électrique de la résistance du chauffe-eau (W), W_D est l'utilisation de l'eau (m^3/s), A est la surface du réservoir (m^2), R est la résistance thermique du réservoir $(m^2°C/W)$, T_{in} est la température d'entrée de l'eau (°C), et T_{air} est la température de l'air où se situe le chauffe-eau (°C). Le diagramme en blocs du système, incluant le contrôle thermostatique, est montré dans la Figure 4-1 :

:

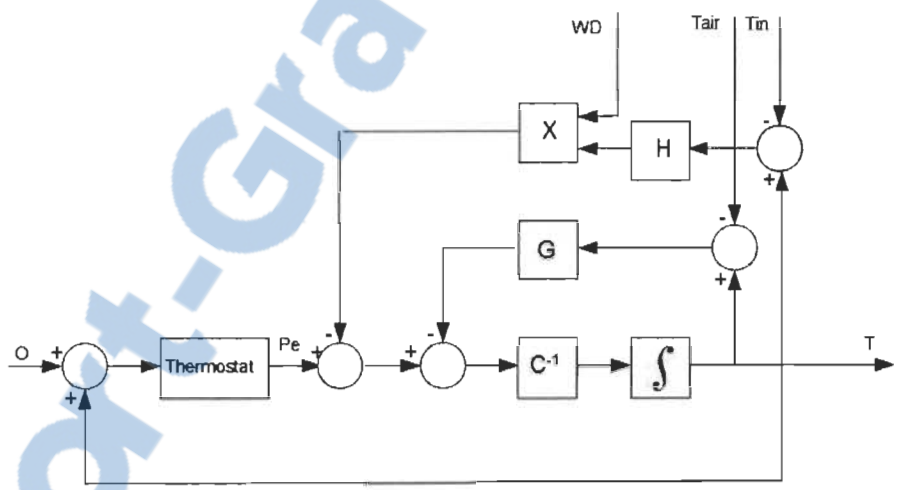


Figure 4-1Modèle du chauffe-eau en schéma-blocs

La Figure 4-2 montre le schéma du modèle thermique du chauffe-eau sous Simulink.

Rapport-Gratuit.com

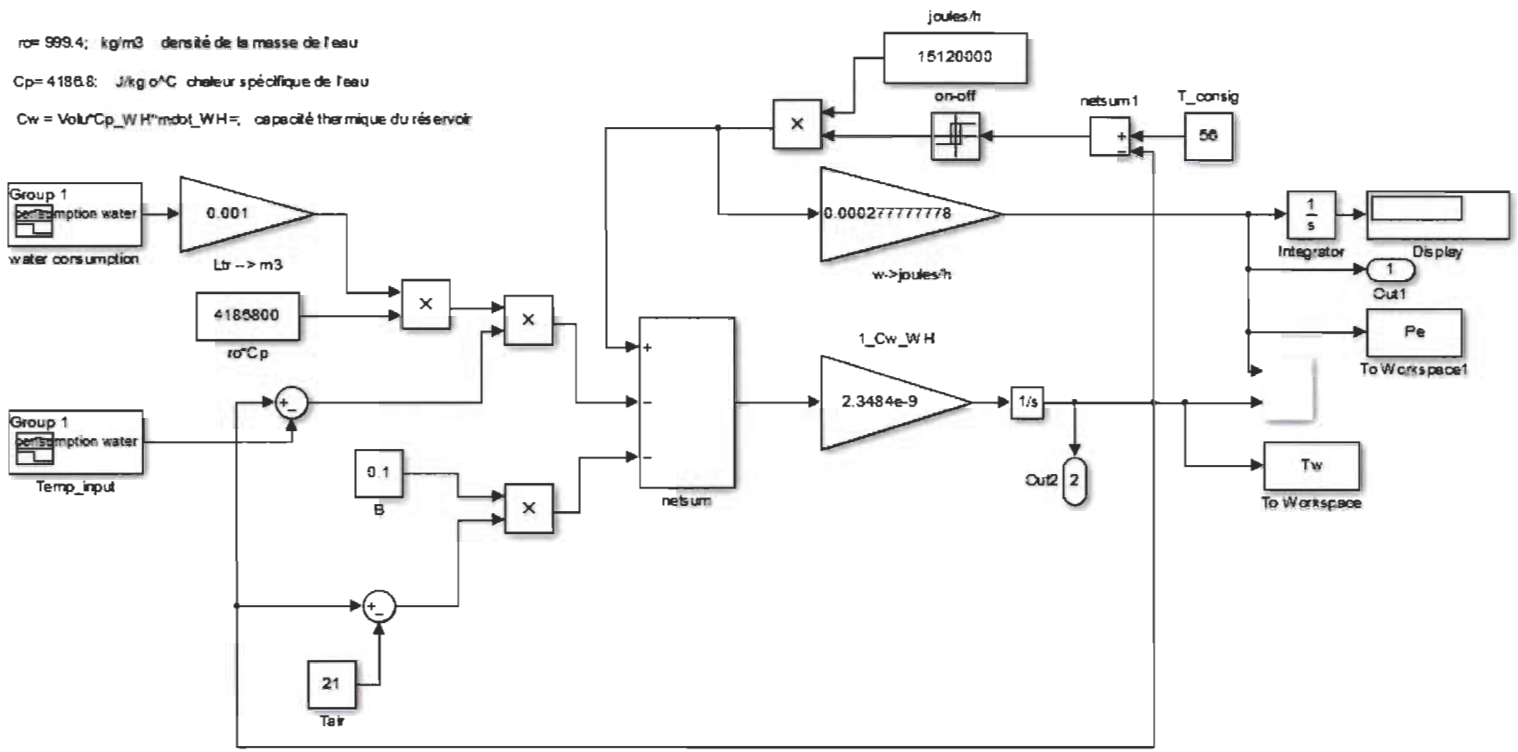


Figure 4-2 Schéma sous Simulink du chauffe-eau

Le dimensionnement du chauffe-eau est fait en utilisant un profil de consommation d'eau déterminé à partir d'un profil de puissance pris dans une base de données d'Hydro-Québec pendant une journée (24 heures) dans une installation résidentielle typique Canadienne (voir Figure 4-3). La capacité du chauffe-eau électrique résidentiel typique est de 60 gallons avec un élément chauffant. La température de l'air, où se trouve le chauffe-eau, est considérée comme une constante à une valeur de 21 degrés Celsius.

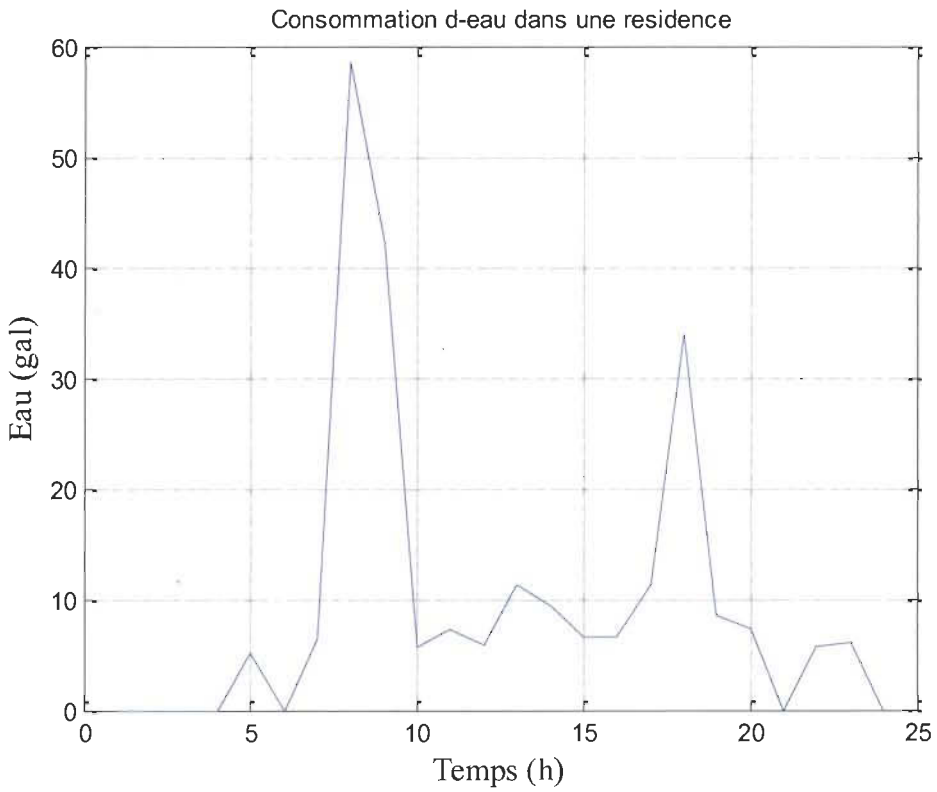


Figure 4-3 Profil typique de consommation d'eau chaude

La température de l'eau d'entrée est variable en tout temps comme est présenté dans la Figure 4-4, selon Statistique Canada dans [115].

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

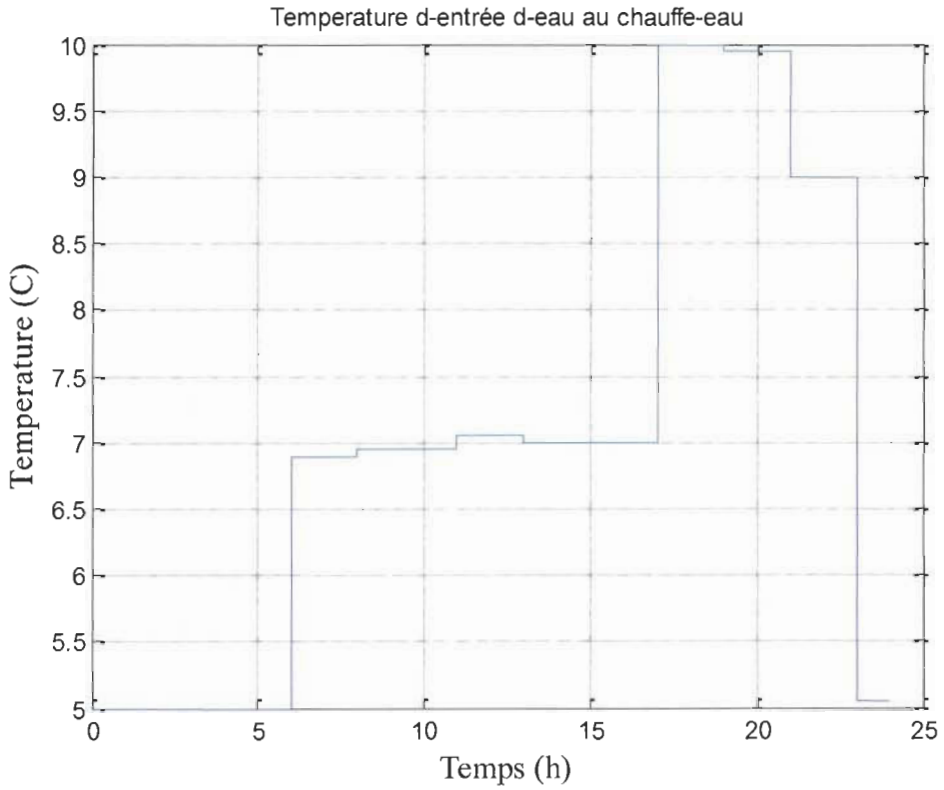


Figure 4-4 Température de l'eau à l'entrée du chauffe-eau, données prises de [115].

La Figure 4-5 présente les résultats des simulations : la consommation de puissance active du chauffe-eau dans le premier graphe et la température de l'eau dans le deuxième. On remarque qu'il y a des pics au niveau de la puissance active qui correspondent aux pics de la température de l'eau. Ce comportement est dû au fait que normalement, et dans ce modèle, les chauffe-eaux résidentiels ont un contrôleur de température par hystérésis (On-Off).

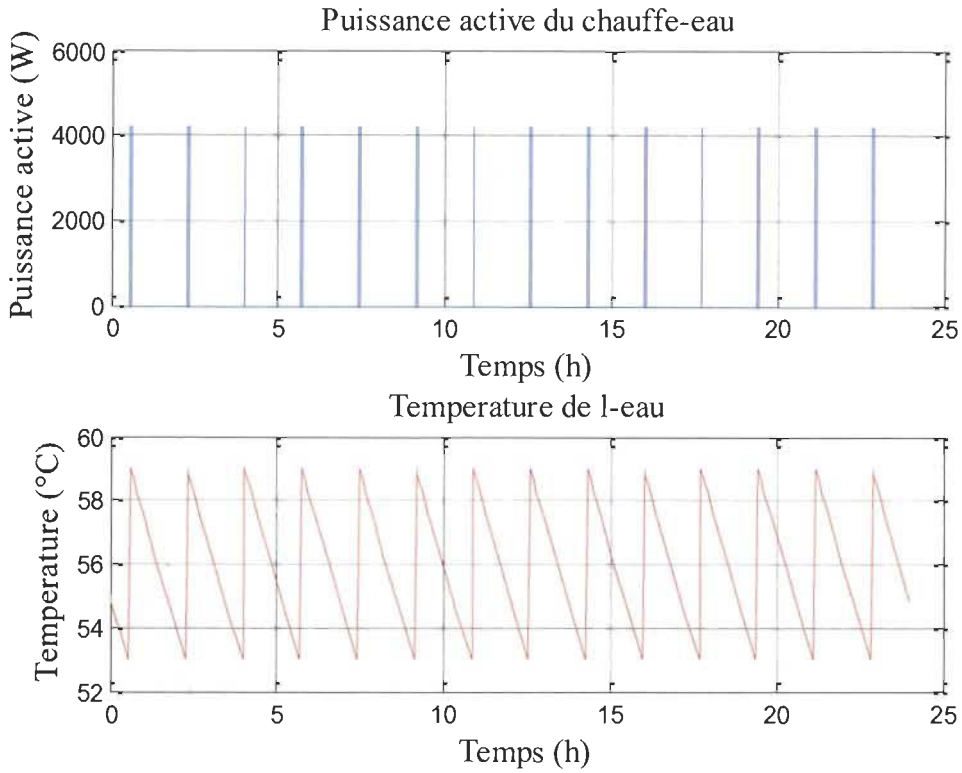


Figure 4-5 Puissance active consommée et température de l'eau

4.1.2 *Modèle REM thermique du chauffe-eau*

Comme il a été mentionné dans la section précédente, le chauffe-eau est représenté par un bilan énergétique où il y a des pertes dans le système sous forme de chaleur qui sont traduites par le flux d'entropie (ΔS). La Figure 4-6 présente l'élément de conversion qui relie la puissance électrique provenant des sources d'énergie et le modèle thermique. Le flux d'entropie ΔS qui représente la somme des pertes dans le chauffe-eau, il est présenté comme suit:

$$\Delta S = \Delta S1 + \Delta S2 \tag{4-2}$$

où :

$$\Delta S1 = \frac{C_p W_D(t)\left(T_W(t) - T_{in}(t)\right)}{T_W} \tag{4-3}$$

$$\Delta S2 = \frac{\frac{A}{R}(T_W(t) - T_{air}(t))}{T_W} \tag{4-4}$$

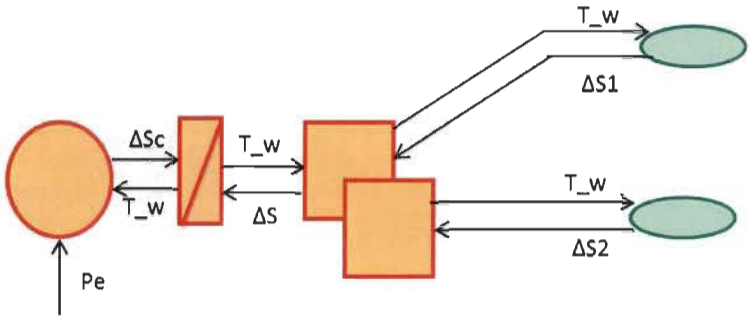


Figure 4-6 Modèle REM du chauffe-eau

4.2 Structure de commande pour le chauffe-eau

La structure de commande pour le chauffe-eau consiste en l'inversion de l'élément d'accumulation. Le premier pas est déterminé par la chaine de réglage, où on considère les variables de référence (T_{ref}) et les vecteurs de mesure (ΔS et T_W). L'entrée contrôlée dans ce cas est la puissance électrique du chauffe-eau (Pe). L'élément d'accumulation est inversé en utilisant un correcteur PI pour assurer une température de l'eau égale à celle de la référence. La Figure 4-7 présente le schéma blocs pour le contrôle de la température de l'eau dans le réservoir du chauffe-eau :

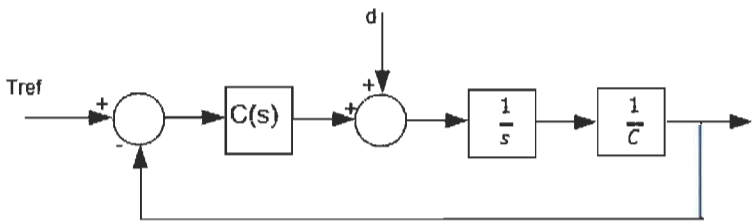


Figure 4-7 Schéma-bloc du contrôleur PI.

La Figure 4-8 montre la REM pour le chauffe-eau avec la structure de contrôle. La variable à estimer est la puissance électrique de référence (Pe) nécessaire pour maintenir la température de référence T_{ref}.

$$P_{eref} = \left[P + I\frac{1}{s} * \left(T_{ref} - T_W\right)\right] \tag{4-5}$$

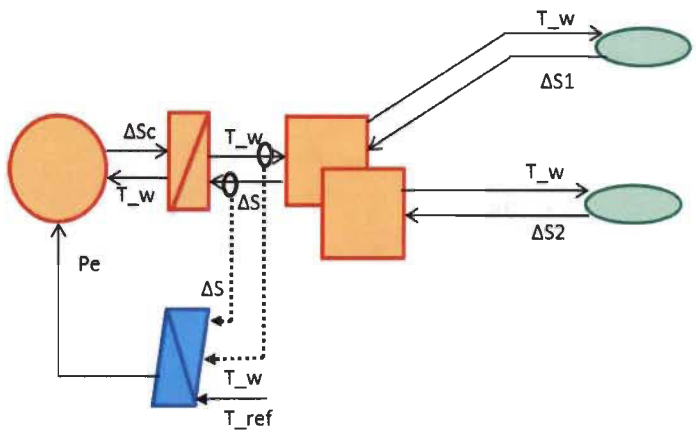


Figure 4-8 REM du chauffe-eau avec la structure de contrôle.

La Figure 4-9 montre que la température de l'eau est bien contrôlée en utilisant la structure de commande de la REM par rapport à la modélisation faite dans la première section (voir Figure 4-5). En effet, on remarque la disparition des pics de puissance ainsi que celles de la température, dû à l'utilisation d'un contrôle PI de la température en utilisant la REM au lieu d'utiliser le contrôleur par hystérésis. De plus, on constate que la puissance active du chauffe-eau a varié afin de maintenir une température d'eau constante. Pour reproduire dans une application réelle la suppression de pics, il est nécessaire d'intégrer un circuit de modulation de puissance (MLI), de cette façon on assure la puissance moyenne fournie à la charge.

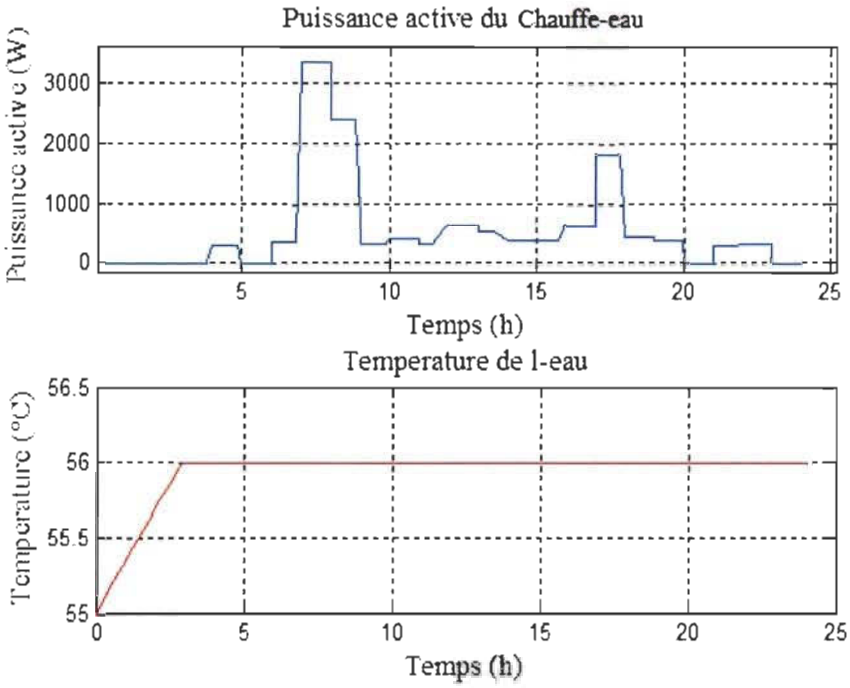


Figure 4-9 Puissance active moyenne consommée par le chauffe-eau et température de l'eau.

4.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation multi-physique d'un système de chauffage d'eau résidentiel typique Canadien en utilisant la représentation énergétique macroscopique (REM) comme outil de modélisation.

L'objectif était de modéliser les caractéristiques des composants du chauffe-eau et de proposer une structure de commande de la température de l'eau. La structure proposée utilise un contrôle PI et un circuit de modulation de puissance (circuit MLI); ce qui permet de faire un contrôle assez précis de la température de l'eau et de la puissance moyenne consommée par le chauffe-eau.

Ce travail a permis de visualiser de façon globale la possibilité de réaliser une gestion au niveau local à travers la modélisation des charges résidentielles énergivores (dans ce cas, le chauffe-eau).

Chapitre 5 - Approximation de Taylor du modèle polynomial: application aux charges résidentielles

Ce chapitre présente les résultats de simulations et de validation expérimentale de la comparaison entre le modèle polynomial (modèle ZIP) et le modèle proposé nommé « modèle polynomial par approximation de séries de Taylor ». La suite de ce chapitre est divisée selon la répartition présentée dans la Figure 5-1. La première étape comporte la sélection et l'analyse du système physique, dans ce cas, les charges électriques d'intérêt. La deuxième étape consiste en l'acquisition et l'analyse des données. La troisième étape comprend l'élection d'un modèle statique et la proposition d'un nouveau modèle ainsi que les résultats de la comparaison entre ces deux. Finalement, l'évaluation des algorithmes d'identification des paramètres pour les modèles polynomial ZIP et polynomial par approximation de séries de Taylor sont présentés.

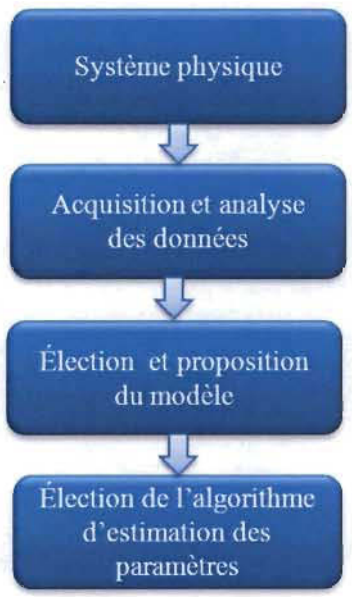


Figure 5-1 Schéma des étapes du travail de recherche

Le système physique correspond aux charges de type résidentiel. Conformément à l'analyse où chaque appareil à la maison, peut être décrit comme des combinaisons de composantes résistives, capacitives, et /ou inductives, les charges considérées dans cette étude ont été déterminées comme suit. Premièrement, les charges de type résistif (R). Deuxièmement, les charges avec un composant résistif et capacitif (RC). Troisièmement, les charges avec des composants résistif et inductif (RL). Finalement les charges de type résistif, capacitif et inductif (RLC). Les données à mesurer sont la tension aux bornes et le courant tiré par la charge. L'acquisition des données est réalisée à travers le système développé par le groupe de recherche présenté dans [17].

Le modèle d'intérêt dans cette étude est le modèle polynomial ou ZIP (section 3.3.1). Le modèle proposé par approximation de séries de Taylor est expliqué dans la section 5.2. Les algorithmes d'estimation des paramètres utilisés sont : l'algorithme d'inversion de matrice pour l'estimation avec de données théoriques; l'algorithme LMS pour l'estimation hors-ligne grâce à sa simplicité et l'algorithme RLS pour l'estimation en ligne dû à sa rapide convergence, sa récursivité et le bas coût computationnel par rapport aux autres algorithmes d'estimation des paramètres comme par exemple le filtre de Kalman.

5.1 Analyse des données

La figure 5-2 présente un schéma du modèle pour représenter le système considéré qui correspond à une charge électrique. L'intérêt est de caractériser le profil de consommation des puissances active et réactive par rapport aux variations de la tension du réseau dans l'installation résidentielle.

Rapport-Gratuit.com

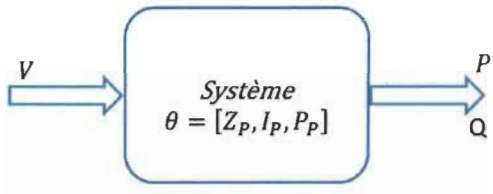


Figure 5-2 Représentation du système.

Pour ces travaux, on a utilisé deux groupes de données dont les premières sont prises du travail présenté dans [116], [117] avec des données théoriques, permettant de voir les résultats des modèles ZIP et celui par approximations de séries de Taylor.

Le deuxième groupe de données a été pris avec le système de mesure développé par le groupe de recherche [118], la fréquence d'échantillonnage dans ce travail est 1Hz vu notre intérêt à la surveillance de l'état stable de la puissance de la charge. Les données prises correspondent aux charges suivantes : (1) charge de type résistif (R) (2) charge de type résistif et capacitif (RC) (3) charge de type résistif et inductif (RL) et (4) charge de type résistif, capacitif et inductif (RLC).

5.1.1 *Analyses de linéarité*

La première analyse des données dans le cadre de ce travail correspond à la vérification de la linéarité du système qui est représenté par le groupe de données expérimentales. Cette vérification comprend le principe de superposition et d'homogénéité.

Principe de superposition : la réponse $y(n)$d'un système linéaire à une entrée $x(n)$ composée par la combinaison linéaire de plusieurs entrées (voir équation 5-1) est la somme des réponses $y_k(n)$ élémentaires à chacune des entrées individuelles.

$$x(n) = \sum_{k=1}^{n} \alpha_k x_k(n) \tag{5-1}$$

$$y(n) = \sum_{k=1}^{n} \alpha_k y_k(n) \tag{5-2}$$

Principe d'homogénéité : un système vérifie le principe d'homogénéité si pour une entrée $\alpha x(n)$, la sortie est donnée par $\alpha y(n)$ [28].

5.1.2 *Analyses de corrélation*

L'analyse de corrélation de Pearson est faite entre les valeurs de puissance active et réactive et la tension d'alimentation de la charge. Cette analyse quantifie l'intensité de la relation entre ces variables, c'est-à-dire que le changement dans la tension soit dû au fonctionnement de la charge lors de l'analyse. La relation entre la tension et la puissance active est définie comme suit:

$$r_{vp} = \frac{COV(V,P)}{\sigma V \sigma P} \tag{5-3}$$

où $COV(V,P)$ est la covariance entre la tension et la puissance active ou réactive, σ_V et σ_P sont les écarts types pour la tension et la puissance active respectivement. La même analyse est faite sur la tension et la puissance réactive. L'analyse de corrélation est toujours donnée comme $-1 \leq r \leq +1$. Lorsque cette analyse n'est pas proche de 1 ou -1 le processus d'identification des paramètres ne démarre pas. Cette analyse est pertinente pour lier les changements dans la puissance active et réactive à la connexion d'une charge au réseau électrique.

5.2 Proposition du modèle polynomial par approximation de séries de Taylor

La série de Taylor est un développement en séries d'une fonction autour d'un point. Cet outil mathématique permet de représenter une fonction réelle, continue et différenciable à une ou plusieurs variables [119]. Cet outil a été appliqué dans différents domaines de l'ingénierie incluant le contrôle, reconnaissance de voix, etc. [120]–[122]. Dans le cadre de

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

ce travail, nous proposons un modèle basé sur le développement de la série de Taylor pour représenter les caractéristiques statiques d'une charge résidentielle. Une comparaison avec le modèle ZIP sera également étudiée et présentée. Le développement en séries de Taylor d'une fonction autour d'un point « a » est présenté dans l'équation (5-4):

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^n(a)}{n!}(x-a)^n = f(a)(x-a) + \frac{f''(a)}{2!}(x-a)^2 + \cdots + \frac{f^n(a)}{n!}(x-a)^n \quad (5\text{-}4)$$

Le point de départ pour appliquer le développement en séries de Taylor est d'estimer la puissance active et réactive à partir des variations de la tension du réseau générées à la connexion d'une charge. Les équations de deuxième ordre pour les puissances active et réactive du modèle de Taylor proposé sont présentées ci-dessous :

$$P(V) = P(V_0) + P'(V_0)(V - V_0) + \frac{P''(V_0)}{2!}(V - V_0)^2 \quad (5\text{-}5)$$

$$Q(V) = Q(V_0) + Q'(V_0)(V - V_0) + \frac{Q''(V_0)}{2!}(V - V_0)^2 \quad (5\text{-}6)$$

Conformément (5-5) et (5-6), les paramètres à identifier sont :

$$\theta = \left[P(V_0) \;\; P'(V_0) \;\; \frac{P''(V_0)}{2!}\right] \quad (5\text{-}7)$$

$$\varphi = \left[Q(V_0) \;\; Q'(V_0) \;\; \frac{Q''(V_0)}{2!}\right] \quad (5\text{-}8)$$

Contrairement au modèle ZIP, l'entrée du modèle proposé est la différence entre la valeur actuelle de la tension (V) et la tension nominale (V_0). Les valeurs nominales des puissances (P_0) et (Q_0) sont cherchées comme composantes des paramètres dans ce modèle. Ceci assure un avantage sur le modèle ZIP vu que nous n'avons pas besoin d'une connaissance a priori des valeurs nominales des puissances active et réactive de chaque charge.

5.2.1 *Équivalence entre les paramètres du modèle par approximation de séries de Taylor et ceux du modèle ZIP*

Le modèle par approximation de séries de Taylor de deuxième ordre peut être écrit comme suit:

$$
\begin{aligned}
P &= \theta_0 + \theta_1(V - V_0) + \theta_2(V - V_0)^2 \\
P &= \theta_0 + \theta_1 V - \theta_1 V_0 + \theta_2\left(V^2 - 2VV_0 + V_0^{\,2}\right) \\
P &= \theta_0 - \theta_1 V_0 + \theta_2 V_0^{\,2} + \left(\theta_1 - 2V_0\theta_2\right)\cdot V + \theta_2 V^2
\end{aligned}
\tag{5-9}
$$

Le modèle ZIP est formulé comme suit:

$$
P = {}_{P_0}P_p + \frac{{}_{P_0}I_p}{V_0}V + \frac{{}_{P_0}Z_p}{V_0^{\,2}}V^2 \tag{5-10}
$$

En faisant l'analogie entre les deux modèles, on remarque que le premier paramètre du modèle de Taylor en termes du modèle ZIP est:

$$
\theta_2 = \frac{P_0 Z_p}{V_0} \tag{5-11}
$$

Le deuxième paramètre du modèle par approximation de séries de Taylor en termes du modèle ZIP est:

$$
\begin{aligned}
\theta_1 - 2V_0\theta_2 &= \frac{{}_{P_0}I_p}{V_0} \\
\theta_1 &= \frac{{}_{P_0}I_p}{V_0} + 2\frac{{}_{P_0}Z_p}{V_0} \\
\theta_1 &= \frac{{}_{P_0}}{V_0}\left(I_p + 2Z_p\right)
\end{aligned}
\tag{5-12}
$$

Le troisième paramètre du modèle par approximation de séries de Taylor correspondant au modèle ZIP est:

$$\theta_0 = P_0(P_p + I_p + P_p) \tag{5-13}$$

De la même façon, les coefficients du modèle ZIP peuvent être écrits en fonction des coefficients du modèle par approximation de séries de Taylor. Pour le premier coefficient du modèle ZIP, on a:

$$\theta_2 = \frac{P_0 Z_p}{V_0}$$

$$Z_p = \frac{\theta_2 V_0}{P_0} \tag{5-14}$$

Le deuxième paramètre du modèle ZIP correspondant au modèle par approximation de séries de Taylor peut être écrit comme suit:

$$\theta_1 - 2V_0\theta_2 = \frac{P_0 I_p}{V_0}$$

$$\frac{P_0 I_p}{V_0} = \theta_1 - 2V_0\theta_2$$

$$I_p = \frac{V_0}{P_0}\left(\theta_1 - 2V_0\theta_2\right) \tag{5-15}$$

Le troisième paramètre du modèle ZIP correspondant au modèle par approximation de séries de Taylor est :

$$\theta_0 - \theta_1 V_0 + \theta_2 V_0^2 = P_0 P_p$$

$$P_0 P_p = \theta_0 - \theta_1 V_0 + \theta_2 V_0^2$$

$$P_p = \frac{\theta_0 - \theta_1 V_0 + \theta_2 V_0^2}{P_0} \tag{5-16}$$

Le Tableau 5-1 résume les paramètres pour le modèle ZIP en termes des paramètres du modèle par approximation de séries de Taylor et vice-versa. Ceci permettra de faire la comparaison directe entre les deux modèles dans la section de simulation et validation à venir. Il faut considérer qu'il faut maintenir la même disposition des paramètres dans chaque modèle afin d'appliquer l'équivalence. La même équivalence est valide pour les paramètres de la puissance réactive.

Tableau 5-1 Équivalence entre les paramètres du modèle ZIP et du modèle par approximation de séries de Taylor

	Z_p	I_p	P_p
Modèle ZIP	$Z_p = \frac{\theta_2 V_0^2}{P_0}$	$I_p = \frac{V_0}{P_0}\left(\theta_1 - 2V_0\theta_2\right)$	$P_p = \frac{\theta_0 - \theta_1 V_0 + \theta_2 V_0^2}{P_0}$
Modèle par approximation en séries de Taylor	θ_0	θ_1	θ_2
	$\theta_0 = P_0\left(P_p + I_p + P_p\right)$	$\theta_1 = \frac{P_0}{V_0}\left(I_p + 2Z_p\right)$	$\theta_2 = \frac{P_0 Z_p}{V_0}$

5.3 Estimation des paramètres

De façon générale, le système peut être représenté par les équations (5-17) et (5-18) pour caractériser les puissances active et réactive par rapport aux variations de la tension :

$$\hat{P}(k) = V(k)\vec{\theta}(k) + \vec{\varepsilon} \tag{5-17}$$

$$\hat{Q}(k) = V(k)\vec{\varphi}(k) + \vec{\varepsilon} \tag{5-18}$$

où V est la matrice d'entrée, θ est le vecteur des paramètres et ε est l'erreur provenant du modèle. Si P et Q sont définies par n valeurs comme suit:

$$\hat{P}(k) = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_n \end{bmatrix} \tag{5-19}$$

$$Q(k) = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_n \end{bmatrix} \tag{5-20}$$

θ est défini par le nombre de paramètres, qui est dans ce cas trois pour le modèle ZIP et le modèle par approximation de séries de Taylor :

$$\theta = \begin{bmatrix} \theta_0 \\ \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} \tag{5-21}$$

Les paramètres de la puissance réactive sont:

$$\varphi = \begin{bmatrix} \varphi_0 \\ \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix} \tag{5-22}$$

L'entrée *V* peut être définie comme suit:

$$V(k) = \begin{pmatrix} V_{11} & V_{12} & \cdots & V_{1p} \\ V_{21} & V_{22} & \cdots & V_{2p} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ V_{n1} & V_{n2} & \cdots & V_{np} \end{pmatrix} \tag{5-23}$$

Les équations (5-17) et (5-18) sont linéaires par rapport à θ. Ainsi, les groupes de paramètres des modèles ZIP et Taylor sont estimés en utilisant les algorithmes *LMS* et *RLS*. Les erreurs des algorithmes *LMS et RLS* à minimiser sont présentés dans l'équation (3-23). La mise à jour du vecteur des paramètres se fait comme suit:

$$\theta(k+1) = \theta(k) + \mu * e(k) * V(k) \tag{5-24}$$

Où:

$$e(k) = P(k) - \hat{P}(k) \tag{5-25}$$

où μ est connu comme le pas de convergence de l'algorithme. Ceci est calculé à partir des valeurs moyennes propres de la matrice de corrélation des premières données de puissance de la charge.

L'estimation de puissance en utilisant l'algorithme *RLS* est donnée par :

$$\begin{gathered} Ps(k) = \theta^T(k) * V(k) \\ \theta(k+1) = \theta(k) + K * \left(P(k) - \hat{P}(k)\right) \end{gathered} \tag{5-26}$$

Où :

$$p = \lambda^{-1} * p - (\lambda^{-1} * K * X^T * p) \tag{5-27}$$

$$K = \frac{\lambda^{-1} * p * X}{(1 + \lambda^{-1} * X * p * X^T)} \tag{5-28}$$

où λ est connu comme le facteur d'oubli qui prend toujours une valeur positive $0 < \lambda \leq 1$. Le cas particulier λ=1 correspond à une mémoire infinie.

5.4 Comparaison des estimations en utilisant les modèles ZIP et celui par approximation de séries de Taylor

La comparaison de la performance des modèles ZIP et par approximation de séries de Taylor est réalisée en utilisant *« Symmetric Mean absolute percentage error : SMAPE»* et l'erreur quadratique moyenne «*Mean square error: MSE*». Le premier est utilisé pour comparer la précision de la puissance estimée et la puissance réelle. Le deuxième est utilisé pour comparer la somme de l'erreur quadratique moyenne sur chaque paramètre. Le SMAPE peut être défini comme suit:

$$SMAPE = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\frac{\left|P(k)-\widehat{P}(k)\right|}{P(k)+\widehat{P}(k)} \tag{5-29}$$

Le MSE est définie comme suit:

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\left[P(k)-\hat{P}(k)\right]^2 \tag{5-30}$$

5.5 Validation par simulation

Afin de comparer le modèle ZIP et le modèle par approximation de séries de Taylor que nous avons proposé, un modèle sous Simulink a été réalisé (Figure 5-4 Schéma sous Simulink pour la création des données à partir des informations dans [116]). Les données des paramètres de charges réelles ont été prises de [116] et de [117]. Les données de puissance active et réactive et la tension ont été créées dans le même modèle sous Simulink. L'estimation des paramètres dans le modèle sous Simulink est faite en utilisant l'algorithme d'inversion de matrice. La validation par simulation a été faite en deux parties. La première partie (section 5.5.1) correspond à l'estimation de la puissance active et de la puissance réactive par rapport à des variations imposées de ±23% sur la valeur de la tension d'alimentation. La deuxième partie (section 5.5.2) est l'estimation des puissances active et réactive sous conditions de variations réelles de la tension du réseau.

5.5.1 *Simulations sous variations imposées de la tension*

Le modèle ZIP est largement utilisé dans la littérature [117] pour faire des analyses de stabilité de tension. Ainsi, son bon fonctionnement a été démontré particulièrement avec des variations de tension imposées. La charge présentée comme exemple dans cette première partie correspond aux données prises dans [116] pour un réfrigérateur. Les

résultats de simulation pour différentes charges résidentielles ont été également enregistrés dans le Tableau 5-2. Les variations de tension imposées, en simulation, sont entre 80V et 130V pour une tension nominale de 110V. La Figure 5-3 présente les courbes P-V (graph 1) et Q-V (graph 2) qui permettent de visualiser les comportements de la puissance active et réactive sous les variations de tension. La tension est normalisée par rapport à la valeur de la tension nominale (110V), qui correspond au point d'opération dans des conditions normales du réseau électrique.

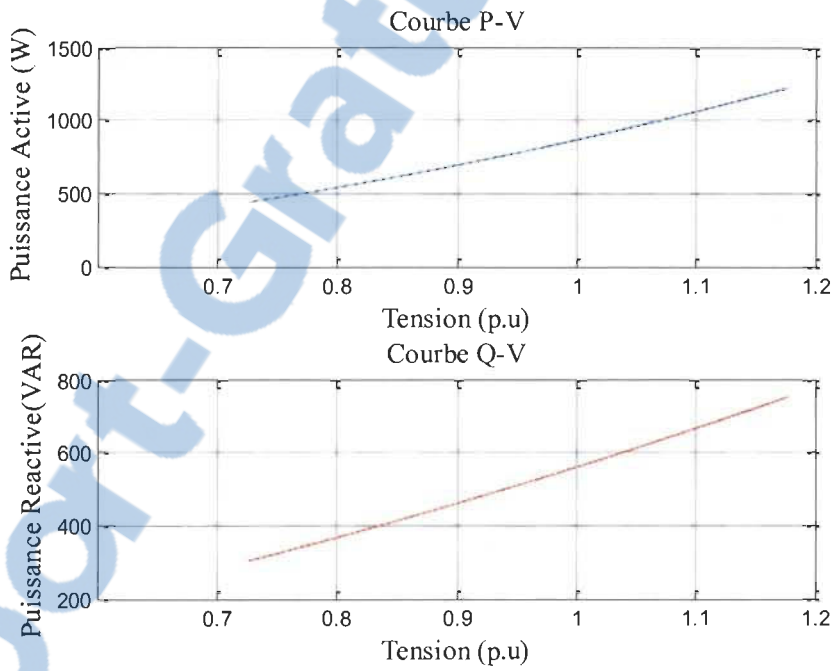
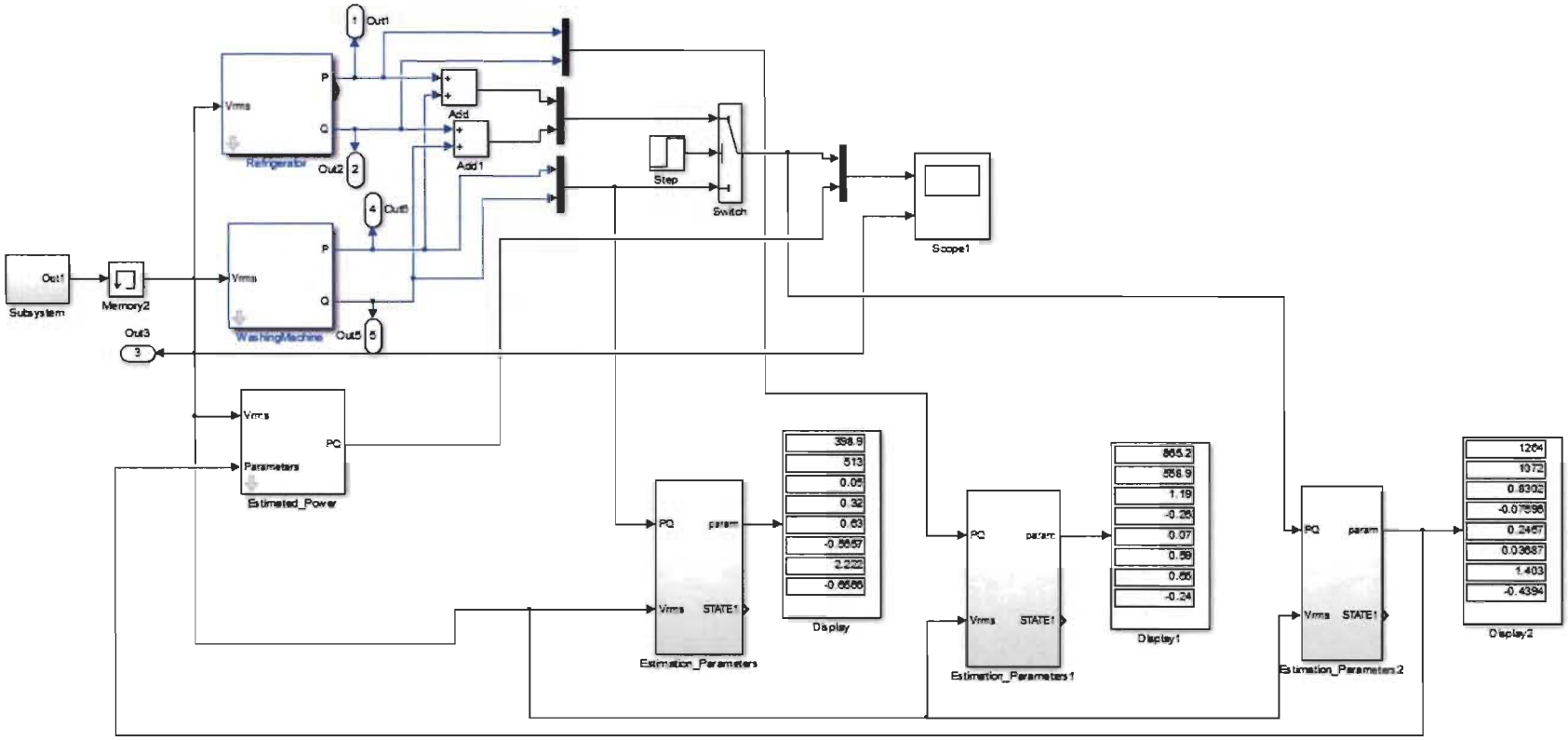


Figure 5-3 Courbes PV et QV.

La Figure 5-5 présente les résultats de l'estimation des profils de la puissance active et la puissance réactive en utilisant le modèle ZIP et le modèle par approximation de séries de Taylor. On remarque une excellente estimation obtenue avec ces deux modèles et correspondant à une plage de variation de tension entre 72% et 118% de la valeur nominale d'opération du réseau.

Rapport-Gratuit.com



Source de données:
Les M. Hajagos and Behnam Danai, Laboratory Measurements and Models of Modern Loads and Their Effect on Voltage Stability Studies
IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 2, May 1998

Figure 5-4 Schéma sous Simulink pour la création des données à partir des informations dans [116]

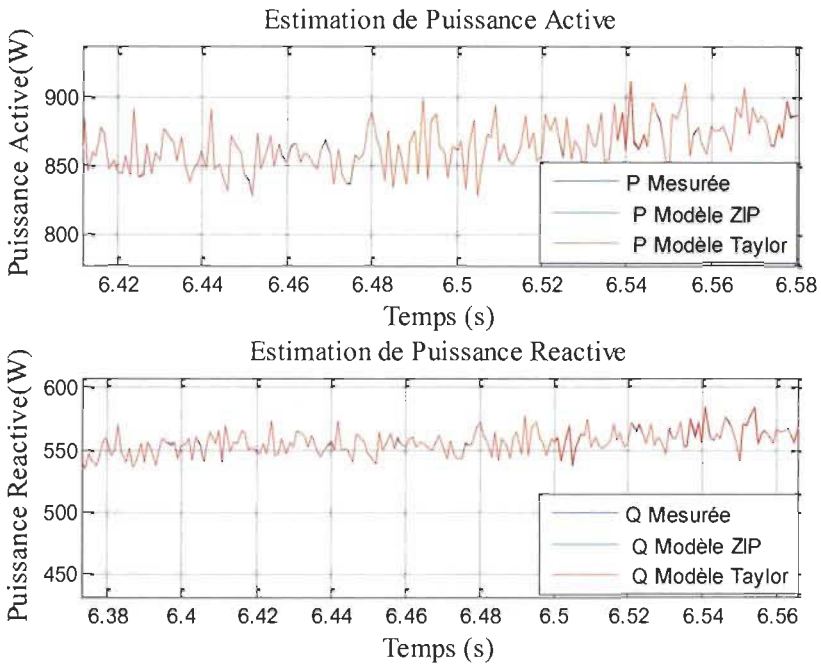
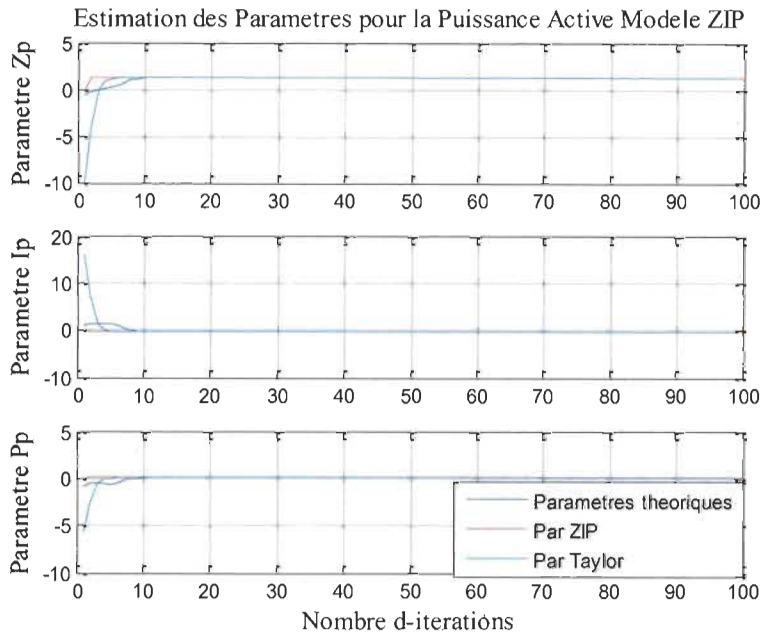


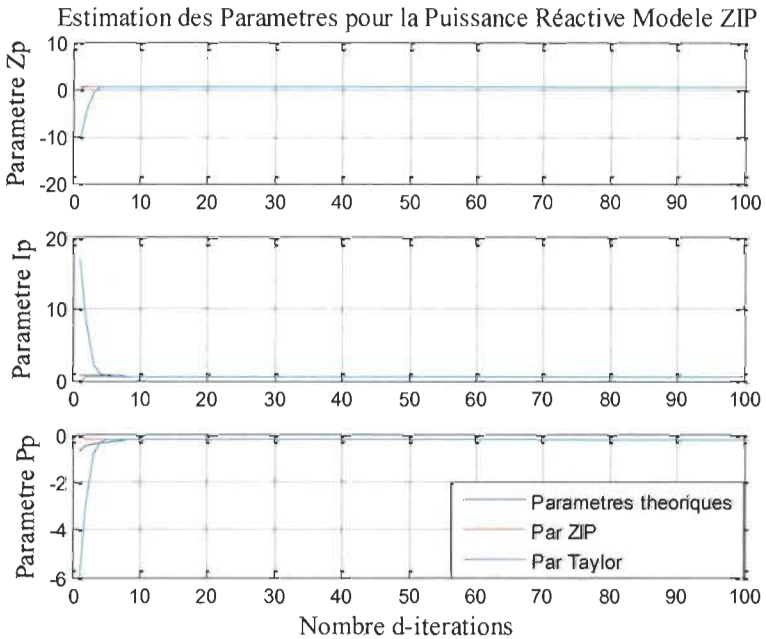
Figure 5-5 Estimation de puissances active et réactive

La figure 5-6 montre l'estimation des paramètres de la puissance active par le modèle ZIP et celui par approximation de séries de Taylor en utilisant l'algorithme d'inversion de matrice. Les paramètres nommés théoriques ont été pris de [116]. L'équivalence des paramètres présentée dans la section 5.2.1 et résumée dans le Tableau 5-1 a été utilisée pour transformer les paramètres du modèle de Taylor en termes des paramètres du modèle ZIP. Celle-ci permet de faire une comparaison directe entre les résultats donnés pour chaque estimation. On remarque aussi que l'estimation des paramètres avec les deux modèles converge rapidement vers les valeurs réelles des trois paramètres sous les conditions de simulation expliquées.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES



(a)



(b)

Figure 5-6 Estimation des paramètres pour la puissance active (a) et la puissance réactive (b) par le modèle ZIP et par approximation de séries de Taylor

D'après les résultats présentés dans cette partie sous des variations de tension imposées entre 80V et 130V, qui correspond à une variation de 40% de la valeur nominale de la

tension du réseau, on remarque que le modèle ZIP et le modèle proposé par approximation de séries de Taylor permettent une bonne estimation avec une bonne performance.

Cependant, il est clair que selon des standards [123], [124], la variation de la tension nominale du réseau doit être limitée à +/-5% de sa valeur nominale. Ainsi, imposer des variations sur la tension d'alimentation du réseau électrique dans une installation résidentielle n'est pas possible. Pour cette raison, nous sommes intéressés à travailler avec les variations réelles de la tension du réseau. Une simulation pour vérifier le comportement des modèles sous des variations réelles de la tension du réseau est nécessaire. Ces résultats sont présentés dans la section qui suit.

5.5.2 *Simulations sur des conditions réelles de variation de la tension*

La deuxième analyse réalisée permet d'étudier l'estimation des puissances active et réactive en fonction des variations réelles de la tension du réseau. La Figure 5-7 présente les courbes pour la puissance active et la puissance réactive par rapport aux variations de la tension d'alimentation. On remarque que la plage de variation de la tension créée correspond à des variations des conditions normales selon les restrictions définies par des normes et standards de qualité de l'alimentation électrique [123], [124].

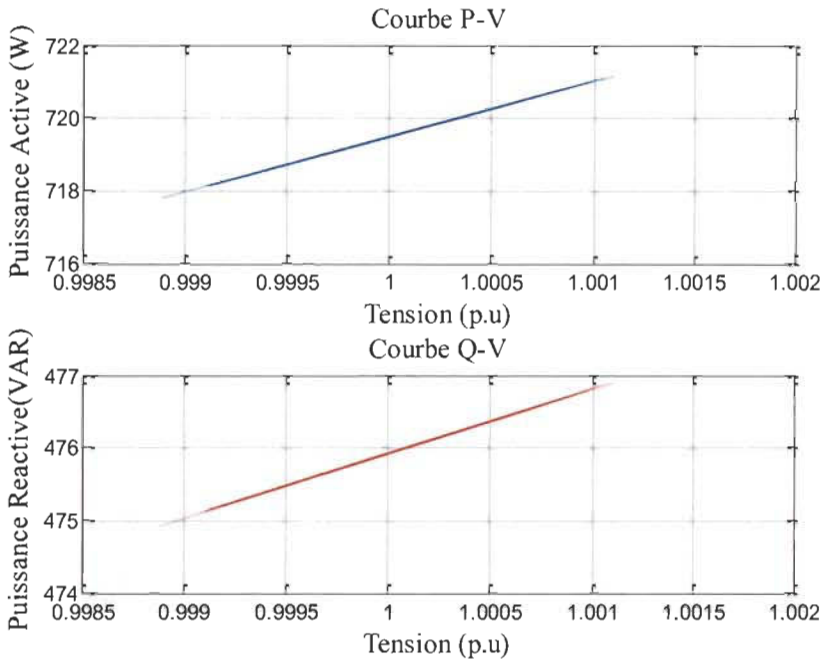
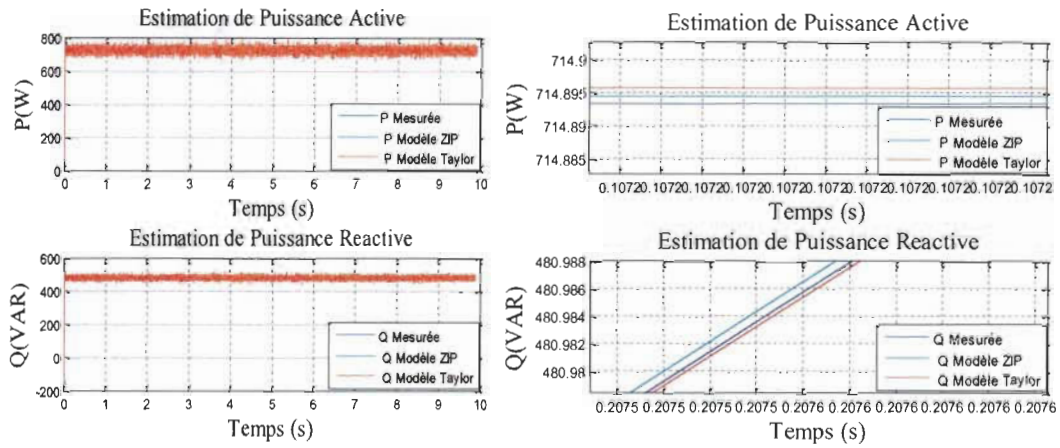


Figure 5-7 Courbes P-V et Q-V pour le réfrigérateur dans [116].

La Figure 5-8 (a) présente les résultats de l'estimation de la puissance active (graph 1) et réactive (graph 2) en utilisant le modèle ZIP et le modèle par approximation de séries de Taylor. La Figure 5-8 (b) est un zoom faite sur la Figure 5-8 (a). Les résultats de l'estimation des courbes de profil de puissances sont excellents avec les deux modèles. L'estimation des paramètres est montrée dans le Tableau 5-2. Le tableau 5-2 présente les valeurs des paramètres des charges prises de [116], [117]. Pour chaque groupe de paramètres, les données par simulation en utilisant l'outil Simulink ont été construit, tel que expliqué dans la section 5.5. Les paramètres ont été estimés en utilisant l'algorithme d'inversion de matrice pour la puissance active et la puissance réactive à travers le modèle ZIP et le modèle proposé par série de Taylor.

Pour pouvoir faire une comparaison directe entre les paramètres du modèle ZIP et du modèle par approximation de séries de Taylor, l'équivalence de paramètres expliqués dans

la section 5.2.1 a été appliquée. Ainsi, on remarque que malgré la bonne estimation de la courbe de puissance faite par le modèle ZIP, les valeurs des paramètres estimés ne sont pas cohérents et sont loin de la valeur théorique des paramètres des charges données par [116]. Par contre l'estimation des paramètres avec le modèle par approximation en séries de Taylor sont plus proches des valeurs réelles des paramètres de la charge.



(a) (b)

Figure 5-8 (a) Estimation de puissances active et réactive. (b) Zoom sur figure 5-8 (a)

Tableau 5-2 Résultats d'estimation des paramètres de P et Q avec modèles ZIP et Taylor sous des variations réelles de la tension nominale, donnés des charges pris dans [116], [117].

Charge	Puissance active									Puissance réactive								
	Valeurs réelles			ZIP			Approximation de TAYLOR			Valeurs réelles			ZIP			Approximation de TAYLOR		
	Zp	Ip	Pp	Zp	Ip	Pp	Zp	Ip	Pp	Zq	Iq	Pq	Zq	Iq	Pq	Zq	Iq	Pq
Aspirateur	1.18	-0.38	0.2	0.33	0.33	0.33	1.18	-0.4	0.19	4.1	-5.87	2.77	20.1	-19.1	0.01	4.2	-5.9	2.46
Cafetière	0.13	1.62	-0.75	0.33	0.39	0.34	0.14	1.61	-0.73	3.89	-6	3.11	0.01	0.87	-0.00	3.9	-5.9	3.14
Chargeur d'ordinateur	-0.28	0.5	0.78	-0.19	0.7	0.58	-0.29	0.53	0.76	-0.37	1.24	0.13	-0.6	1.3	0.28	-0.37	1.3	0.12
Climatiseur	1.17	-1.8	1.66	0.33	0.3	0.33	1.14	-1.8	1.6	15.6	-27.1	12.4	506.9	-23.4	-529	15.3	-27	12.3
Élément chauffant de la sécheuse	0.96	0.05	-0.01	0.33	0.3	0.34	0.95	0.05	-0.01	0	0	0	---	---	---	0	0	0
Laveuse	0.05	0.31	0.63	0.33	0.33	0.33	0.04	0.3	0.59	-0.56	2.20	-0.65	5.1	-9.8	4.2	-0.5	2.2	-0.67
Microondes	1.39	-1.96	1.57	0.02	0.9	0.02	1.39	-1.95	1.55	50.1	-93.6	44.4	-138.	121	16.9	49.9	-94	44.5
Moteur de la sécheuse	1.91	-2.23	1.33	0.1	0.8	0.1	1.91	-2.22	1.31	2.51	-2.34	-0.88	103	-110	6.9	2.53	-2.4	-0.8
Réfrigérateur	1.19	-0.26	0.07	2.78	0.01	-2.5	1.21	-0.27	0.06	0.59	0.65	0.24	0.01	-0.3	1.1	0.57	0.6	0.23
Télévision	0.11	-0.17	1.06	0.33	0.33	0.33	0.12	-0.16	1.04	1.58	-1.72	1.14	0.33	0.33	0.34	1.56	-1.7	1.17
Ventilateur	-0.47	1.71	-0.24	0.33	0.33	033	-0.5	1.7	-0.22	2.34	-3.12	1.78	0.33	0.34	0.33	2.31	-3.1	1.8

5.6 Validation expérimentale

Cette section est divisée en quatre parties : la première partie comprend la détermination expérimentale des paramètres pour la puissance active et la puissance réactive des quatre charges d'intérêt, R, RC, RL, et RLC. La deuxième partie présente les résultats de la comparaison de l'estimation hors ligne en utilisant le modèle ZIP et le modèle proposé par séries de Taylor. La troisième partie présente une analyse de l'erreur quadratique moyenne pour l'estimation faite en utilisant les algorithmes LMS et RLS pour les deux modèles. Finalement, la quatrième partie présente les résultats de l'estimation en ligne en utilisant le modèle proposé par séries de Taylor.

5.6.1 *Détermination expérimentale des paramètres de charges*

Une base de données des charges R, RC, RL et RLC a été créée afin de faire la validation expérimentale. Le Tableau 5-3 présente les valeurs nominales des composants des charges utilisées.

Tableau 5-3 Valeurs nominales des composants des charges.

Charge	R (Ohm)	C (μF)	L (mH)
R	60	---	---
RC	60	123	---
RL	60	---	50
RLC	60	60	50

Pour faire la détermination expérimentale des paramètres, les charges sont mises en fonctionnement à différents points d'opération de tension, entre 80V et 130V, c'est-à-dire que pour différentes valeurs de tension, chaque charge a été mise en fonctionnement pour

déterminer ses paramètres. Les données enregistrées correspondent aux profils de la puissance active et de la puissance réactive ainsi que les valeurs nominales des puissances active (P_0) et réactive (Q_0) consommées par les charges à la valeur nominale de la tension du réseau électrique (V_0). Ces données ont été utilisées ensuite pour estimer les paramètres à travers une approximation d'un polynôme de deuxième ordre pour retrouver les paramètres des charges R, RC, RL et RLC. Pour cette raison ces paramètres expérimentaux auront une marge d'erreur qu'on peut accepter dû à cette approximation.

Tableau 5-4 Détermination expérimentale des paramètres du modèle ZIP pour les charges utilisées.

Charge	**Puissance active**			**Puissance Réactive**		
	Zp	Ip	Pp	Zq	Iq	Pq
R	1,2	-0,3	0,12	--------	--------	--------
RC	1,147	-0,225	0,078	1,08	0,05	0,03
RL	1,22	-0,4	0,18	0,7	0,61	-0,31
RLC	1,15	-0,245	0,096	1,16	-0,18	0,02

En utilisant l'équivalence des paramètres (section 5.2.1 et Tableau 5-1), on détermine les paramètres du modèle par approximation de séries de Taylor à partir des paramètres du modèle ZIP (voir Tableau 5-5):

Tableau 5-5 Détermination des paramètres du modèle par approximation de séries de Taylor

Charge	**Puissance active**			**Puissance Réactive**		
	θ1	θ2	θ3	φ1	φ2	φ3
R	206,55	3,91	0,02	--------	--------	--------
RC	178,8	3,39	0,017	-59.16	-1,035	-0,005
RL	167,5	3,16	0,18	67,2	1,25	0.004
RLC	181,68	3,45	0,018	-51,4	-0,95	-0,003

La détermination expérimentale des paramètres des charges considérées, permet d'avoir une idée approximative sur la précision de l'estimation faite par les algorithmes d'estimation des paramètres en utilisant les modèle ZIP et celui par approximation de séries de Taylor.

5.6.2 *Estimation hors-ligne pour les charges R, RC, RL et RLC*

La Figure 5-9 présente les résultats obtenus pour l'estimation de la puissance active d'une charge du type RLC. On présente les résultats obtenus en utilisant les deux modèles ZIP et Taylor avec les deux algorithmes d'estimation de paramètres LMS et RLS. En analysant l'évolution de la puissance active, on constate que les valeurs estimées suivent la même évolution que la mesure et les valeurs obtenues avec les deux modèles sont très proches des valeurs mesurées.

Rapport-Gratuit.com

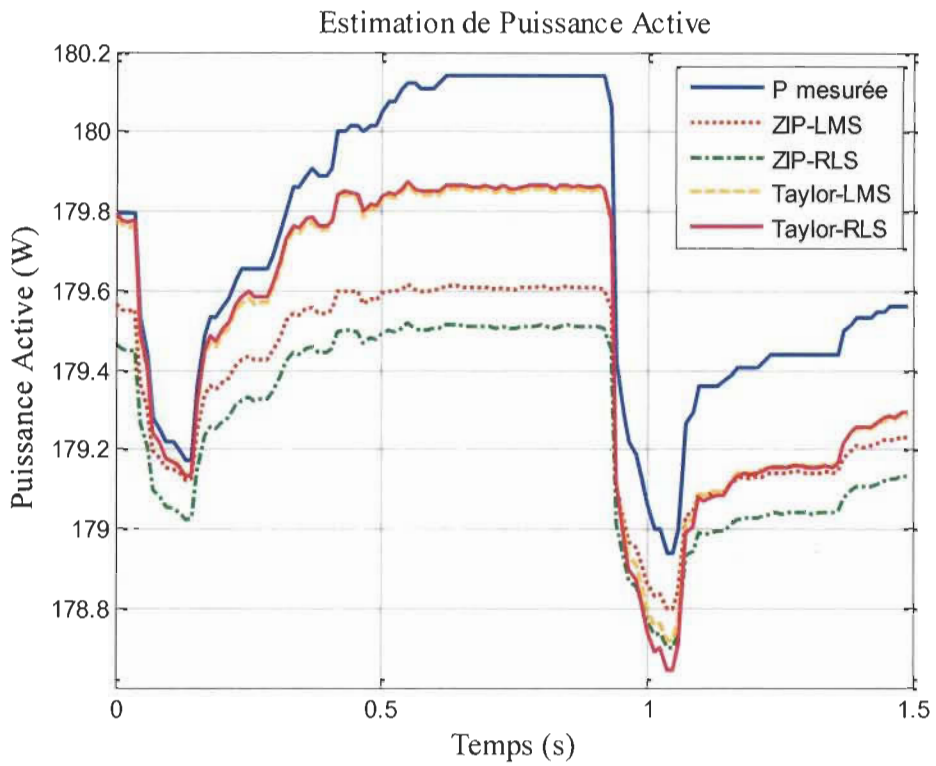


Figure 5-9 Estimation hors ligne de la puissance active pour charge RLC.

Le Tableau 5-6 regroupe les résultats pour les quatre charges en utilisant le modèle ZIP et Taylor avec l'algorithme LMS. Pour une meilleure compréhension lors de la comparaison, nous avons décidé de faire l'équivalence pour les paramètres estimés en utilisant le modèle par approximation de séries de Taylor. On remarque que les paramètres estimés en utilisant le modèle ZIP divergent des vraies valeurs pour les différentes charges malgré le bon suivi du profil de la puissance active qui est présenté dans la Figure 5-9. Contrairement au premier modèle, les résultats de l'estimation avec le modèle par approximation de séries de Taylor sont plus précis et plus proches des valeurs réelles des paramètres obtenus dans la section 5.6.1.

Tableau 5-6 Comparaison des paramètres estimés en utilisant les modèles de ZIP et Taylor avec l'algorithme LMS pour la puissance active.

Charge	**Modèle ZIP**					**Modèle TAYLOR**				
	Zp	Ip	Pp	SMAPE	MSE	Zp	Ip	Pp	SMAPE	MSE

R	0.334	0.333	0.332	3.78e-06	0.1521	1.59	-0.27	0.11	3.75e-06	0.01262
RC	0.333	0.334	0.333	2.07e-06	0.124	1.15	-0.73	0.54	6.64e-07	0.00037
RL	0.333	0.335	0.333	6.63e-06	0.2466	1.3	-0.6	0.3	4.37e-06	0.01327
RLC	0.331	0.334	0.331	9.73e-07	0.496	1.31	-0.52	0.21	2.87e-07	0.00025

Le Tableau 5-7 présente une comparaison des résultats de l'estimation des paramètres de la puissance active par l'algorithme RLS en utilisant les deux modèles ZIP et par approximation de séries Taylor. On remarque que, même en utilisant un algorithme plus complexe et précis comme l'algorithme RLS, il y a un manque de précision au niveau de l'estimation des paramètres avec le modèle ZIP. Par contre, les estimations avec le modèle par approximation de séries de Taylor sont beaucoup plus précises et sont proches de valeurs désirées. La précision des paramètres du modèle par approximation de séries de Taylor estimés par l'algorithme RLS est plus élevée avec l'algorithme LMS et les valeurs trouvées sont plus proches des valeurs présentées dans le Tableau 5-4.

Tableau 5-7 Comparaison des paramètres estimés en utilisant les modèles de ZIP et Taylor avec l'algorithme RLS pour la puissance réactive.

Charge	**Modèle ZIP**					**Modèle TAYLOR**				
	Zp	Ip	Pp	SMAPE	MSE	Zp	Ip	Pp	SMAPE	MSE
R	0.325	0.33	0.341	3.15e-06	0.0116	1.29	-0.41	0.19	2.46e-06	8.4e-3
RC	0.397	0.33	0.267	7.86e-07	3.14e-4	1.2	-0.21	0.09	5.06e-07	3.32e-4
RL	-0.248	0.96	0.281	1.24e-06	1.1e-3	1.47	-0.63	0.16	1.28e-06	1.16e-4
RLC	0	0.99	0	2.84e-06	0.0204	0.98	-0.18	0.1	2.29e-07	1.41e-4

Les résultats de l'estimation des paramètres des modèles ZIP et par approximation de séries Taylor pour la puissance réactive sont présentés par la Figure 5-10, le Tableau 5-8 et le Tableau 5-9. Les résultats du suivi du profil de la puissance réactive sont satisfaisants uniquement pour le modèle de Taylor en utilisant les algorithmes LMS et RLS. Les

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

résultats d'estimation de la courbe de puissance réactive pour le modèle ZIP ne sont pas mauvais mais ceux de Taylor ont une meilleure précision (voir Figure 5-10).

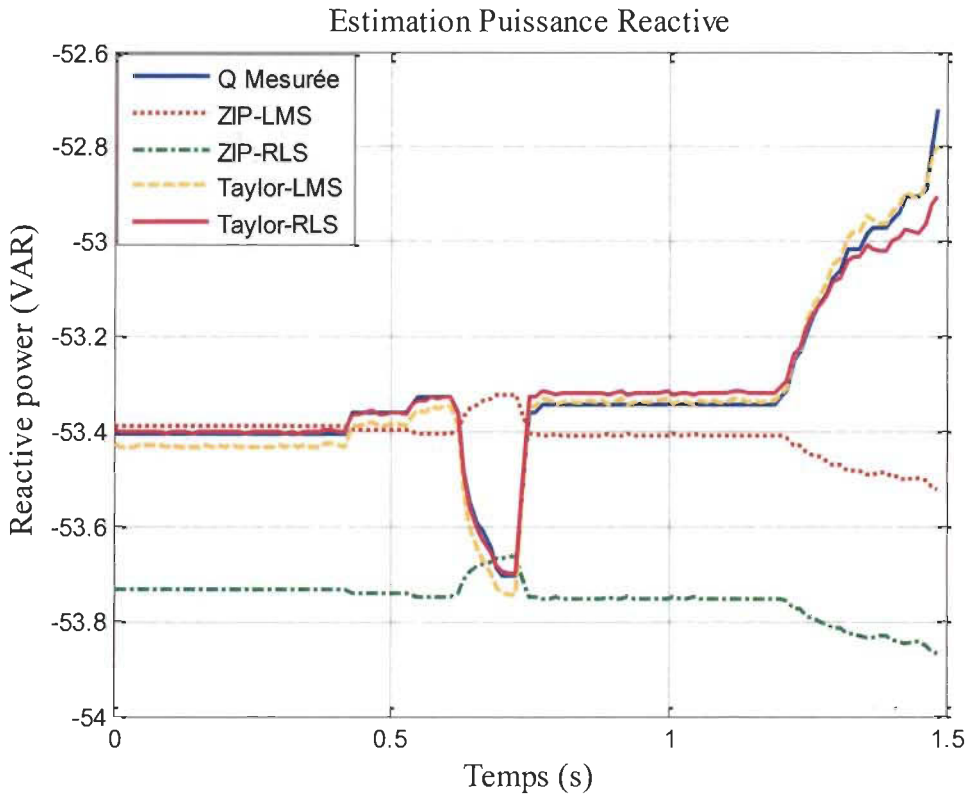


Figure 5-10 Estimation hors ligne de la puissance réactive pour charge RLC.

Les résultats de la comparaison entre les paramètres estimés de la puissance réactive avec le modèle ZIP et de Taylor sont présentés dans le Tableau 5-8 pour l'algorithme LMS et dans le Tableau 5-9 pour l'algorithme RLS. On arrive à la même conclusion qu'avec l'estimation de la puissance active. Les paramètres avec le modèle ZIP ne sont pas bons ni avec l'algorithme LMS ni avec l'algorithme RLS.

On peut ainsi, avec ces analyses, conclure que le modèle ZIP n'est pas adapté pour estimer les paramètres des puissances active et réactive, en utilisant les algorithmes LMS et RLS comme méthodes d'identification de paramètres et considérant des variations de la

tension d'alimentation dans les limites imposés par les normes. Ceci ne permettra pas de caractériser une charge sous les conditions déjà décrites. Le groupe de paramètres estimé dans chacune des charges correspond à une possibilité de plusieurs solutions à l'équation donnée par le modèle ZIP, c'est-à-dire que les informations de la tension sous des variations réelles de la tension ne sont pas suffisantes pour arriver à de bonnes valeurs des paramètres. Ceci explique pourquoi le modèle ZIP fonctionne très bien sous de grandes variations de la tension appliquée sur une charge telle comme a été présentée dans la section 5.5.1.

Tableau 5-8 Comparaison des paramètres estimés en utilisant les modèles de ZIP et Taylor avec l'algorithme LMS.

Charge	**Modèle ZIP**					**Modèle TAYLOR**				
	φ_1	φ_2	φ_3	SMAPE	MSE	φ_1	φ_2	φ_3	SMAPE	MSE
R	-------	-------	-------	--------	------	-----	----	------	-------	------
RC	-50.85	-0.47	-0.001	1.12e-05	0.177	- 54.50	- 1.066	-0.006	4.98e-06	0.101
RL	22.11	0.6	0.0018	1.12e-05	0.177	63.99	1.8	0.0028	1.01e-06	0.0438
RLC	-40.9	-0.45	-0.0014	1.05e-05	0.054	- 53.33	- 1.2	-0.001	1.43e-06	5.6^{e}-4

Tableau 5-9 Comparaison des paramètres estimés en utilisant les modèles de ZIP et Taylor avec l'algorithme RLS.

Charge	**Modèle ZIP**					**Modèle TAYLOR**				
	φ_1	φ_2	φ_3	SMAPE	MSE	φ_1	φ_2	φ_3	SMAPE	MSE
R	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------
RC	-43.52	3.59	37.134	1.46e-05	0.560	-54.33	-1.05	-0.004	1.32e-06	0.1212
RL	60.1	1.9	0.007	5.56e-06	0.0552	63.6	1.19	0.003	5.732-06	0.0131
RLC	0,00	1.05	0,00	3.2e-05	0.2313	-53.31	-0.98	-0.001	1.39e-06	9.1e-5

5.6.3 *Analyse de l'erreur quadratique moyenne par rapport aux variations de la tension*

La Figure 5-11 montre l'erreur quadratique moyenne pour l'estimation de la puissance active consommée par la charge de type RLC. Le MSE est présenté par rapport au pourcentage de variation de la tension d'alimentation de la charge. Au début, la variation de la tension est inférieure à 5% de la tension d'opération du réseau électrique tel qu'indiqué par les standards de qualité des systèmes de distribution [124]. Les variations augmentent jusqu'à 42% de la valeur d'opération normale de la tension. On peut remarquer que l'erreur quadratique moyenne de l'estimation faite en utilisant le modèle ZIP est très élevée pour des conditions normales d'opération du réseau. L'estimation s'améliore quand les variations sur la tension d'alimentation augmentent. Par contre, l'estimation faite en utilisant le modèle par approximation de séries de Taylor est bonne dans tous les cas.

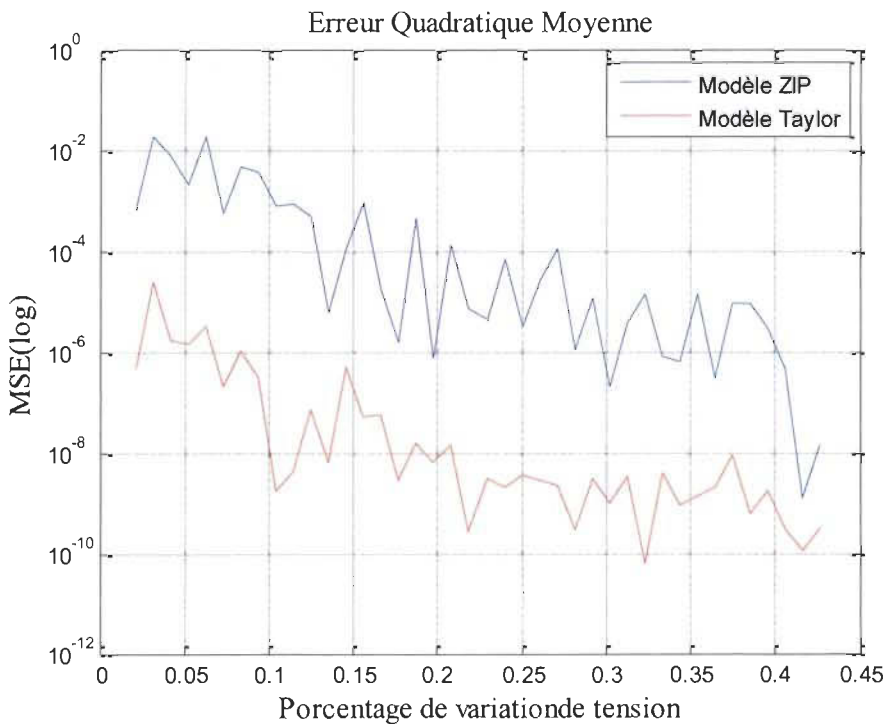


Figure 5-11 Erreur quadratique moyenne en fonction de la variation de la plage de tension.

En se basant sur les résultats obtenus dans les simulations utilisant des données théoriques et la validation expérimentale, on peut dégager les caractéristiques suivantes du modèle ZIP:

- C'est un modèle linéaire par rapport à ses paramètres.
- Il permet la représentation de la charge en régime permanent.
- Bon fonctionnement avec une grande plage de variation de la tension.

Les principaux inconvénients du modèle ZIP d'après cette première étude :

- la nécessité d'avoir une connaissance à priori des valeurs de la Puissance active P_0 et réactive Q_0 de la charge.
- Il est très difficile de trouver les bons paramètres du modèle ZIP quand la tension varie dans la plage de variation normale du réseau électrique (toujours inférieure à 5% de la valeur nominale) [123], [124]

Ainsi, dans ce qui suit, l'estimation en ligne des puissances active et réactive avec le modèle par approximation de séries de Taylor est présentée.

5.6.4 *Estimation en ligne de la puissance active et réactive avec le modèle par approximation de séries de Taylor*

La Figure 5-12 présente un modèle sous Simulink pour faire l'estimation en ligne en utilisant le modèle proposé dans le cadre de ce projet de recherche. Le grand bloc en gris est un algorithme implanté sur «FPGA» qui permet d'avoir la mesure de la puissance active et réactive développée par le groupe de recherche décrit en détail dans [118]. Les autres

sous-systèmes permettent d'estimer la puissance active et la puissance réactive et les comparer avec les données mesurées. L'algorithme RLS est utilisé pour faire l'identification des paramètres en ligne.

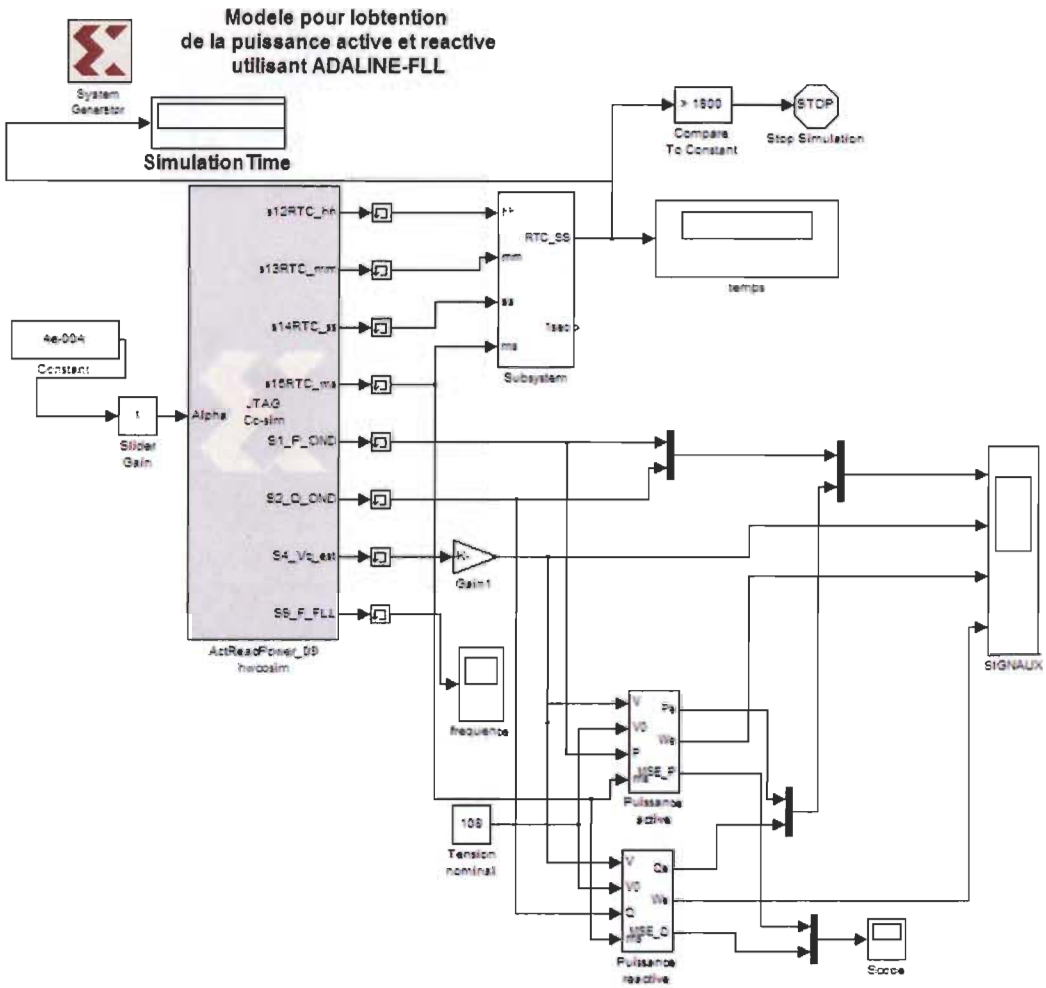


Figure 5-12 Modèle sous Simulink pour estimation en ligne.

La Figure 5-13 montre l'estimation en ligne de la puissance active et réactive en utilisant le modèle par approximation de séries de Taylor et l'algorithme RLS pour la charge type RL. On peut remarquer que les résultats sont intéressants et que l'algorithme suit le comportement des profils de puissance. On constate aussi un petit retard que l'algorithme d'estimation de paramètres génère. Ceci est dû au fait que l'algorithme prend

un vecteur de 10 données avant de démarrer le processus d'estimation, permettant de faire l'analyse de corrélation entre les données de puissance active et la tension et la puissance réactive et la tension, décrit dans la section 5.1.2 . Ce retard est normal dans ce type d'algorithmes d'estimation des paramètres.

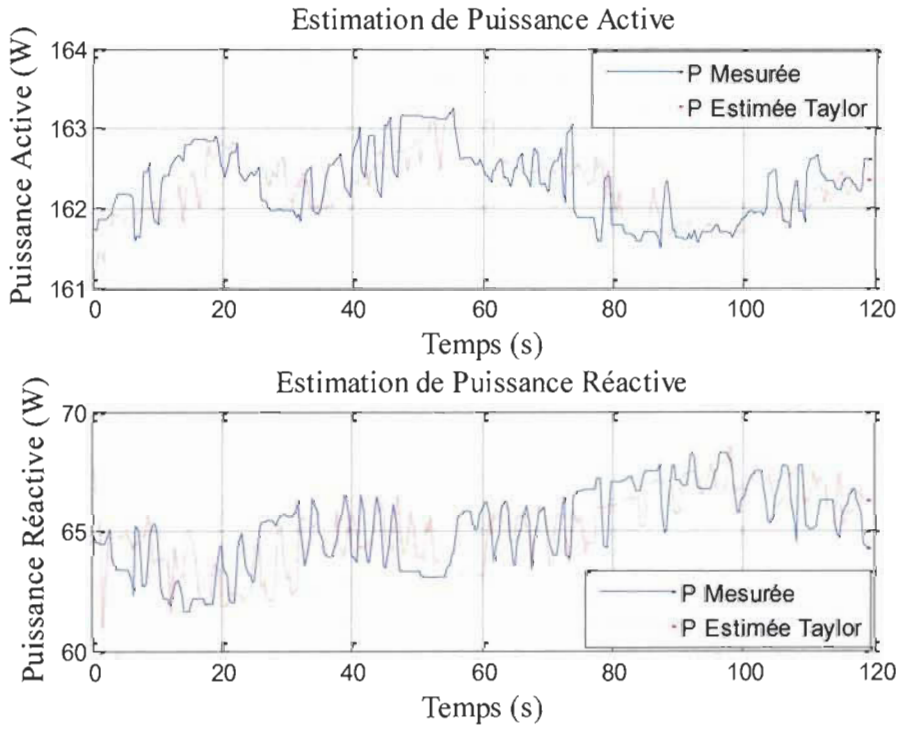


Figure 5-13 Estimation de puissance active et puissance réactive en ligne.

Le tableau 5-10 regroupe les résultats de l'estimation des paramètres de la puissance active pour les quatre charges considérées dans cette étude. On peut remarquer que les valeurs sont proches des valeurs des paramètres expérimentaux. Il faut noter que comme la charge augmente sa complexité, l'erreur quadratique commence à augmenter mais elle est encore très acceptable.

Tableau 5-10 Estimation en ligne des paramètres de la puissance active pour le charges d'étude.

Charge	Paramètres Expérimentaux			Paramètres estimés			SMAPE	MSE
	θ1	θ2	θ3	θ1	θ2	θ3		
R	206,55	3,91	0,02	196.94	2.91	0.05	1.25e-09	0.07
RC	178,8	3,39	0,017	181.8	3.88	0.036	1.96e-06	0.05
RL	167,5	3,16	0,18	168.88	4.08	0.28	2.81e-06	0.091
RLC	181,68	3,45	0,018	182.3	5.1	0.05	4.62e-04	0.17

La Figure 5-14 présente l'estimation des paramètres pour la puissance réactive. En bleu on trouve les valeurs des paramètres de référence et en rouge l'estimation faite par le modèle par approximation de séries de Taylor. La précision d'estimation des résultats est bonne et prend moins de 10 secondes pour arriver aux bonnes valeurs des paramètres. Par conséquence, on peut conclure que le modèle proposé dans ce projet de recherche est beaucoup plus performant que le modèle ZIP.

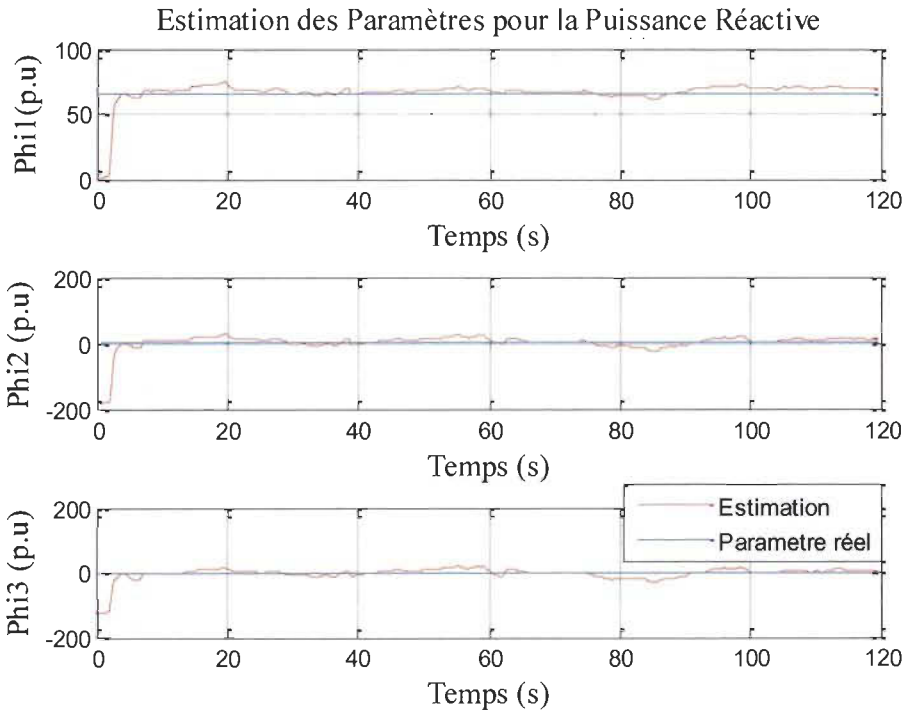


Figure 5-14 Estimation des paramètres en ligne pour la puissance réactive.

Le Tableau 5-11 présente l'estimation des paramètres pour la puissance réactive, il faut préciser qu'une charge résistive n'a pas de composant en puissance réactive. Les résultats sont pareils pour l'estimation des paramètres de la puissance active.

Tableau 5-11 Estimation en ligne des paramètres de la puissance réactive pour le charges d'étude.

Charge	Paramètres Expérimentaux			Paramètres estimés			SMAPE	MSE
	φ1	φ2	φ3	φ1	φ2	φ3		
R	----	----	----	----	----	----	----	----
RC	-59.16	-1,035	-0,005	-52.35	-1.4	-0.008	3.01e-07	0.097
RL	67,2	1,25	0.004	68.44	1.6	0.009	2.75e-05	0.13
RLC	-51,4	-0,95	-0,003	-48.7	-1.31	0.001	2.68e-04	0.2

L'estimation en ligne des paramètres est un point important pour l'identification des charges. Dans ce travail, une méthode de modélisation a été proposée et validée par simulation et par voie expérimentale, cette méthode permet d'estimer les paramètres de la puissance active et réactive avec une meilleure précision que celle obtenue lorsque le modèle ZIP est employé.

5.7 Conclusion

La modélisation des systèmes demande une analyse rigoureuse des données pour connaître le comportement du système et faire la bonne sélection du modèle. Ce choix nous permet de bien représenter le système et donc la sélection de l'algorithme d'estimation des paramètres qui sont reliés à l'objectif de la modélisation.

Dans ce travail, nous avons étudié le comportement d'un modèle simple, linéaire, largement utilisé dans la littérature, qui permet de représenter les caractéristiques statiques

Rapport-Gratuit.com

d'une charge: le modèle polynomial ou ZIP. Ce modèle a été comparé avec le modèle par approximation de séries de Taylor qui a été proposé dans le cadre de ce travail de recherche afin de déterminer celui qui répond le mieux à l'identification en ligne des paramètres des charges.

Sous des conditions de variations imposées sur la tension, en dehors des limites imposées par les normes, les résultats de l'estimation des profils des puissances et des paramètres avec le modèle ZIP et le modèle proposé par approximation de séries de Taylor sont bons. Cependant, sous des conditions de variations réelles de la tension du réseau, respectant les normes, les résultats obtenus avec le modèle proposé par approximation de séries de Taylor sont satisfaisants et meilleurs que ceux obtenus avec le modèle ZIP. En effet, les deux modèles donnent de bons résultats pour le suivi du profil de la puissance active et réactive mais l'estimation des paramètres n'est pas cohérente lorsque le modèle ZIP est employé. Ainsi, on peut conclure que le modèle proposé répond mieux et peut être employé pour l'identification en ligne des paramètres des charges.

Chapitre 6 - Conclusion

L'objectif de ce projet de recherche porte sur la compréhension et l'étude de la modélisation des charges résidentielles dans un contexte de gestion locale de la demande d'énergie. Nous avons tout d'abord réalisé une étude approfondie sur les systèmes et les méthodes de gestion existants dans la littérature au niveau éducatif et commercial. Par la suite, une étude de la modélisation des charges a été faite et on a déterminé les différents types de charges résidentielles qu'on va prendre en considération dans cette étude. Cette étude nous a permis de diviser notre travail en deux grands axes à savoir : (i) les charges thermoélectriques tels que le chauffe-eau, (ii) les charges avec un comportement purement électrique tels que les charges R, RC, RL et RLC. Pour la première catégorie, la REM a été utilisée comme outil de représentation d'un chauffe-eau. Ceci nous a permis de mieux comprendre le comportement d'une telle charge résidentielle énergivore.

Pour la deuxième catégorie, à partir de l'étude de la modélisation des charges, on a choisi d'utiliser comme point de départ le modèle polynomial ZIP vu sa simplicité et sa linéarité afin de représenter les caractéristiques du régime permanent de la charge. Après l'analyse de ce dernier, on a proposé un modèle utilisant le développement de deuxième ordre des séries de Taylor pour approximer les valeurs des puissances actives et réactives par rapport à la variation de la tension au tour d'un point de référence. Dans notre cas, le point de référence est la valeur de la tension nominale du réseau électrique.

Les deux modèles ont été validés par simulation et expérimentalement. La validation a été divisée en quatre axes qui sont : (i) déterminer expérimentalement les paramètres pour la puissance active et la puissance réactive des quatre charges d'intérêt, R, RC, RL, et RLC.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

(ii) comparer l'estimation hors ligne en utilisant le modèle ZIP et le modèle proposé par approximation de séries de Taylor. Dans cette partie on a utilisé deux types de variations de la tension du réseau à savoir la variation réelle et une grande variation de ±23% de la valeur nominale. (iii) analyser l'erreur quadratique moyenne pour l'estimation faite en utilisant les algorithmes LMS et RLS pour le deux modèles et finalement analyser la capacité du modèle proposé à estimer les paramètres en ligne.

Les résultats obtenus ont montré que le modèle proposé permet de bien traduire les caractéristiques du régime permanent des charges. En effet, pour le cas où la tension varie remarquablement (±23% de la valeur nominale), les deux modèles en utilisant les algorithmes d'estimation LMS et RLS ont convergé vers les bonnes valeurs et ils permettent de faire le suivi des profils de la puissance active et de la puissance réactive. Ce qui est le cas aussi pour l'estimation des paramètres où on a obtenu des valeurs proches des réelles.

Dans le cas de variations réelles de la tension nominale du réseau, les deux modèles permettent d'obtenir des profils de puissances active et réactive similaires aux profils réels. Cependant, au niveau de l'estimation des paramètres, le modèle ZIP diverge contrairement au modèle par approximation de séries de Taylor qui donne de meilleurs résultats avec une faible erreur.

Ainsi, en se basant sur les résultats obtenus, on peut conclure que malgré que le modèle ZIP permet de représenter la charge en régime stationnaire et que c'est un modèle linéaire par rapport à ses paramètres, il nécessite une connaissance à priori des valeurs de la puissance active P_0 et réactive Q_0 de la charge correspondantes aux valeurs nominales de tension. De plus, il ne donne pas de bons résultats quand la tension varie dans la plage de

variation normale du réseau électrique (toujours inférieur à 5% de la valeur nominale). Ceci implique qu'il n'est pas adapté pour faire une estimation en ligne des paramètres des charges pour des variations réelles de la tension du réseau contrairement au modèle proposé qui a donné des résultats escomptés.

6.1 Discussion et perspectives

Les résultats obtenus dans ce travail ont démontré que les paramètres peuvent être bien estimés en utilisant le modèle proposé par approximation en séries de Taylor. Cependant, afin d'avoir une connaissance plus détaillée des caractéristiques de chaque charge, d'autres variables d'entrée du modèle peuvent être ajoutés tels que : le courant, l'analyse de harmoniques.

La partie de modélisation du chauffe-eau nous a permis de mieux connaitre son comportement par rapport au profil de consommation de la puissance électrique. Le régulateur par hystérésis a été remplacé lors des simulations par un contrôleur PI qui donne une modulation du profil de puissance. Cette analyse permettra de faire une gestion sur la consommation de puissance pour répondre à la consommation du chauffe-eau pendant les pics de consommation de la journée tout en assurant la continuité du service.

Comme perspective aux travaux réalisés dans ce projet, il est possible d'analyser les caractéristiques dynamiques des charges résidentielles. Les modèles ont été étudiés et présentés dans la section 3.4 et 3.5. En plus, la partie de modélisation peut être vue comme la première phase dans le grand travail de « inverse load reconstruction » connue comme: phase d'entrainement pour les algorithmes d'identification non-intrusive des charges dans le contexte d'une gestion au niveau local.

Références

[1] L. L. Grigsby, *Electric Power Generation, Transmission, and Distribution*. CRC Press, 2007.

[2] A. Gabaldon, A. Molina, C. Roldan, J. A. Fuentes, E. Gomez, I. J. Ramirez-Rosado, P. Lara, J. A. Dominguez, E. Garcia-Garrido, and E. Tarancon, "Assessment and simulation of demand-side management potential in urban power distribution networks," *Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna*, vol. 4. p. 5 pp. Vol.4, 2003.

[3] I. E. Agency, "Key World Energy Statistics," *2014*. [Online]. Available: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/key-world-energy-statistics-2014.html.

[4] Le conseil de la fédération, "Stratégie Canaddienne De L'Énergie," 2015. [Online]. Available: http://www.pmprovincesterritoires.ca/phocadownload/publications/fr_canadian_energy_strategy_july17_fnl.pdf.

[5] Association Canadienne D'Électricité, "Key Canadian Electricity Statistics," 2014. [Online]. Available: http://www.electricity.ca/media/Electricity101/KeyCanadianElectricityStatistics10June2014.pdf.

[6] P. Werbos, "Computational intelligence for the smart grid-history, challenges, and opportunities," *Computational Intelligence Magazine, IEEE*, vol. 6, no. August. pp. 14–21, 2011.

[7] C. Chen, Y. Zhu, and Y. Xu, "Distributed generation and Demand Side Management," *Electricity Distribution (CICED), 2010 China International Conference on*. pp. 1–5, 2010.

[8] P. Chiradeja, "Benefit of Distributed Generation: A Line Loss Reduction Analysis," *Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, 2005 IEEE/PES*. pp. 1–5, 2005.

[9] C.-J. Lin, Y.-T. Chen, C.-Y. Chiou, C.-H. Huang, H.-D. Chiang, J.-C. Wang, and L. Fekih-Ahmed, "Dynamic load models in power systems using the measurement approach," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 8, no. 1. pp. 309–315, 1993.

[10] P. Palensky and D. Dietrich, "Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads," *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, vol. 7, no. 3. pp. 381–388, 2011.

[11] J. C. Van Gorp, "Enterprising energy management," *Power and Energy Magazine, IEEE*, vol. 2, no. 1. pp. 59–63, 2004.

[12] M. Sanquer, "Détection et caractérisation de signaux transitoires Application à la surveillance de courbes de charge," Université De Grenoble, 2013.

[13] S. Darby, "The Effectiveness Of Feedback On Energy Consumption.," University Of Oxford, 2006.

[14] J. Neenan, B. Robinson, "Residential Electricity Use Feedback: A Research Synthesis And Economic Framework," 2009.

[15] T. Luo, G. Ault, and S. Galloway, "Demand Side Management in a highly decentralized energy future," *Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2010 45th International*. pp. 1–6, 2010.

[16] J. R. Fanchi and C. J. Fanchi, *Energy in the 21st Century*. Hackensack, N.J.: World Scientific Publishing Company, 2011.

[17] A. Cardenas, C. Guzman, and K. Agbossou, "Development of a FPGA Based Real-Time Power Analysis and Control for Distributed Generation Interface," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 27, no. 3. pp. 1343–1353, 2012.

[18] National Institute of Standards and Technology, "NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards, Release 2.0," 2012. [Online]. Available: www.nist.gov/smartgrid/upload/NIST_Framework_Release_2-0_corr.pdf. [Accessed: 25-May-2015].

[19] K. Kato and H. R. Fudeh, "Performance simulation of distributed energy management systems," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 7, no. 2. pp. 820–827, 1992.

[20] S. Aman, Y. Simmhan, and V. K. Prasanna, "Energy management systems: state of the art and emerging trends," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 51, no. 1. pp. 114–119, 2013.

[21] C. Cecati, C. Citro, and P. Siano, "Combined Operations of Renewable Energy Systems and Responsive Demand in a Smart Grid," *Sustainable Energy, IEEE Transactions on*, vol. 2, no. 4. pp. 468–476, 2011.

[22] N. H. Nguyen, "Développement de méthodes intelligentes pour la gestion énergétique des bâtiments, utilisant des capteurs sans fils," Université de Grenoble, 2011.

[23] J. Hiscock and D. Beauvais, "Les réseaux électriques intelligents au Canada, 2012-2013, rapport n° 2013-171 RP-ANU 411-SGPLAN," Ressources naturelles Canada.

[24] P. Jazayeri, A. Schellenberg, W. D. Rosehart, J. Doudna, S. Widergren, D. Lawrence, J. Mickey, and S. Jones, "A Survey of Load Control Programs for Price and System Stability," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 20, no. 3. pp. 1504–1509, 2005.

[25] A. B. Philpott and E. Pettersen, "Optimizing demand-side bids in day-ahead electricity markets," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 21, no. 2. pp. 488–498, 2006.

[26] G. FRAISSE and J. VIRGONE, "Commande floue et thermique du bâtiment. Proposition d'une loi de chauffe adaptée à la régulation des bâtiments de type tertiaire à occupation discontinue," *Rev. générale Therm.*, vol. 35, no. 414, pp. 359–372.

[27] T. T. Chow, A. L. S. Chan, and C. L. Song, "Building-mix optimization in district

cooling system implementation," *Appl. Energy*, vol. 77, no. 1, pp. 1–13, 2004.

[28] P. DAVIDSSON and M. BOMAN, "Distributed monitoring and control of office buildings by embedded agents," *Inf. Sci. (Ny).*, vol. 171, no. 4, pp. 293–307, May 2005.

[29] M. Wetter and E. Polak, "Building design optimization using a convergent pattern search algorithm with adaptive precision simulations," *Energy Build.*, vol. 37, no. 6, pp. 603–612, Jun. 2005.

[30] E. L. Lawler and D. E. Wood, "Branch-and-bound methods: A survey," *Oper. Res.*, vol. 14, no. 4, pp. 699–719, 1966.

[31] A. I. Cohen and C. C. Wang, "An optimization method for load management scheduling," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 3, no. 2. pp. 612–618, 1988.

[32] A. D. Papalexopoulos and T. C. Hesterberg, "A regression-based approach to short-term system load forecasting," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 5, no. 4. pp. 1535–1547, 1990.

[33] M. Krarti, "An Overview of Artificial Intelligence-Based Methods for Building Energy Systems," *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 125, no. 3, pp. 331–342, Aug. 2003.

[34] A. Sorjamaa, J. Hao, N. Reyhani, Y. Ji, and A. Lendasse, "Methodology for long-term prediction of time series, Neurocomputing," 2007.

[35] D. Ju-Long, "Control problems of grey systems," *Syst. Control Lett.*, vol. 1, no. 5, pp. 288–294, Mar. 1982.

[36] S. S. Pappas, L. Ekonomou, D. C. Karamousantas, G. E. Chatzarakis, S. K. Katsikas, and P. Liatsis, "Electricity demand loads modeling using AutoRegressive Moving Average (ARMA) models," *Energy*, vol. 33, no. 9, pp. 1353–1360, 2008.

[37] Z.-H. Zhou and Y. Xia, "The application of artificial neural network in HVAC system," *Machine Learning and Cybernetics, 2005. Proceedings of 2005 International Conference on*, vol. 8. pp. 4800–4804 Vol. 8, 2005.

[38] E. Srinivas and A. Jain, "A Methodology for Short Term Load Forecasting Using Fuzzy Logic and Similarity," in *The National Conference on Advances in Computational Intelligence Applications in Power, Control, Signal Processing and Telecommunications (NCACI-2009), Bhubaneswar, India*, 2009.

[39] S. Thomas Ng, M. Skitmore, and K. F. Wong, "Using genetic algorithms and linear regression analysis for private housing demand forecast," *Build. Environ.*, vol. 43, no. 6, pp. 1171–1184, Jun. 2008.

[40] M. Weiss, F. Mattern, T. Graml, T. Staake, and E. Fleisch, "Handy Feedback: Connecting Smart Meters with Mobile Phones," in *Proceedings of the 8th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia*, 2009, pp. 15:1–15:4.

[41] L. Bartram, J. Rodgers, and K. Muise, "Chasing the Negawatt: Visualization for Sustainable Living," *Computer Graphics and Applications, IEEE*, vol. 30, no. 3. pp.

8–14, 2010.

[42] Veries Industries, "Veris power meter." [Online]. Available: http://www.veris.com/Category/Power-fslEnergy-spcMonitoring/Single-spcCircuit/E50-spcSeries-spcPower-spc-and-spcEnergy-spcMeter/Modbus.aspx. [Accessed: 20-Oct-2015].

[43] TED, "TED 5000." [Online]. Available: http://www.ted5000.ca/product/the-energy-detective-ted-5000-home-energy-monitor. [Accessed: 20-Oct-2015].

[44] AccuEnergy, "Acuvim Energy Meter." [Online]. Available: https://www.accuenergy.com/product/acuvim-ii-power-energy-submeter. [Accessed: 20-Oct-2015].

[45] R. T. Fielding, "Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures," University of California, Irvine, 2000.

[46] "The Apache DB Project." .

[47] R. S. Brewer and P. M. Johnson, "WattDepot: An Open Source Software Ecosystem for Enterprise-Scale Energy Data Collection, Storage, Analysis, and Visualization," *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2010 First IEEE International Conference on*. pp. 91–95, 2010.

[48] S. Karnouskos, "Crowdsourcing information via mobile devices as a migration enabler towards the SmartGrid," *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2011 IEEE International Conference on*. pp. 67–72, 2011.

[49] "Neighbourhood Oriented Brokerage Electricity and monitoring system." [Online]. Available: http://www.ict-nobel.eu/. [Accessed: 21-Oct-2015].

[50] T. Handa, A. Oda, T. Tachikawa, J. Ichimura, Y. Watanabe, and H. Nishi, "KNIVES: A distributed demand side management system - Integration with ZigBee wireless sensor network and application -," *Industrial Informatics, 2008. INDIN 2008. 6th IEEE International Conference on*. pp. 324–329, 2008.

[51] Y. Kim, T. Schmid, Z. M. Charbiwala, and M. B. Srivastava, "ViridiScope: Design and Implementation of a Fine Grained Power Monitoring System for Homes," in *Proceedings of the 11th International Conference on Ubiquitous Computing*, 2009, pp. 245–254.

[52] V. Sundramoorthy, Q. Liu, G. Cooper, N. Linge, and J. Cooper, "DEHEMS: A user-driven domestic energy monitoring system," *Internet of Things (IOT), 2010*. pp. 1–8, 2010.

[53] G.-H. Yang and V. O. K. Li, "Energy Management System and Pervasive Service-Oriented Networks," *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2010 First IEEE International Conference on*. pp. 1–6, 2010.

[54] G. W. Hart, "Nonintrusive appliance load monitoring," *Proceedings of the IEEE*, vol. 80, no. 12. pp. 1870–1891, 1992.

[55] Z. Wang and G. Zheng, "Residential Appliances Identification and Monitoring by a Nonintrusive Method," *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 3, no. 1. pp. 80–92,

2012.

[56] S. B. Leeb, S. R. Shaw, and J. L. Kirtley Jr., "Transient event detection in spectral envelope estimates for nonintrusive load monitoring," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 10, no. 3. pp. 1200–1210, 1995.

[57] J. Á. Fuentes Moreno, "Modelos eléctricos de respuesta de cargas : obtención y aplicación a la identificación de usos finales en bajos niveles de agregación." 04-Mar-2001.

[58] C. Laughman, K. Lee, R. Cox, S. Shaw, S. Leeb, L. Norford, and P. Armstrong, "Power signature analysis," *Power and Energy Magazine, IEEE*, vol. 1, no. 2. pp. 56–63, 2003.

[59] H. Pihala, *Non-intrusive appliance load monitoring system based on a modern kWh-meter*. Citeseer, 1998.

[60] A. I. Cole and A. Albicki, "Algorithm for nonintrusive identification of residential appliances," *Circuits and Systems, 1998. ISCAS '98. Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on*, vol. 3. pp. 338–341 vol.3, 1998.

[61] M. Zeifman and K. Roth, "Viterbi algorithm with sparse transitions (VAST) for nonintrusive load monitoring," *Computational Intelligence Applications In Smart Grid (CIASG), 2011 IEEE Symposium on*. pp. 1–8, 2011.

[62] S. R. Shaw and C. R. Laughman, "A Kalman-Filter Spectral Envelope Preprocessor," *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 56, no. 5. pp. 2010–2017, 2007.

[63] Z. Wang and G. Zheng, "New method for non-intrusive data extraction and classification of residential appliances," *Control and Decision Conference (CCDC), 2011 Chinese*. pp. 2196–2201, 2011.

[64] D. C. Robertson, O. I. Camps, J. S. Mayer, and W. B. Gish, "Wavelets and electromagnetic power system transients," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 11, no. 2. pp. 1050–1058, 1996.

[65] W. L. Chan, A. T. P. So, and L. L. Lai, "Wavelet feature vectors for neural network based harmonics load recognition," *Advances in Power System Control, Operation and Management, 2000. APSCOM-00. 2000 International Conference on*, vol. 2. pp. 511–516 vol.2, 2000.

[66] A. Cole and A. Albicki, "Nonintrusive identification of electrical loads in a three-phase environment based on harmonic content," *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2000. IMTC 2000. Proceedings of the 17th IEEE*, vol. 1. pp. 24–29 vol.1, 2000.

[67] X. Li, L. Wang, and P. Li, "The study on composite load model structure of artificial neural network," *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008. DRPT 2008. Third International Conference on*. pp. 1564–1570, 2008.

[68] J. Duan, D. Czarkowski, and Z. Zabar, "Neural network approach for estimation of

load composition," *Circuits and Systems, 2004. ISCAS '04. Proceedings of the 2004 International Symposium on*, vol. 5. pp. V–988–V–991 Vol.5, 2004.

[69] H.-H. Chang, C.-L. Lin, and H.-T. Yang, "Load recognition for different loads with the same real power and reactive power in a non-intrusive load-monitoring system," *Computer Supported Cooperative Work in Design, 2008. CSCWD 2008. 12th International Conference on*. pp. 1122–1127, 2008.

[70] D. Srinivasan, W. S. Ng, and A. C. Liew, "Neural-network-based signature recognition for harmonic source identification," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 21, no. 1. pp. 398–405, 2006.

[71] M. Baranski and J. Voss, "Genetic algorithm for pattern detection in NlALM systems," *Systems, Man and Cybernetics, 2004 IEEE International Conference on*, vol. 4. pp. 3462–3468 vol.4, 2004.

[72] A. J. Collin, G. Tsagarakis, A. E. Kiprakis, and S. McLaughlin, "Multi-scale electrical load modelling for demand-side management," *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), 2012 3rd IEEE PES International Conference and Exhibition on*. pp. 1–8, 2012.

[73] N. Henao, K. Agbossou, S. Kelouwani, Y. Dube, and M. Fournier, "Approach in Nonintrusive Type I Load Monitoring Using Subtractive Clustering," *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. PP, no. 99. p. 1, 2015.

[74] "Kill A Watt CO2 Wireless." [Online]. Available: http://www.p3international.com/products/consumer/p4200.html. [Accessed: 20-Mar-2015].

[75] "Wireless Energy Monitor." [Online]. Available: http://efergy.com/ca/elite-engage-hub-system#.VjkfQdIvc0M. [Accessed: 05-Feb-2015].

[76] Smart Home Energy, "Wattson Solar Plus." [Online]. Available: http://smarthomeenergy.co.uk/wattson-solar-plus. [Accessed: 28-Feb-2015].

[77] "PowerCost Monitor." [Online]. Available: http://www.bluelineinnovations.com/. [Accessed: 01-Feb-2015].

[78] TED, "TED Pro Home." [Online]. Available: http://www.theenergydetective.com/prohome. [Accessed: 30-Oct-2015].

[79] "Smart Circuit 20." [Online]. Available: https://www.wattsupmeters.com/secure/products.php?pn=20&wai=0&data=2. [Accessed: 15-Feb-2015].

[80] General Electric Appliances, "Nucleus Home Manager." [Online]. Available: https://www.geappliances.com/store/parts/spec/HES1E0U0V. [Accessed: 10-Oct-2015].

[81] "Load representation for dynamic performance analysis [of power systems]," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 8, no. 2. pp. 472–482, 1993.

[82] M. N. Valero Pérez, "A non-intrusive appliance load monitoring system for identifying kitchen activities," 2011.

Rapport-Gratuit.com

[83] W. S. Levine, *The control handbook*. CRC press, 1996.

[84] J. Hou, Z. Xu, and Z. Y. Dong, "Load modeling practice in a smart grid environment," *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2011 4th International Conference on*. pp. 7–13, 2011.

[85] U. Flores, "Identificación de sistemas no lineales mediante las estructuras NARX y Hammerstein-Wiener," Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, 2011.

[86] A. Capasso, W. Grattieri, R. Lamedica, and A. Prudenzi, "A bottom-up approach to residential load modeling," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 9, no. 2. pp. 957–964, 1994.

[87] I. Richardson, M. Thomson, D. Infield, and C. Clifford, "Domestic electricity use: A high-resolution energy demand model," *Energy Build.*, vol. 42, no. 10, pp. 1878–1887, Oct. 2010.

[88] J. Dickert and P. Schegner, "A time series probabilistic synthetic load curve model for residential customers," *PowerTech, 2011 IEEE Trondheim*. pp. 1–6, 2011.

[89] T. Hiyama, M. Tokieda, W. Hubbi, and H. Andou, "Artificial neural network based dynamic load modeling," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 12, no. 4. pp. 1576–1583, 1997.

[90] Y.-Y. Hsu and F.-C. Lu, "A combined artificial neural network-fuzzy dynamic programming approach to reactive power/voltage control in a distribution substation," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 13, no. 4. pp. 1265–1271, 1998.

[91] A. Oonsivilai and M. E. El-Hawary, "Power system dynamic load modeling using adaptive-network-based fuzzy inference system," *Electrical and Computer Engineering, 1999 IEEE Canadian Conference on*, vol. 3. pp. 1217–1222 vol.3, 1999.

[92] "Bibliography on load models for power flow and dynamic performance simulation," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 10, no. 1. pp. 523–538, 1995.

[93] W. W. Price, C. W. Taylor, and G. J. Rogers, "Standard load models for power flow and dynamic performance simulation," *IEEE Trans. power Syst.*, vol. 10, no. CONF-940702--, 1995.

[94] I. Romero, *Dynamic power system load-Estimation of parameters from operational data*. Lund University, 2005.

[95] P. Kundur, N. J. Balu, and M. G. Lauby, *Power system stability and control*, vol. 7. McGraw-hill New York, 1994.

[96] Y. Li, H.-D. Chiang, B.-K. Choi, Y.-T. Chen, D.-H. Huang, and M. G. Lauby, "Representative static load models for transient stability analysis: development and examination," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 1, no. 3, pp. 422–431, 2007.

[97] B.-K. Choi, H.-D. Chiang, Y. Li, H. Li, Y.-T. Chen, D.-H. Huang, and M. G. Lauby,

"Measurement-based dynamic load models: derivation, comparison, and validation," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 21, no. 3. pp. 1276–1283, 2006.

[98] D. Karlsson and D. J. Hill, "Modelling and identification of nonlinear dynamic loads in power systems," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 9, no. 1. pp. 157–166, 1994.

[99] H. Bai, P. Zhang, and V. Ajjarapu, "A Novel Parameter Identification Approach via Hybrid Learning for Aggregate Load Modeling," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 24, no. 3. pp. 1145–1154, 2009.

[100] D. J. Hill, "Nonlinear dynamic load models with recovery for voltage stability studies," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 8, no. 1. pp. 166–176, 1993.

[101] H. Renmu, M. Jin, and D. J. Hill, "Composite load modeling via measurement approach," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 21, no. 2. pp. 663–672, 2006.

[102] J. Ma, D. Han, R. He, Z. Dong, and D. J. Hill, "Reducing Identified Parameters of Measurement-Based Composite Load Model," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 23, no. 1. pp. 76–83, 2008.

[103] W.-S. Kao, C.-J. Lin, C.-T. Huang, Y.-T. Chen, and C.-Y. Chiou, "Comparison of simulated power system dynamics applying various load models with actual recorded data," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 9, no. 1. pp. 248–254, 1994.

[104] P. McCullagh and J. A. Nelder, *Generalized linear models*, vol. 37. CRC press, 1989.

[105] R. J. Carroll and D. Ruppert, *Transformation and weighting in regression*, vol. 30. CRC Press, 1988.

[106] S. Halwi, D. G. Holmes, T. Czaszejko, and M. B. Khoorasani, "Improved representation of power system load dynamics using heuristic models," *TENCON 2008 - 2008 IEEE Region 10 Conference*. pp. 1–6, 2008.

[107] D. Jones, "Estimation of power system parameters," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 19, no. 4. pp. 1980–1989, 2004.

[108] P. Jazayeri, W. Rosehart, and D. T. Westwick, "A Multistage Algorithm for Identification of Nonlinear Aggregate Power System Loads," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 22, no. 3. pp. 1072–1079, 2007.

[109] A. Bouscayrol, "FORMALISMES DE REPRESENTATION ET DE COMMANDE APPLIQUES AUX SYSTEMES ELECTROMECANIQUES." Universite Des Sciences Et Technologies De Lille, 2003.

[110] R. M. Shubair, "Robust adaptive beamforming using LMS algorithm with SMI initialization," *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2005 IEEE*, vol. 4A. pp. 2–5 vol. 4A, 2005.

[111] A. M. Najafabadi and A. T. Alouani, "Real time parameter identification of composite load model," *Power and Energy Society General Meeting (PES), 2013 IEEE*. pp. 1–5, 2013.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

[112] P. S. R. Diniz, *Adaptive filtering*. Springer, 1997.

[113] Resources Naturelles Canada, "Le chauffage à l'électricité," Ottawa, 2003.

[114] L. Paull, H. Li, and L. Chang, "A novel domestic electric water heater model for a multi-objective demand side management program," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 80, no. 12, pp. 1446–1451, Dec. 2010.

[115] Statistique Canada, "Valeurs mensuelles médianes pour la température maximum selon le type de source d'eau," 2011. .

[116] L. M. Hajagos and B. Danai, "Laboratory measurements and models of modern loads and their effect on voltage stability studies," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 13, no. 2. pp. 584–592, 1998.

[117] A. Bokhari, A. Alkan, R. Dogan, M. Diaz-Aguilo, F. de Leon, D. Czarkowski, Z. Zabar, L. Birenbaum, A. Noel, and R. E. Uosef, "Experimental Determination of the ZIP Coefficients for Modern Residential, Commercial, and Industrial Loads," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 29, no. 3. pp. 1372–1381, 2014.

[118] A. Cardenas, C. Guzman, and K. Agbossou, "Real-time evaluation of power quality using FPGA based measurement system," *Industrial Electronics (ISIE), 2010 IEEE International Symposium on*. pp. 2777–2782, 2010.

[119] P. Dienes, *The taylor series: an introduction to the theory of functions of a complex variable*. New York, NY, USA: Dover, 1957.

[120] P. J. Moreno, B. Raj, and R. M. Stern, "A vector Taylor series approach for environment-independent speech recognition," *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1996. ICASSP-96. Conference Proceedings., 1996 IEEE International Conference on*, vol. 2. pp. 733–736 vol. 2, 1996.

[121] R. C. Dorf and R. H. Bishop, *Modern control systems*. Pearson, 2011.

[122] R. D. Wolfinger, "Two Taylor-series approximation methods for nonlinear mixed models," *Comput. Stat. Data Anal.*, vol. 25, no. 4, pp. 465–490, Sep. 1997.

[123] "IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems," *IEEE Std 1547-2003*. pp. 1–28, 2003.

[124] TransÉnergie-HydroQuébec, "Characteristics and target values of the voltage supplied by Hydro-Québec transmission system," Original in French dated June 15, 1999. Translated July 5, 2001.