

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'enseignement supérieur et la recherche scientifique**  
**Université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel**



جامعة جيجل  
مكتبة كلية العلوم والتكنولوجيا  
رقم المجلد .....  
M2597

*Faculté de sciences et technologie*  
*Département de l'électrotechnique*

**Projet Fin d'Etude pour l'Obtention du Diplôme**  
**Electrotechnique**  
**Option**  
**Compatibilité électromagnétique**



**Thème**

---

*Identification des charges électriques dans un réseau  
domestique*

---

**Encadré par :**

**Mr Mohammed MELIT**

**Réalisé par :**

**Saber BOUFAMA**

**Année universitaire 2015/2016**

# Remerciements

*Avant toute chose, je tends à exprimer mes reconnaissances et adresser tous mes remerciements,*

*Premièrement et avant tout, à mon Dieu pour m'avoir aidé pendant tout le cycle de mes études et pour m'avoir donné la volonté et le courage pour terminer ce modeste travail,*

*Je remerciais fortement Mr.M.Melit, mon encadreur, qui m'a guidé et suivi tout au long de travail,*

*Je remercie les membres du jury, pour l'intérêt qu'ils ont manifesté pour ce travail en acceptant de le juger,*

*Je remercie aussi l'ensemble des enseignants du département d'électrotechnique,*

*Je remercie tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail,*

*Enfin, un gros merci pour ms amis et collègues pour leur soutien moral,*



## *Dédicace*

*De tout mon cœur je dédie ce travail :*

*A ma mère*

*A mes chers grand parents, que Dieu les garde*

*A mes frères*

*A ma grande famille*

*A tous mes amies et mes collègues*

*A ceux qu'il mon connais*

*De près ou de loin*

*Et bien sûr à **Dr Mohammed Melit.***

*Saber*

# Sommaire



# Sommaire

<i>Introduction générale</i> .....	1
------------------------------------	---

## *Chapitre I :*

### **Généralités sur les réseaux intelligents**

I. Introduction.....	3
II. Définitions et catégories.....	3
III. Historique .....	5
IV. Objectifs des smart grids.....	6
V. Les fondements des Smart grid.....	6
VI. Réalité aujourd'hui.....	7
VII. Comparaison entre les systèmes traditionnels et les smart grids.....	7
VIII. Les compteurs intelligents.....	8
IX. Avantages et inconvénients des smart meters et des smart grids.....	9
X. Enjeux par rapport à l'énergie.....	11
X.1. Des avantages économiques et environnementaux.....	11
X.2. Les limites dans la mise en œuvre.....	11
X.3. Les acteurs majeurs des smart grids.....	12
X.4. Fonctionnement des smart grids.....	13
X.5. Modèles de smart grid.....	14
<b>Conclusion</b> .....	16

## *Chapitre II :*

### **Identification des charges élémentaires en basse fréquence**

<b>Introduction</b> .....	18
<b>I. Contexte et méthode d'analyse</b> .....	18
I.1. Principe de la méthode d'analyse .....	18
I.2. Analyse théorique du circuit .....	19
I.3. Détermination des valeurs des pôles et des résidus par la méthode de MatrixPenci.....	20
<b>II. Analyse des charges linéaires</b> .....	20
II.1. Charge résistive.....	22
II.2. Charge RL parallèle .....	23
II.3. Charge RC série .....	25
II.4. Charge RL série .....	27
II.5. Charge RLC série .....	28
<b>III. Mise en parallèle des charges élémentaires</b> .....	30
III.1. Enclenchements simultanés .....	32
III.1.1 Enclenchements simultanés de charges de même type.....	32
III.1.2. Enclenchements simultanés de charges de types différents.....	32
III.2. Enclenchements séquentiels .....	33
<b>IV. Cas des charges non linéaires</b> .....	35
<b>Conclusion</b> .....	37

## *Chapitre III :*

### **Validation et quelques applications**

<b>Introduction .....</b>	<b>38</b>
<b>I.1. Validation de nos résultats par la méthode de Matrix pencil .....</b>	<b>39</b>
<b>I.2. Signaux analysés .....</b>	<b>39</b>
<b>I.3. Validation de nos résultats avec celles publiées .....</b>	<b>40</b>
I.3.1. Charge résistive pure.....	40
I.3.2. Charge RL parallèle .....	41
I.3.3. Charge RL série .....	43
I.3.4. Charge RC série .....	45
I.3.5. Charge RLC série .....	46
<b>II. Mise en parallèle des charges élémentaires .....</b>	<b>48</b>
II.1. Enclenchements simultanés de charges de même type .....	48
II.2. Enclenchements simultanés de charges de types différents .....	49
<b>Conclusion .....</b>	<b>50</b>
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>51</b>

# Introduction générale

## Introduction Générale

Le saviez-vous? L'énergie du futur est intelligente. Ou plutôt, ce sont les réseaux électriques, gérés automatiquement, à **distance, en temps réel et donc à moindre coût**, qui deviennent "intelligents". Les "smart grids", littéralement "maillages intelligents", prennent d'assaut la planète avec leurs bataillons de compteurs nouvelle génération. Et pour cause, dans un contexte de crise énergétique mondiale, ce système permet une meilleure gestion de la production et de la consommation d'énergie.

L'intelligence dans les réseaux est une réalité depuis longtemps. La nouveauté, c'est le besoin grandissant de flexibilité dans les systèmes électriques. Ce besoin trouve une grande partie de son origine dans le développement des énergies intermittentes (éolien, solaire) qui induisent des variations rapides de production. Il est également renforcé par le souci d'éviter des investissements de capacité en utilisant la flexibilité de la demande. Pour disposer de réseaux capables de gérer cette flexibilité, il faut y introduire de nouvelles formes d'intelligence. Ceci va remettre en cause les rôles respectifs des divers acteurs : **fournisseurs d'électricité, régulateurs, industriels, gestionnaires de réseaux, clients**.

Les smart grids ne sont pas de nouveaux réseaux électriques : il s'agit d'introduire de l'information et de l'intelligence pour optimiser les flux d'électricité. Les améliorations seront globalement incrémentales, **à l'exception de quelques ruptures technologiques**.

Le compteur intelligent informera le client de sa consommation en temps réel et, à terme, avec le développement du marché de l'énergie, du prix de l'électricité en fonction de l'heure de la journée.

Le compteur intelligent permettra également la centralisation d'informations utiles concernant les réseaux électriques (qualité de service, profil de consommation, tentatives de fraude...) en remontant les données directement du consommateur, commander l'enclenchement de tout appareil domestique à forte consommation

électrique durant les périodes creuses, voire délester automatiquement ces mêmes appareils en période de pointe.

Notre travail de fin d'étude de master consiste à apercevoir une identification d'une charge électrique dans un réseau électrique domestique. Nous avons deux objectifs principaux, le premier est la modélisation des charges électrique par une modèle simple a la mise ne œuvre, et la seconde phase est la reconnaissance de cette charge par sa signature.

Pour exposer notre travail nous présentons un mémoire en trois chapitres. Le premier chapitre présente quelques généralités sur les réseaux intelligents (Smarts Grids) qui vont nous donné un aperçu sur l'état de l'art sur les smart grids ainsi leurs définitions et les objectifs visés par ces derniers.

Dans le deuxième chapitre consacré à la reconnaissance des différentes charges électriques. Nous examinons quelques charges électriques élémentaires R, RL, RC et RLC ainsi que celles résultant de leurs mises en parallèle par l'application de la méthode de Matrix pencil sur le courant électrique délivré aux charges.

Le troisième et dernier chapitre est consacré aux applications dont lesquels nous présentons une validation du modèle théorique que nous avons utilisés, nous enrichissons notre étude par quelques applications et interprétations que nous constatons et nous jugeons utiles pour le lecteur.

Nous finalisons notre travail par une conclusion générale et quelques perspectives.



# Chapitre I

*Généralité sur les réseaux intelligents*

## I. Introduction

Un smart grid (littéralement «réseau intelligent») est un réseau électrique reliant ensemble « production, consommation et stockage » de l'électricité et les coordonnant de manière autonome. Ce type de réseau permet par conséquent de passer d'un système de production dépendant de la demande à un système de consommation basé sur l'offre, qui devra à l'avenir s'adapter aux variations aléatoires de la production d'énergies éolienne et solaire. Associé à d'autres technologies telles que le pompage-turbinage ou encore les installations à gaz à cycle combiné, particulièrement flexibles, ce réseau doit contribuer à améliorer la sécurité d'approvisionnement, à réduire les coûts relatifs au réseau de distribution et à l'énergie de réglage, à intégrer les énergies renouvelables au réseau et à améliorer l'efficacité de l'ensemble du système.

Un smart grid associe le réseau électrique déjà existant à des applications issues des technologies de l'information et de la communication. Cependant, si plusieurs technologies actuelles peuvent d'ores et déjà être utilisées, elles doivent être tout d'abord testées sous la forme de composants individuels, car la réalisation technique dépend de la stabilité et de l'efficacité de leur interaction.

Les tests effectués actuellement sur les compteurs intelligents (Les smart mètres), déjà déployés à large échelle dans certains pays, constituent une première étape dans la mise en œuvre de ces réseaux intelligents. Cette technologie doit inciter les consommateurs finaux à économiser l'électricité et encourager la maîtrise de l'injection décentralisée.

Le succès des smart grids dépendra en grande partie de l'intérêt économique des différentes parties prenantes. Une fois que celui-ci se profilera, la probabilité d'une mutation de notre réseau électrique actuel en smart grid émergera également.

## II. Définitions et catégories

Le réseau intelligent repose sur un large éventail de visions pour un large éventail d'intervenants. En raison de cette diversité de conceptions et de la complexité des technologies en présence, il n'est pas étonnant qu'il ait donné lieu à

un certain nombre de définitions et explications. Voici trois exemples de définitions présentées récemment par des autorités crédibles :

- Un réseau intelligent est un réseau d'électricité moderne. Il repose sur le recours à des capteurs, à des dispositifs de surveillance et de communication, à l'automatisation et à l'informatique pour améliorer la souplesse, la sécurité, la fiabilité, l'efficacité et la sûreté du service d'électricité [1].
- Le réseau intelligent rend le service d'électricité en place «"intelligent"» en mettant en liaison et en appliquant des systèmes de communication transparents qui peuvent : recueillir et stocker des données et les convertir en information dynamique; faire circuler l'information dans toutes les directions entre les éléments du réseau électrique «"intelligent"»; permettre la commande automatisée en réaction à cette information [2].
- Réseau d'acheminement de l'énergie largement décentralisé et automatisé, le réseau intelligent se caractérisera par une circulation bidirectionnelle de l'énergie électrique et de l'information et pourra tout surveiller, qu'il s'agisse des centrales, des préférences des clients ou des appareils ménagers de chaque ménage. Il intègre les avantages de l'informatique répartie et des communications pour produire une information en temps réel et permettre l'équilibrage quasi-instantané de l'offre et de la demande au niveau du dispositif [3].

Au sein de smart grids, la communication rapide et bidirectionnelle entre les différents composants des réseaux et les systèmes de production, de stockage et de consommation permet d'harmoniser la gestion. De ce fait, ces réseaux sont en mesure de garantir une exploitation plus efficace du système (à la fois en termes d'énergie et de coûts) en vue des exigences futures (Figure I.1).

Les réseaux intelligents peuvent être définis selon quatre caractéristiques en matière de :

- **La flexibilité** : ils permettent de gérer plus finement l'équilibre entre production et consommation ;
- **La fiabilité** : ils améliorent l'efficacité et la sécurité des réseaux ;

- **L'accessibilité** : ils favorisent l'intégration des sources d'énergies renouvelables sur l'ensemble du réseau ;
- **L'économie** : ils apportent, grâce à une meilleure gestion du système, des économies d'énergie et une diminution des coûts (à la production comme à la consommation).

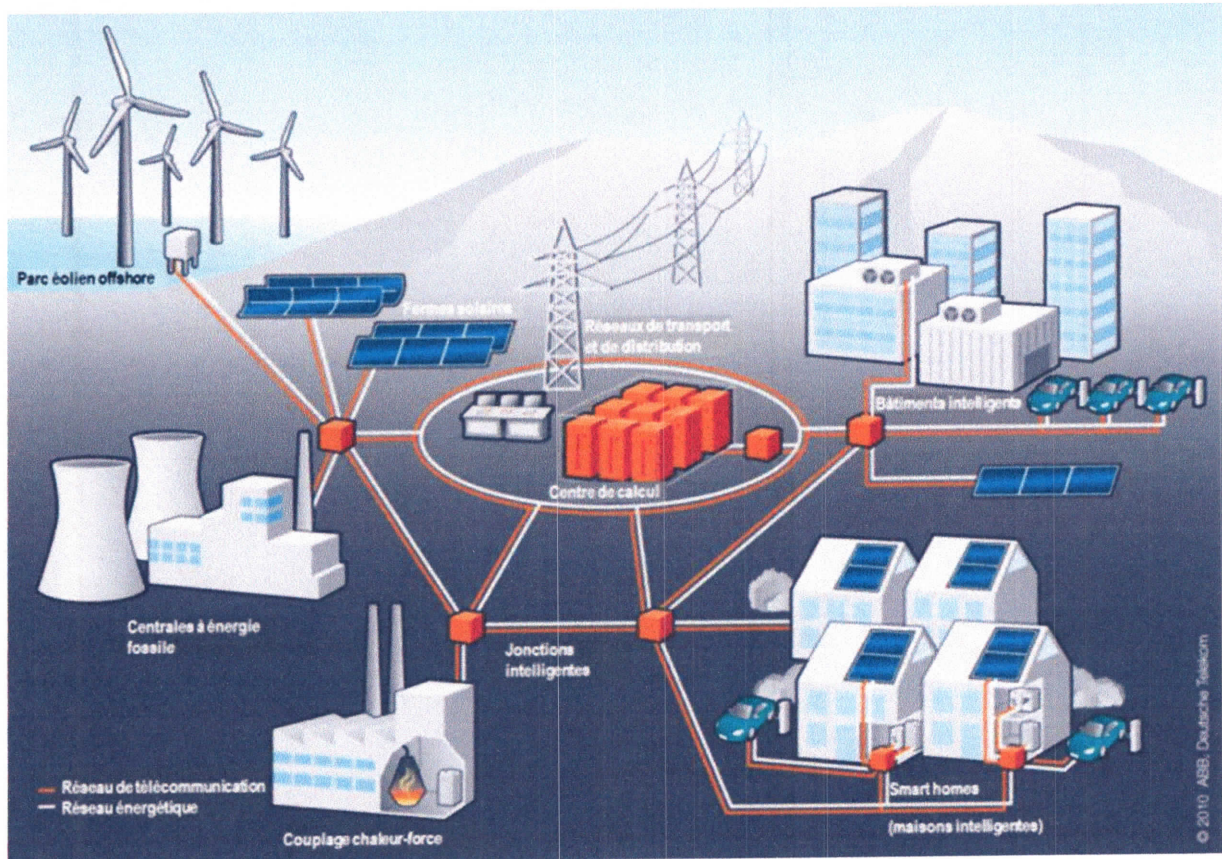


Figure I.1. Représentation schématique d'un smart grid [4].

### III. Historique

Apparue dans les années 1980, la lecture automatique des compteurs (pour surveiller les charges électriques chez le consommateur) est une première étape dans l'émergence des smart grids.

Elle évolue dans les années 1990 vers le principe du compteur communicant, qui renseigne sur la variation de consommation électrique au cours de la journée. En 2000, le projet italien Telegestore est le premier exemple de smart grid. Par l'intermédiaire de ces compteurs, il relie au réseau un grand nombre (27 millions) de foyers [5].

Le suivi et la synchronisation des réseaux ont été améliorés dans les années 1990 par la mise en place de capteurs analysant rapidement et à longue distance les anomalies électriques. Le premier système de mesure utilisant ce type de capteurs est opérationnel en 2000 aux États-Unis.

Aujourd'hui, les réseaux intelligents se développent progressivement. L'expression smart grids se généralise en 2005 avec la mise en place par la Commission Européenne de la plateforme technologique « *Smartgrids* » [5].

Les préoccupations environnementales et les attentes concernant la continuité de la fourniture d'électricité contribuent au déploiement de cette technologie. Les nombreux blackouts, notamment aux États-Unis ou en Italie, rappellent le besoin de moderniser des réseaux électriques très vieillissants.

Actuellement, malgré l'engouement des pouvoirs publics et des industriels, les implantations restent locales et parfois expérimentales. Le développement progressif et l'adaptation des infrastructures prend du temps. En définitive, le développement des smart grids relève davantage d'une évolution dans l'optimisation des réseaux que d'une révolution technologique.

#### IV. Objectifs des smart grids

Compte tenu de la définition établie ci-dessus, les investissements dans un réseau intelligent doivent soutenir au moins un des objectifs suivants :

- Rehausser la résilience du réseau.
- Améliorer la performance environnementale.
- Assurer l'efficacité opérationnelle, y compris la sécurité au travail.

#### V. Les fondements des Smart grid

Les réseaux intelligents sont comme : des réseaux électriques capables d'intégrer efficacement les comportements et actions de tous les utilisateurs qui y sont raccordés « producteurs-consommateurs- utilisateurs » à la fois producteurs et consommateurs afin de constituer un système rentable et durable, présentant des pertes faibles et un niveau élevé de qualité et de sécurité d'approvisionnement.



Rendre le système énergétique "intelligent" revient donc à favoriser la communication et les échanges entre 3 niveaux de systèmes :

- *Les systèmes de production* d'énergies conventionnelles et renouvelables, qui regroupent l'ensemble des capacités de production du secteur électrique,

- *Le système local* qui correspond à une activation de l'intelligence énergétique dans l'industrie et les bâtiments résidentiels, tertiaires ou collectifs, et à l'intégration des énergies renouvelables, des systèmes de stockage et des véhicules électriques,

- *Le système transversal* qui est constitué des réseaux de distribution et de transport actifs, pilotés et ajustés en temps réel entre l'offre d'énergies conventionnelles et renouvelables, et la demande du système local [5].

## VI. Réalité aujourd'hui

Hormis certains projets de recherche, aucun smart grid garantissant un pilotage complètement automatisé des appareils consommateurs et des installations de production n'existe encore dans le monde : il ne s'agit pour l'heure que d'un concept.

L'installation de smart meters a déjà débuté à de nombreux endroits dans l'objectif de transformer le réseau électrique en smart grid. Certaines entreprises d'approvisionnement en électricité se sont déjà forgé une expérience dans ce domaine.

En Europe, les coûts de réalisation pourraient atteindre plusieurs dizaines de milliards d'euros. Selon la Commission européenne, l'installation de 30 millions de compteurs intelligents coûterait 4 milliards d'euros et durerait 8 ans.

Aux États-Unis, le département de l'Énergie estime qu'une amélioration du réseau permettrait d'économiser 46 à 117 milliards de dollars entre 2010 et 2023 [7].

## VII. Comparaison entre les systèmes traditionnels et les smart grids

Les smart grids servent non seulement à piloter des installations de production, mais également à connecter ou déconnecter les charges en fonction des besoins. La gestion de la demande « Demand Side Management » (DSM), par exemple, permet



d'adapter la demande à la production et ainsi de réduire les besoins de stockage en cas d'augmentation de l'injection d'énergies renouvelables [6].

➤ **Systeme traditionnel**

- Structure hiérarchisée
- Centrales généralement de grande taille
- Nombre peu élevé de grandes installations centrales de stockage de l'énergie (centrales de pompage-turbinage)
- Utilisation non généralisée des technologies de l'information et de la communication (TIC).

➤ **Smart grid**

- Nombreux composants de différentes tailles
- Intégration d'installations de production décentralisées
- Intégration de nombreuses petites installations de stockage décentralisées (véhicules électriques)
- Composants plus intelligents
- Utilisation constante des TIC jusqu'aux consommateurs finaux.

### VIII. Les compteurs intelligents

La première étape du lancement d'un smart grid consiste à mesurer la consommation de manière très précise à l'aide de smart meters, les valeurs étant transmises de manière automatisée. Pour les applications actuelles telles que la lecture à distance des compteurs ou des pronostics de production des sources d'énergie renouvelable, une mesure des données tous les quarts d'heure et un envoi quotidien aux exploitants du réseau de distribution suffisent. L'allocation future de l'offre et de la demande par un centre de calcul nécessite une résolution temporelle élevée et un échange de données très rapide.

Les smart meters sont donc indispensables à la mise en place d'un smart grid, mais ne suffisent pas. Une communication bidirectionnelle avec l'unité de gestion centrale s'avère, tout comme la mesure de la consommation, essentielle. Les smart meters peuvent en effet non seulement envoyer des données de mesure, mais également recevoir des signaux de commande et piloter les appareils consommateurs

lorsque ceux-ci disposent de l'équipement adéquat. Une communication fiable entre les appareils de mesure et le centre de calcul est donc primordiale. Elle est aujourd'hui déjà rendue possible par les technologies d'information et de communication modernes (Figure I.2) [7].

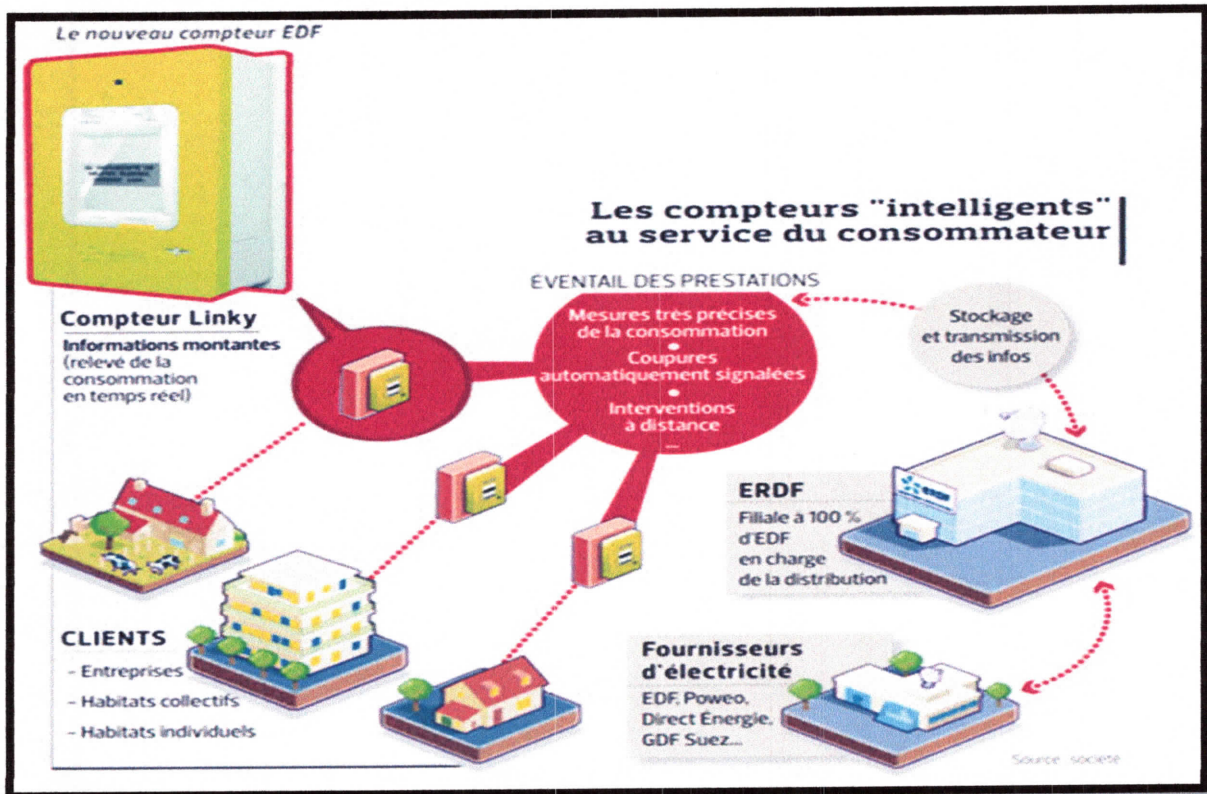


Figure I.2. Compteur intelligent au service de consommateur.

## IX. Avantages et inconvénients des smart meters et des smart grids

Outre la mesure, la communication en temps réel de la consommation au client sur des écrans et des sites internet permet à ce dernier de l'analyser et de la surveiller, et ainsi de gérer la charge et d'économiser de l'électricité. Ces informations immédiates doivent l'inciter à mieux gérer sa consommation, et partant, à la réduire.

La plupart des fournisseurs d'électricité proposent en effet un haut tarif et un bas tarif. Avec l'introduction de smart meters, des tarifs évolutifs basés davantage sur le prix de gros pourraient même être proposés. Cette incitation financière pourrait encourager le consommateur à adapter rapidement ses besoins à la charge du réseau. Il faut en effet que la consommation soit reportée dans le temps, mais aussi réduite pour réaliser réellement des économies.

Les smart meters peuvent également permettre de maîtriser l'injection décentralisée, en assurant une communication bidirectionnelle : les données envoyées mais aussi les signaux de commande reçus peuvent être utilisés pour piloter des installations de production réparties et des appareils consommateurs. Les installations bénéficiant d'une rétribution à prix coûtant et disposant d'une puissance installée de plus de 30 kVA sont équipées d'un smart meter. Celui-ci est utilisé actuellement pour calculer la charge, qui sert à prévoir la production quotidienne. Théoriquement, il devrait pouvoir permettre en outre de commander l'utilisation de l'installation.

Si ces systèmes offrent des avantages, ils présentent également un certain nombre de risques et d'inconvénients. C'est pourquoi leur diffusion est assez lente. Avec le système de régulation actuel, le gestionnaire du réseau de distribution n'a pas la possibilité de répercuter les coûts liés au smart meter, bien que le client final tout comme le fournisseur puissent en tirer avantage.

Enfin, les incitations économiques sont également trop faibles pour entraîner la diffusion des smart meters. Les faibles coûts de l'énergie n'incitent guère les consommateurs à économiser et la demande de smart meters avec incitation de la consommation fait défaut. Enfin, les incitations économiques sont également trop faibles pour entraîner la diffusion des smart meters.

Grâce à la télécommande centralisée, les gestionnaires de réseau de distribution disposent déjà d'un moyen de gérer la charge en pilotant les appareils consommateurs tels que le chauffage électrique, les chauffe-eau électriques et les pompes à chaleur. Les pointes de charge sont ainsi lissées et la charge du réseau équilibrée. La plupart des fournisseurs d'électricité proposent d'ores et déjà une incitation financière visant à assouplir la charge avec le haut tarif/bas tarif. Les avantages d'un smart grid sont déjà en partie exploités aujourd'hui.

Un smart grid pourrait par ailleurs générer un avantage supplémentaire puisque les smart meters et les techniques de communication modernes donnent la possibilité de commander individuellement les différents appareils, ce qui affine ainsi la gestion de la charge. L'intégration de petites installations de production

décentralisée serait ainsi facilitée pour le gestionnaire de réseau, ce qui pourrait le convaincre d'introduire un smart grid [10].

## **X. Enjeux par rapport à l'énergie**

À l'heure actuelle, les réseaux électriques doivent faire face à de nouveaux besoins en énergie, avec notamment le développement de la climatisation, des appareils électroniques ou du chauffage électrique. Cette hausse devrait être amplifiée par de nouveaux usages tels que la voiture électrique ou les pompes à chaleur. Les smart grids visent à apporter une réponse à ces contraintes.

### **X.1. Des avantages économiques et environnementaux**

Les smart grids améliorent la sécurité des réseaux électriques. En équilibrant l'offre et la demande, ils évitent le suréquipement des moyens de production et permettent une utilisation plus adaptée des moyens de stockage de l'électricité, disponibles de manière limitée.

Les réseaux intelligents augmentent aussi l'efficacité énergétique globale : ils réduisent les pics de consommation, ce qui atténue les risques de panne généralisée.

Enfin, ils limitent l'impact environnemental de la production d'électricité en réduisant les pertes et en intégrant mieux les énergies renouvelables.

### **X.2. Les limites dans la mise en œuvre**

Cependant, le coût des investissements reste élevé. En effet, les smart grids doivent être implantés sur l'ensemble du réseau et impliquer tous les acteurs pour être efficaces.

L'autre obstacle est la diversité des acteurs, car ils doivent mettre au point des systèmes communicants variés avec des logiques convergentes. De plus, les données recueillies sont complexes à gérer et à stocker, compte tenu de l'importante quantité d'informations à traiter.

Enfin, les informations sur les horaires ou les activités des consommateurs et des producteurs sont confidentielles. Des normes sur la protection des données doivent être appliquées.



### X.3. Les acteurs majeurs des smart grids

Le développement des réseaux intelligents nécessite le concours de nombreux acteurs :

- **les consommateurs** : en régulant eux-mêmes leur consommation d'électricité, participent à l'efficacité du système ;
- **les producteurs d'électricité** : Le développement des smart grids permet également aux producteurs décentralisés de petites capacités (ex : les éoliennes ou les panneaux photovoltaïques appartenant à des particuliers) d'être raccordés ;
- **les gestionnaires des réseaux de transport** : Les constructeurs de matériel électrique gèrent et installent les équipements de mesure assurant la sécurité et le fonctionnement des réseaux. Ils sont les acteurs techniques majeurs du développement des smart grids ;
- **les gestionnaires de processeurs et de systèmes informatiques** : développent les technologies d'information indispensables au fonctionnement des réseaux intelligents ;
- **les pouvoirs publics** soutiennent et encadrent le développement des réseaux intelligents notamment par la définition de normes de communication et la protection des systèmes contre les intrusions ou détournements.

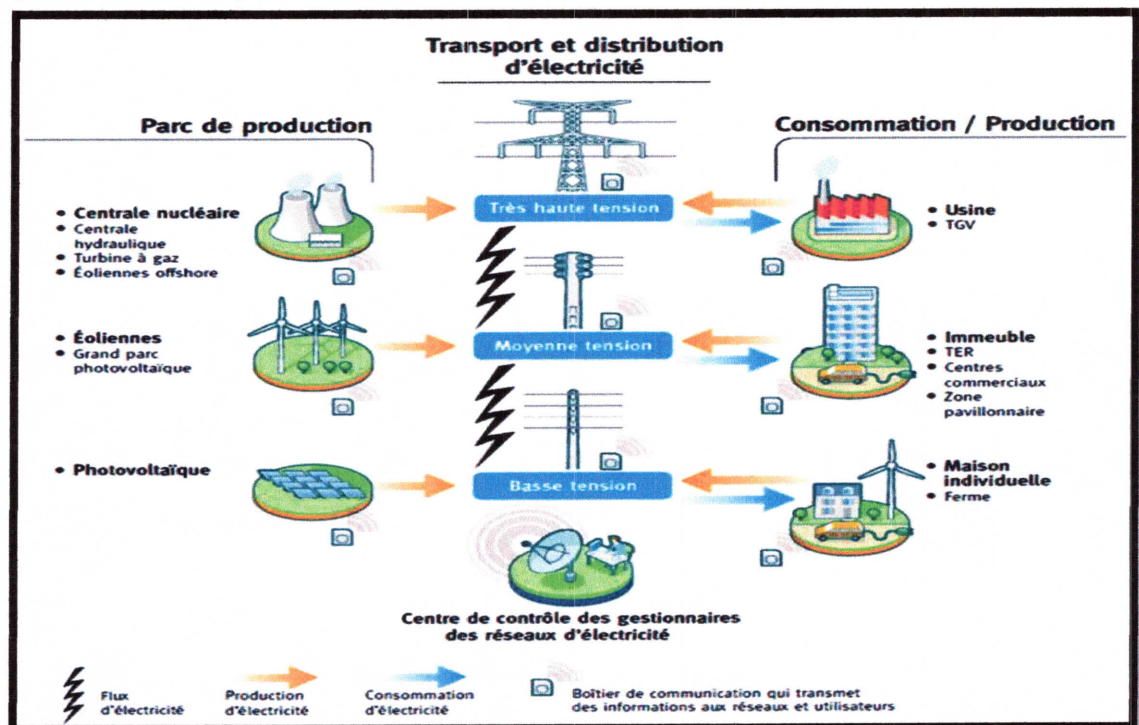


Figure I.3. Gestion bidirectionnelle de l'énergie (Smart grid) [8].

#### X.4. Fonctionnement des smart grids

Au sens large, un réseau intelligent associe l'infrastructure électrique aux technologies numériques qui analysent et transmettent l'information reçue. Ces technologies sont utilisées à tous les niveaux du réseau : production, transport, distribution et consommation.

**Un contrôle des flux en temps réel :** des capteurs installés sur l'ensemble du réseau indiquent instantanément les flux électriques et les niveaux de consommation. Les opérateurs du réseau peuvent alors réorienter les flux énergétiques en fonction de la demande et envoyer des signaux de prix aux particuliers pour adapter leur consommation (volontairement ou automatiquement).

**L'interopérabilité des réseaux :** l'ensemble du réseau électrique comprend le réseau de transport et le réseau de distribution. Le premier relie les sites de production d'électricité aux zones de consommation : ce sont les grands axes qui quadrillent le territoire. Le réseau de distribution s'apparente aux axes secondaires. Il achemine l'électricité jusqu'aux consommateurs finaux. Par l'échange instantané d'informations, les smart grids favorise une interopérabilité entre les gestionnaires du réseau de transport et ceux du réseau de distribution.

**L'intégration des énergies renouvelables au réseau :** les réseaux intelligents reposent sur un système d'information qui permet de prévoir à court et à long terme le niveau de production et de consommation. Les énergies renouvelables qui fonctionnent souvent par intermittence et de façon peu prévisible (ex : l'éolien) peuvent ainsi être mieux gérées.

**Une gestion plus responsable des consommations individuelle :** les compteurs communicants (ou compteurs évolués, « Linky » pour l'électricité) sont les premières versions d'application du réseau intelligent. Installés chez les consommateurs, ils fournissent des informations sur les prix, les heures de pointe de consommation, la qualité et le niveau de consommation d'électricité du foyer. Les consommateurs peuvent alors réguler eux-mêmes leur consommation au cours de la journée. De leur côté, les opérateurs du réseau peuvent détecter plus vite les pannes.



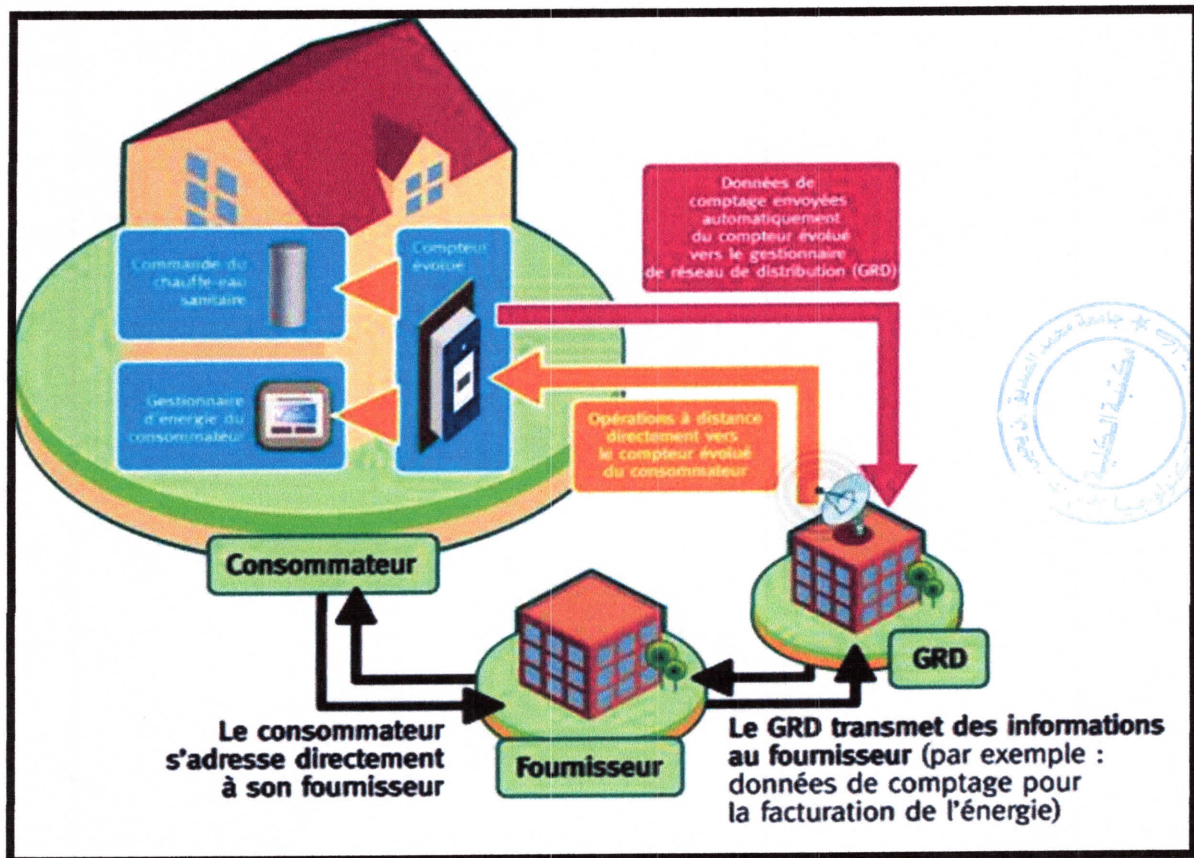


Figure I.4. Principe des compteurs électriques évolués [8].

### X.5. Modèles de smart grid

Afin de contrôler de manière autonome le Smart Grid, il sera nécessaire de gérer de façon optimale la transmission, la distribution, la consommation et la communication. Mathématiciens, électroniciens, informaticiens et bien d'autres spécialistes offrent déjà de nombreux modèles de Smart Grid.

Le système est divisé en modules : **optimisation, structure du réseau, technologies de communication et sécurité** ; et en éléments ou agents : **utilisateurs, énergie, contrôleurs et données**. Une fonction-objectif globale est définie [9].

Les simulations ont donc pour objectif d'optimiser la fonction-objectif globale, cette dernière variant d'un modèle à l'autre. Le Smart Grid est parfois assimilé à un problème de flot, ou à une gestion résidentielle, ou à une structure de marché bidirectionnelle. Mais il s'agit en général d'une vision réduite du Smart Grid, ou de la promotion d'une nouvelle technologie. Ces modèles reconnaissent leur propre faiblesse et la difficulté de modéliser tous les aspects d'un Smart Grid.

Ces modèles cartésiens deviennent très gourmands en mémoire sur des simulations à grande échelle. De plus, il n'analyse pas l'impact de leur modèle sur les acteurs, i.e. sur le comportement de chaque utilisateur. Bien que ces travaux offrent une grande diversité de modèles et présentent des résultats de gestion prometteurs, il n'est pas possible d'intégrer autant de nouvelles technologies fonctionnant sur des standards différents au sein d'un seul Smart Grid à très grande échelle.

Les modèles de Smart Grids présentent deux lacunes : des modèles trop spécifiques et complexes pour une utilisation à grande échelle, et des analyses cartésienne présentant une modélisation en vue top-down [9].

### Conclusion

Les réseaux intelligents comportent des sources de production centralisée et ressources d'énergie décentralisée qui doivent interagir correctement afin d'augmenter l'efficacité, la sécurité, la disponibilité, et la fiabilité du système électrique. Une infrastructure de systèmes de communication et des processeurs distribués et centralisés, pour créer un réseau d'information et de traitement de données est développée aussi pour supporter les systèmes de contrôle du réseau du futur.

Le Smart Grid possède trois niveaux distincts : le niveau local, le microgrid, et le réseau T&D. Le premier a pour objectif de gérer les consommateurs, à la fois par la domotique et une gestion intelligente, ainsi que les énergies renouvelables et toutes technologies connectées aux consommateurs. Le niveau du microgrid représente un écoquartier, un regroupement de niveau local rattaché à un même agrégateur. Le microgrid a une vision à la fois des possibilités de consommation mais aussi de la production disponible. Il doit trouver un consensus entre l'offre et la demande. Le réseau T&D gère quant à lui la distribution de l'énergie dans tout le réseau [9].

# Chapitre II

*Identification des charges élémentaires en basse  
fréquence*



## Introduction

Ce chapitre a pour objectif de proposer une démarche permettant la reconnaissance des différentes charges électrique. Les charges examinées ici sont des charges électriques élémentaires R, RL, RC et RLC ainsi que celles résultant de leurs mises en parallèle.

La méthode de Matrix Pencil sera appliquée au courant électrique délivré aux charges. Ce signal sera donc exprimé sous forme de pôles et résidus.

### I. Contexte et méthode d'analyse

#### I.1. Principe de la méthode d'analyse

La méthode d'analyse utilisée dans ce chapitre peut être schématisée par la figure II.1 :

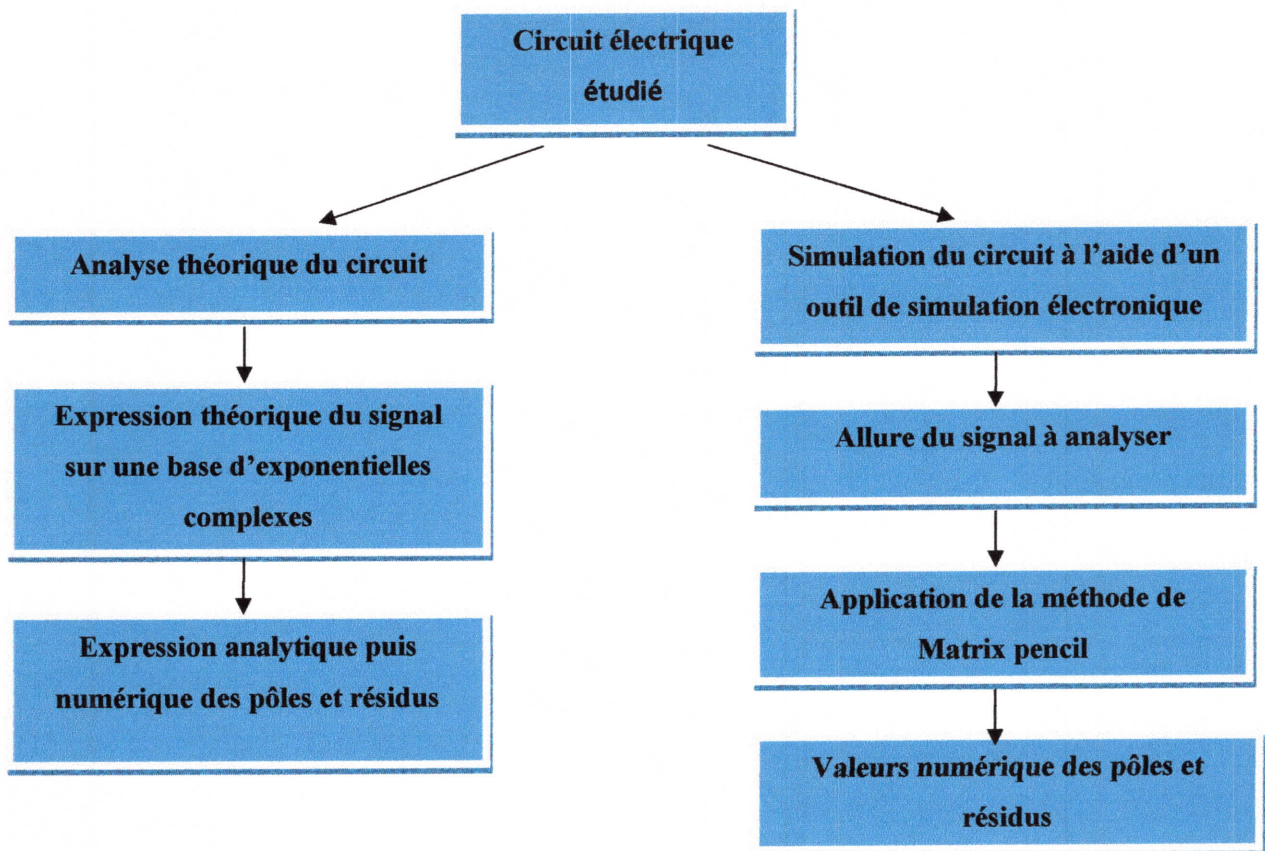


Figure II.1 Principe de la méthode d'analyse

## I.2. Analyse théorique du circuit

Pour chaque type de charge élémentaire, la théorie des circuits permet d'exprimer de façon analytique le courant  $i(t)$  dans la base d'exponentielles complexes aussi utilisée par la méthode de Matrix Pencil (Eq.II.1) [11] :

$$i(t) = \sum_{i=1}^M R_i e^{s_i t} \quad (\text{II.1})$$

Avec ;

$$s_i = \alpha_i + j\beta_i \quad (\text{II.2})$$

$\alpha_i$  = facteurs d'atténuations de valeurs négatives

$\beta_i$  = fréquences angulaires

La démarche utilisée ici fait appel aux résultats classiques des systèmes linéaires. L'étude des équations différentielles qui régissent le fonctionnement de ces systèmes conduit au résultat suivant : la réponse d'un système est la somme de la solution générale de l'équation sans second membre qui correspond au *régime libre* et d'une solution particulière de l'équation avec second membre qui correspond au *régime forcé* ou permanent du système. Les variables permettant de caractériser le système sont appelées variables d'état, elles correspondent soit au courant dans une inductance, soit à la tension aux bornes d'un condensateur.

- **Le régime libre** : traduisant la réponse du système sans excitation est caractéristique de l'équation différentielle. Il contient l'ordre du système ainsi que ses propriétés ; *constante de temps* pour les systèmes du premier ordre, *pulsation propre* et *coefficient d'amortissement* pour les systèmes du deuxième ordre. Ces grandeurs peuvent être déterminées à partir du schéma électrique en éteignant les excitations, c'est-à-dire en remplaçant les sources de tension par un court-circuit et les sources de courant par un circuit ouvert. Pour déterminer complètement ce régime libre, il faut connaître les conditions initiales concernant les variables d'état, les conditions finales sont quant à elles obligatoirement nulles.
- **Le régime forcé** : correspond à une réponse du système avec excitation. Il est donc dans notre cas sinusoïdal, de même fréquence que l'excitation. Pour déterminer ce régime forcé, une technique consiste à utiliser les impédances complexes.



### I.3. Détermination des pôles et des résidus par la méthode de Matrix Pencil

La méthode de Matrix Pencil appliquée directement sur le signal temporel  $i(t)$  fournit les valeurs numériques des pôles et des résidus. Il est nécessaire de préciser les conditions d'application de la méthode, à savoir ; la technique utilisée pour détecter les changements d'état, l'instant de début de traitement, la largeur de la fenêtre d'analyse ainsi que le nombre de points échantillonnés par fenêtre d'analyse [13].

❖ **Détection des changements d'état** La détection des instants de changement d'état (enclenchement ou déclenchement d'une charge) est primordiale pour la phase d'identification. Deux techniques peuvent être utilisées dans la littérature [11] :

- ✓ La première consiste à détecter les instants de changement d'état en utilisant la méthode des Ondelettes puis à appliquer la méthode de Matrix Pencil à partir de cet instant.
- ✓ La deuxième consiste à appliquer systématiquement la méthode de Matrix Pencil sur des fenêtres d'analyse successives. Les variations du nombre de pôles, des valeurs des résidus et des valeurs singulières permettent de détecter un changement d'état.

Cette deuxième technique a l'avantage de n'utiliser qu'une seule méthode pour à la fois détecter les changements d'état et caractériser les charges.

## II. Analyse des charges linéaires

Une charge linéaire  $Z$  est un récepteur constitué de dipôles électriques linéaires, elle est simplement caractérisée par son module et sa phase.

En régime sinusoïdal, elle est définie par une impédance complexe

$$Z = |Z|. \exp(j\varphi) \quad (\text{II.3})$$

En excitant cette impédance par une tension sinusoïdale  $e(t)$ , le courant  $i(t)$  parcourant cette charge est alors solution d'une équation différentielle. Il est composé d'un terme stationnaire relatif au régime forcé ou à la solution particulière  $i_{\text{forcé}}$  et

d'un terme transitoire relatif au régime libre ou à la solution sans second membre libre.

$$i = i_{\text{forcé}} + i_{\text{libre}} \quad (\text{II.4})$$

D'après la représentation de Fresnel :

$$i_{\text{forcé}} = I\sqrt{2} \sin(\omega t - \phi) \quad (\text{II.5})$$

$$\text{si ;} \quad e = \sqrt{2} \sin(\omega t) \quad (\text{II.6})$$

$$I = \frac{E}{Z} = \frac{E \cos(\phi)}{\text{Re}(Z)} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

Pour déterminer  $i_{\text{libre}}$ , on cherche les solutions de la forme  $e^{st}$  ce qui nous amène à résoudre le polynôme caractéristique :

$$\sum_{k=0}^n a_k s^k = 0 \quad (\text{II.8})$$

Ce polynôme peut se mettre sous la forme  $\prod_{l=1}^{l_{\text{max}}} (s - s_l)^{m_l}$  où  $s_l$  est une racine complexe d'ordre  $m_l$  telle que :

$$\sum_{k=0}^n m_l = n \quad (\text{II.9})$$

Le courant relatif à cette phase transitoire s'exprime alors par :

$$i_{\text{libre}} = \sum_{l=1}^{l_{\text{max}}} p_l(t) e^{s_l t} \quad (\text{II.10})$$

Où,  $P_l(t)$  est un polynôme de degré  $(m_l - 1)$ .

Le courant total  $i$  est la somme de  $i_{\text{forcé}}$  et  $i_{\text{libre}}$  donc :

$$i = \sum_{l=1}^{l_{\text{max}}} p_l(t) e^{s_l t} + \frac{E\sqrt{2} \cos(\phi)}{\text{Re}(Z)} \sin(\omega t - \phi) \quad (\text{II.11})$$

Les coefficients des polynômes  $P_l$  sont déterminés à partir des conditions initiales des  $n$  variables d'état relatives à l'impédance d'ordre  $n$  [12].

Dans le cas général où la tension d'entrée présente des harmoniques d'ordres supérieurs :

$$(e_h = E_h \sqrt{2} \sin(h\omega t))_{h>2} \quad (\text{II.12})$$

Le courant harmonique de rang  $h$  s'exprime par  $i_h = I_h \sqrt{2} \sin(h\omega t - \phi_h)$

Où :

$$I_h = \frac{E_h}{|Z_h|} = \frac{E_h \cos(\phi_h)}{\text{Re}(Z_h)} \quad (\text{II.13})$$

Dans ces conditions, le courant forcé est la somme du courant fondamental et des courants harmoniques (II.14) :

$$i_{forcé} = I\sqrt{2} \sin(\omega t) + \sum_{h=2}^{H+1} I_h \sqrt{2} \sin(h\omega t - \phi_h) \quad (\text{II.14})$$

Le courant libre reste inchangé et l'expression du courant total est enrichie par la contribution des harmoniques (II.15) :

$$i = \sum_{l=1}^{l_{max}} p_l(t) e^{s_l t} + \frac{E\sqrt{2}\cos(\phi)}{Re(Z)} \sin(\omega t - \phi) + \sum_{h=2}^{H+1} \frac{E_h\sqrt{2}\cos(\phi_h)}{Re(Z_h)} \sin(h\omega t - \phi_h) \quad (\text{II.15})$$

Dans l'ensemble de ce travail, nous avons considéré que les racines du polynôme caractéristique sont distinctes. C'est souvent le cas des charges traitées en pratique.  $p_l$  se confond alors avec la constante  $R_l$  et  $l_{max}$  atteint la valeur  $n$ .

Notre méthode d'identification Matrix Pencil est capable d'extraire l'ensemble de ces pôles et résidus. Ils se déduisent de la formule (II.15) tels que les  $n$  pôles libres  $(s_l)_{1 \leq l \leq n}$  et  $2(H+1)$  pôles forcés  $(\pm jh\omega)_{1 \leq h \leq H+1}$

Les résidus du régime libre sont  $(R_l)_{1 \leq l \leq n}$  et les résidus du régime forcé sont :

$$\left( \pm \frac{E_h\sqrt{2}}{2j} \frac{e^{\mp j\phi_h}}{|Z_h|} \right)_{1 \leq h \leq H+1} \quad (\text{II.16})$$

Afin de comprendre et vérifier la capacité d'identification de notre méthode, on se propose de traiter des charges élémentaires du premier et du second ordre qui sont à la base de charges réelles.

### II.1. Charge résistive

Le schéma général du circuit électrique simulé en figure II.2 devient dans ce cas:

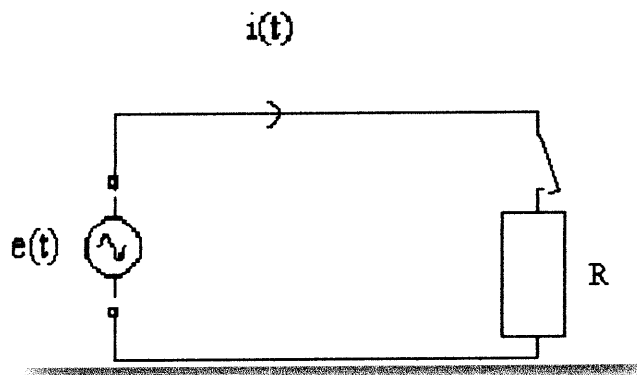


Figure II.2. Schéma électrique du circuit d'une charge résistive.

La charge est enclenchée à l'instant  $t = t_0 = 0$ , la condition initiale  $i(t = t_0) = 0$ .

L'analyse théorique du circuit fournit la forme analytique du signal (Eq.II.17). Cette expression correspond au régime forcé, le régime libre n'existe pas pour ce type de charge.

$$i(t) = \frac{E\sqrt{2}}{R} \sin(\omega t) \tag{II.17}$$

Exprimé sur une base d'exponentielles complexes,  $i(t)$  s'écrit (II.18) :

$$i(t) = \frac{E\sqrt{2}}{R} \cdot \frac{e^{j\omega t} - e^{-j\omega t}}{2j} \tag{II.18}$$

Cette expression révèle la présence de seulement deux pôles imaginaires purs conjugués  $j\omega$  et  $-j\omega$  liés au régime forcé et associés à deux valeurs de résidus également conjuguées. Le tableau II.1 résume le résultat de cette décomposition en termes de pôles et résidus.

indice $i$	poless <sub><math>i</math></sub> = $\alpha_i + j\beta_i$	Résidus $R_i$
1	$0 + j\omega$	$0 + j \frac{E\sqrt{2}}{2R}$
2	$0 - j\omega$	$0 - j \frac{E\sqrt{2}}{2R}$

Tableau II.1. Pôles et résidus théoriques dans le cas d'une charge résistive R

Ainsi une charge résistive R est caractérisée par uniquement deux pôles liés au régime forcé de valeur  $\pm j\omega$  associés à des résidus imaginaires purs de valeur  $\mp j \frac{E\sqrt{2}}{2R}$

### II.2. Charge RL parallèle

Le schéma général du circuit électrique simulé figure II.3 devient dans ce cas :

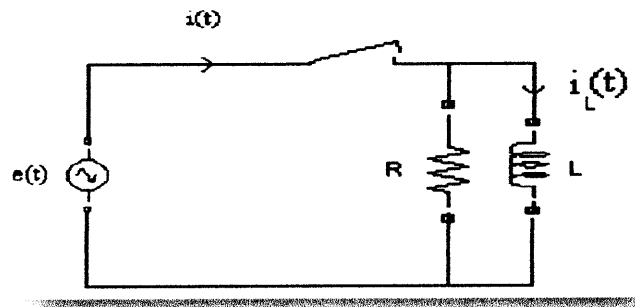


Figure.II.3 Schéma électrique dans le cas d'une charge RL parallèle.

La charge est enclenchée à l'instant  $t = t_0 = 0$ . La condition initiale relative à la variable d'état, ici le courant dans l'inductance est :  $i_L(t_0) = i_{L0}$ .

L'analyse théorique du circuit permet d'écrire le courant  $i(t)$  sous la forme suivante :

$$i(t) = i_{L0} + \frac{E\sqrt{2}}{R\cos(\phi)} \sin(\omega t - \phi) - \frac{E\sqrt{2}}{R\cos(\phi)} \sin(\omega t_0 - \phi) \quad (\text{II.19})$$

Avec :

$$\tan(\phi) = \frac{R}{L\omega} \quad (\text{II.20})$$

Exprimé sur une base d'exponentielles complexes,  $i(t)$  devient :

$$i = i_{L0} - \frac{E\sqrt{2}}{R\cos(\phi)} \sin(\omega t_0 - \phi) + \frac{E\sqrt{2}}{R\cos(\phi)} \cdot \frac{e^{j(\omega t - \phi)} - e^{-j(\omega t - \phi)}}{2j} \quad (\text{II.21})$$

Cette expression révèle la présence de seulement deux pôles imaginaires purs conjugués  $j\omega$  et  $-j\omega$  liés au régime forcé et associés à deux valeurs de résidus également conjuguées. Cette charge ne génère pas de régime libre, en effet on constate l'absence de pôle à partie réelle négative traduisant la décroissance exponentielle liée à ce régime. En revanche, on observe une composante continue qui se manifestera par un pôle nul associé à une valeur de résidu réelle non nulle.

Le tableau II.2. donne le résultat de cette décomposition théorique.

indice $i$	poles $s_i = \alpha_i + j\beta_i$	Résidus $R_i$
1	$0 + j\omega$	$\frac{E\sqrt{2}}{2jR\cos(\phi)} e^{-j\phi}$
2	$0 - j\omega$	$-\frac{E\sqrt{2}}{2jR\cos(\phi)} e^{j\phi}$
3	0	$i_{L0} - \frac{E\sqrt{2}}{R\cos(\phi)} \sin(\omega t_0 - \phi)$

Tableau II.2. Pôles et résidus théoriques dans le cas d'une charge RL parallèle

Une charge RL parallèle peut donc être caractérisée par deux pôles liés au régime forcé de valeur  $\pm j\omega$  associés à des résidus complexes conjugués de

valeurs  $\pm \frac{E\sqrt{2}}{2jR\cos(\varphi)} e^{\mp j\varphi}$  et éventuellement par un pôle nul à valeur de résidu réel  $i_{L0} - \frac{E\sqrt{2}}{R\cos(\varphi)} \sin(\omega t_0 - \varphi)$  représentant une composante continue.

### II.3. Charge RC série

Le schéma général du circuit électrique simulé figure II.4 devient dans ce cas :

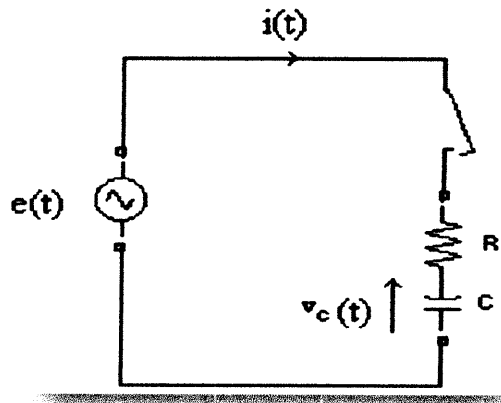


Figure II.4. Schéma électrique dans le cas d'une charge RC série.

La charge est enclenchée à l'instant  $t = t_0 = 0$ . La condition initiale relative à la variable d'état, ici la tension aux bornes du condensateur est  $v_c(t = t_0) = v_{c0}$ .

L'analyse théorique du circuit permet d'écrire le courant  $i(t)$  sous la forme suivante (II.22) :

$$i(t) = -\frac{1}{R} (v_{c0} - E\sqrt{2} \sin(\varphi) \cos(\omega t_0 - \varphi)) e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} + \frac{E\sqrt{2}}{R} \cos(\varphi) \sin(\omega t - \varphi) \quad (\text{II.22})$$

Avec,

$$\tan(\varphi) = \frac{-1}{RL\omega} ; \tau = RC \quad (\text{II.23})$$

Exprimé sur une base d'exponentielles complexes, le courant  $i(t)$  devient (II.24) :

$$i(t) = \frac{-1}{R} (v_{c0} - E\sqrt{2} \sin(\varphi) \cos(\omega t_0 - \varphi)) e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} + \frac{E\sqrt{2}}{R} \cos(\varphi) \frac{e^{j(\omega t - \varphi)} - e^{-j(\omega t - \varphi)}}{2j} \quad (\text{II.24})$$

Comme dans les cas précédents, il apparaît dans cette expression les deux pôles imaginaires purs conjugués  $j\omega$  et  $-j\omega$  liés au régime forcé et associés à deux valeurs



de résidus complexes conjugués. On observe la présence d'un pôle supplémentaire réel négatif qui traduit le régime libre caractérisé par une décroissance exponentielle, associé à un résidu réel négatif. Le tableau II.3 donne le résultat de cette décomposition théorique.

indice $i$	poles $_i = \alpha_i + j\beta_i$	Résidu $R_i$
1	$0 + j\omega$	$\frac{E\sqrt{2}}{2jR} \cos(\varphi) e^{-j\varphi}$
2	$0 - j\omega$	$-\frac{E\sqrt{2}}{2jR} \cos(\varphi) e^{+j\varphi}$
3	$-\frac{1}{\tau} + 0j$	$-\frac{1}{R} (v_{c0} - E\sqrt{2} \sin(\varphi) \cos(\omega t_0 - \varphi))$

Tableau II.3. Pôles et résidus théoriques dans le cas d'une charge RC série.

La confrontation des valeurs numériques obtenues avec les deux méthodes donne une bonne adéquation avec une précision de l'ordre du centième.

Ainsi une charge RC série est caractérisée par trois couples pôle-résidu, deux pôles liés au régime forcé de valeurs  $\pm j\omega$  associés à des résidus complexes conjugués de valeurs  $\pm \frac{E\sqrt{2}}{2jR} \cos(\varphi) e^{\mp j\varphi}$  et un pôle réel négatif traduisant le régime libre et associé à un résidu réel négatif de valeur :

$$\frac{-1}{R} (v_{c0} - E\sqrt{2} \sin(\varphi) \cos(\omega t_0 - \varphi)) \quad (\text{II.25})$$

#### II.4. Charge RL série

Le schéma général du circuit électrique est donné par la figure II.5 :

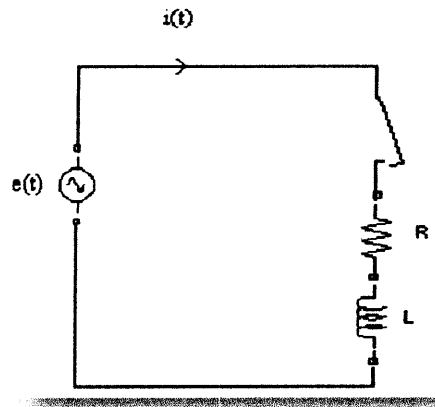


Figure II.5 Schéma électrique dans le cas d'une charge RL série.

La charge est enclenchée à l'instant  $t = t_0 = 0$ . La condition initiale relative à la variable d'état, ici le courant dans l'inductance est :

$$i(t_0) = i_{L0} \quad (\text{II.26})$$

L'analyse théorique du circuit permet d'écrire le courant  $i_L(t)$  sous la forme suivante :

$$i_L(t) = \left( i_{L0} - \frac{E\sqrt{2}}{R} \cos(\varphi) \sin(\omega t - \varphi) \right) e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} + \frac{E\sqrt{2}}{R} \cos(\varphi) \sin(\omega t - \varphi) \quad (\text{II.27})$$

Avec :

$$\tan(\varphi) = \frac{L\omega}{R} ; \quad \tau = \frac{L}{R} \quad (\text{II.28})$$

Exprimé sur une base d'exponentielles complexes, le courant  $i(t)$  devient :

$$i_L(t) = \left( i_{L0} - \frac{E\sqrt{2}}{R} \cos(\varphi) \sin(\omega t_0 - \varphi) \right) e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} + \frac{E\sqrt{2}}{R} \cos(\varphi) \frac{e^{j(\omega t - \varphi)} - e^{-j(\omega t - \varphi)}}{2j} \quad (\text{II.29})$$

Comme dans les cas précédents, il apparaît dans cette expression les deux pôles imaginaires purs conjugués  $j\omega$  et  $-j\omega$  liés au régime forcé et associés à deux valeurs de résidus complexes conjuguées. On observe la présence d'un pôle supplémentaire réel négatif qui traduit le régime libre caractérisé par une décroissance exponentielle, associé à un résidu réel positif. On retrouve bien ici la réponse d'une charge du premier ordre de constante de temps  $\tau = \frac{L}{R}$

Le tableau II.4 donne le résultat de cette décomposition théorique.

Indice $i$	Pole $s_i = \alpha_i + j\beta_i$	Résidu $R_i$
1	$0 + j\omega$	$\frac{E\sqrt{2}}{2jR} \cos(\varphi) e^{-j\varphi}$
2	$0 - j\omega$	$-\frac{E\sqrt{2}}{2jR} \cos(\varphi) e^{+j\varphi}$
3	$-\frac{1}{\tau} + 0j$	$(i_{L0} - \frac{E\sqrt{2}}{R} \cos(\varphi) \sin(\omega t_0 - \varphi))$

Tableau II.4 Pôles et résidus théoriques dans le cas d'une charge RL série.

Ainsi une charge RL série est caractérisée par trois couples pôle-résidu, deux pôles liés au régime forcé de valeurs  $\pm j\omega$  associés à des résidus complexes conjugués de valeurs  $\pm \frac{E\sqrt{2}}{2jR} \cos(\varphi) e^{\mp j\varphi}$  et un pôle réel négatif traduisant le régime libre et associé à un résidu réel positif de valeur :

$$i_{L0} - \frac{E\sqrt{2}}{R} \cos(\varphi) \sin(\omega t_0 - \varphi). \quad (\text{II.30})$$

## II.5. Charge RLC série

Le schéma général du circuit électrique simulé est donné figure II.6. La charge est enclenchée à l'instant  $t = t_0 = 0$ . Les deux conditions initiales relatives aux deux variables d'état sont :  $v_C(t = t_0) = v_{C0}$  et  $i_L(t_0) = i_{L0}$ .

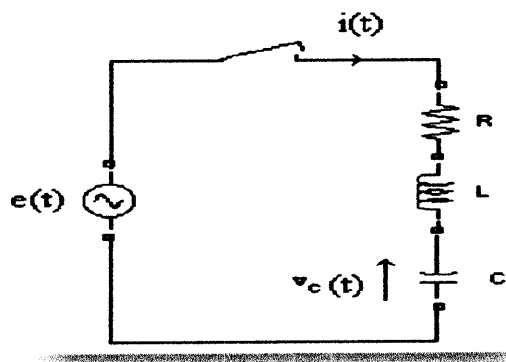


Figure II.6. Schéma électrique dans le cas d'une charge RLC série.

L'analyse théorique du circuit permet d'obtenir le courant  $i(t)$  sous la forme suivante :

$$i(t) = \frac{E\sqrt{2}}{R} \cos(\varphi) \sin(\omega t - \varphi) + A e^{k_1 \omega_0 (t-t_0)} + B e^{k_2 \omega_0 (t-t_0)} \quad (\text{II.31})$$

Avec :

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (\text{II.32})$$

$A$ ,  $B$ ,  $k_1$  et  $k_2$  : sont des variables internes aux calculs et  $k_1$  et  $k_2$  sont des valeurs complexes.

Exprimé sur une base d'exponentielles complexes,  $i(t)$  devient :

$$i(t) = \frac{E\sqrt{2}}{R} \cos(\varphi) \frac{e^{j(\omega t - \varphi)} - e^{-j(\omega t - \varphi)}}{2j} + A e^{k_1 \omega_0 (t-t_0)} + B e^{k_2 \omega_0 (t-t_0)} \quad (\text{II.33})$$

Comme dans les cas précédents, il apparaît dans cette expression les deux pôles imaginaires purs conjugués  $+j\omega$  et  $-j\omega$  liés au régime forcé et associés à deux valeurs de résidus complexes conjuguées. S'y ajoutent deux pôles supplémentaires complexes conjugués qui traduisent le régime libre, associés à deux valeurs de résidu également complexes conjuguées. On retrouve bien ici la réponse oscillatoire d'une charge du deuxième ordre caractéristique coefficient d'amortissement et sa pulsation propre.

Le tableau II.5 donne le résultat de cette décomposition en termes de pôles et résidus.

Indice $i$	Pole $s_i = \alpha_i + j\beta_i$	Résidu $R_i$
1	$0 + j\omega$	$\frac{E\sqrt{2}}{2jR} \cos(\varphi) e^{-j\varphi}$
2	$0 - j\omega$	$-\frac{E\sqrt{2}}{2jR} \cos(\varphi) e^{+j\varphi}$
3	$k_1 \omega_0$	$A e^{(-k_1 \omega_0 t_0)}$
4	$k_2 \omega_0$	$B e^{(-k_2 \omega_0 t_0)}$

Tableau II.5. Pôles et résidus théoriques dans le cas d'une charge RLC série.

Ainsi une charge RLC série est caractérisée par quatre couples pôle-résidu, deux pôles liés au régime forcé de valeurs  $\pm j\omega$  associés à des résidus complexes conjugués de valeurs  $\pm \frac{E\sqrt{2}}{2jR} \cos(\varphi) e^{\mp j\varphi}$  et deux pôles complexes conjugués de valeurs  $k_1\omega_0, k_2\omega_0$  traduisant le régime libre et associés à deux résidus complexes conjugués de valeurs  $Ae^{(k_1\omega_0)}$  et  $Be^{(k_2\omega_0)}$ .

### III. Mise en parallèle des charges élémentaires

On considère ici une charge linéaire (figure II.2) plus complexe constituée de différentes charges élémentaires en parallèle pouvant être enclenchées ou déclenchées de façon indépendante. L'objectif est de montrer comment, en analysant le courant  $i(t)$  à l'entrée du circuit à l'aide de la méthode de Matrix Pencil, on peut reconnaître chacune des charges élémentaires enclenchées.

Au paragraphe précédent, l'examen du courant absorbé par chaque charge élémentaire a permis de caractériser chacune d'elle par un ensemble de couples pôle-résidu. Les tableaux II.6.a, II.6.b récapitulent les résultats obtenus pour chacune des charges.

Charge élémentaire		R	RL série
Régime forcé	nombre	2	2
	Pole	$\pm j\omega$	$\pm j\omega$
	résidu	$\pm \frac{E\sqrt{2}}{2jR}$	$\pm \frac{E\sqrt{2}}{2jR} \cos(\varphi) e^{\pm j\varphi}$
Régime libre	nombre	0	1
	Pole		$-\frac{1}{\tau}$
	résidu		$(i_{L0} - \frac{E\sqrt{2}}{R} \cos(\varphi) \sin(\omega t_0 - \varphi))$

Tableau II.6.a. Paramètres de comparaison entre les charges élémentaires.

Charge élémentaire		RC série	RLC série
Régime forcé	nombre	2	2
	Pole	$\pm j\omega$	$\pm j\omega$
	résidu	$\pm \frac{E\sqrt{2}}{2jR} \cos(\varphi) e^{\pm j\varphi}$	$\pm \frac{E\sqrt{2}}{2jR} \cos(\varphi) e^{\pm j\varphi}$
Régime libre	nombre	1	2
	Pole	$\frac{-1}{\tau}$	$k_1\omega_0, k_2\omega_0$
	résidu	$\frac{-1}{R}(v_{c0} - E\sqrt{2} \sin(\varphi) \cos(\omega t_0 - \varphi))$	$A e^{(-k_1\omega_0 t_0)}$ $B e^{(-k_2\omega_0 t_0)}$

Tableau II.6.b. Paramètres de comparaison entre les charges élémentaires.

Lorsque plusieurs charges en parallèle sont enclenchées, le courant total absorbé est égal à la somme des courants absorbés par chacune des charges. Ce courant total est donc défini par la somme instantanée des courants absorbés par les charges enclenchées.

L'étude théorique relative à une charge linéaire  $Z$  développée précédemment (Paragraphe II) peut s'élargir à la mise en parallèle de  $N_c$  charges linéaires distinctes, chacune consommant un courant  $i_i$  présentant  $n_i$  pôles libres :  $(s_{l,i})_{1 \leq l \leq n_i}^{1 \leq i \leq N_c}$  et  $2(H+1)$  pôles forcés  $(\mp j\varphi_h)_{1 \leq h \leq H+1}$

Les résidus correspondants se déduisent de la forme générique (Eq.II.15).

$(R_{l,i})_{1 \leq l \leq n_i}^{1 \leq i \leq N_c}$  sont Les résidus des régimes libres et  $(\pm \frac{E_h\sqrt{2}}{2j} \sum_{i=1}^{N_c} \frac{e^{\mp j\varphi_{h,i}}}{|Z_{h,i}|})_{1 \leq h \leq H+1}$  sont les résidus du régime forcé.

Ainsi, pour le régime forcé, les pôles étant identiques pour toutes les charges, le résidu total ne sera autre que la somme algébrique des résidus caractéristiques de chacune des charges élémentaires. Par contre, les pôles liés au régime libre sont



différents pour chacune des charges, par conséquent, les résidus associés ne s'ajouteront pas, ils apparaîtront de façon distincte.

Les deux configurations étudiées ici sont respectivement les enclenchements simultanés de différents types de charges et les enclenchements séquentiels.

### III.1. Enclenchements simultanés

Le terme simultané exprime ici tout intervalle de temps inférieur à la période d'échantillonnage.

On se propose ici de montrer la capacité de la méthode de Matrix Pencil à identifier plusieurs charges ayant été enclenchées simultanément.

#### III.1.1. Enclenchements simultanés de charges de même type

L'exemple étudié est illustré par le circuit électrique de la figure II.7.

Les deux charges sont de type RC série. Les charges sont enclenchées à l'instant  $t=t_0=0$ . Les conditions initiales sont données par :  $v_{c1}(t=t_0) = v_{10}$  et  $v_{c2}(t=t_0) = v_{20}$ .

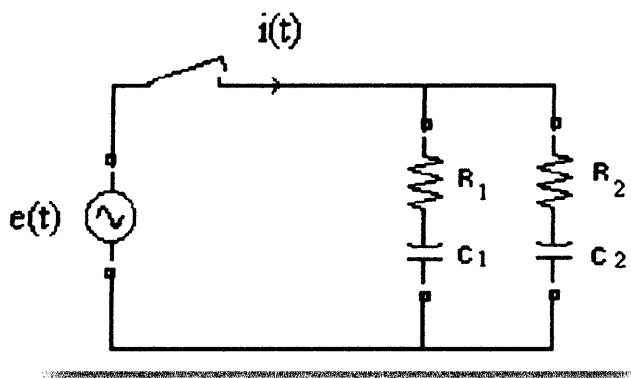


Figure II.7. Schéma électrique du circuit simulé dans le cas de deux charges RC série mises en parallèle et enclenchées simultanément

#### I.1.2. Enclenchements simultanés de charges de types différents

Pour tester ce cas de figure on considère une charge RC série en parallèle avec une charge RLC série.

Le circuit électrique simulé est donné figure II.8

Les charges sont enclenchées à l'instant  $t = t_0 = 0$ . Les conditions initiales sont données par  $v_{c1}(t = t_0) = v_{10}$ ,  $i_{L2}(t = t_0) = i_{20}$ ,  $v_{c2}(t = t_0) = v_{20}$ .

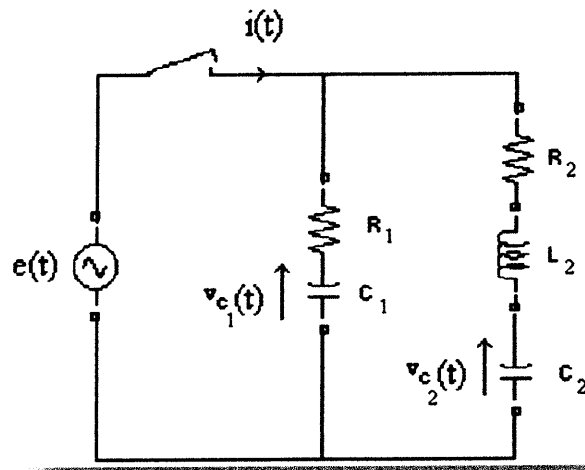


Figure II.8. Schéma électrique du circuit simulé dans le cas de l'enclenchement simultané d'une charge  $R_1C_1$  série mise en parallèle avec une charge  $R_2L_2C_2$  série

### III.2. Enclenchements séquentiels

Dans cette partie, plusieurs charges élémentaires mises en parallèle sont enclenchées à des instants différents. Outre la phase de reconnaissance des différentes charges, une difficulté supplémentaire apparaît dans ce cas, identifier les instants auxquels sont enclenchées les différentes charges. Cette détection des instants de changement d'état peut être réalisée de différentes manières.

La première technique consiste à utiliser la méthode des ondelettes pour détecter les instants de changement d'état puis à appliquer la méthode de Matrix Pencil à partir de ces instants.

La deuxième consiste à appliquer systématiquement la méthode de Matrix Pencil sur des fenêtres d'analyse successives.

A l'issue de chaque traitement, la méthode fournit un ensemble de couples pôle-résidu ainsi qu'un ensemble de valeurs singulières non directement exploitées jusqu'alors. Cette deuxième technique utilise les variations du nombre de pôles ou des valeurs des résidus ou des valeurs singulières pour détecter un changement d'état [11].

Une modification des valeurs singulières traduit de façon synchrone une transition dans le signal traité.

Pour un état stationnaire, c'est-à-dire en l'absence de commutation de charges, ces valeurs singulières sont constantes. De plus, de manière indirecte, les pôles et résidus sont liés aux valeurs singulières [11].

L'exemple étudié est illustré par le circuit électrique de la figure II.9.

Les trois charges sont enclenchées respectivement aux instants :

$t_1 = 0, 1s$ ,  $t_2 = 0, 27s$  et  $t_3 = 0, 41s$ .

Les conditions initiales sont données par  $i_{L2}(t = t_2) = 0$ ,  $v_{C3}(t = t_3) = 0$ .

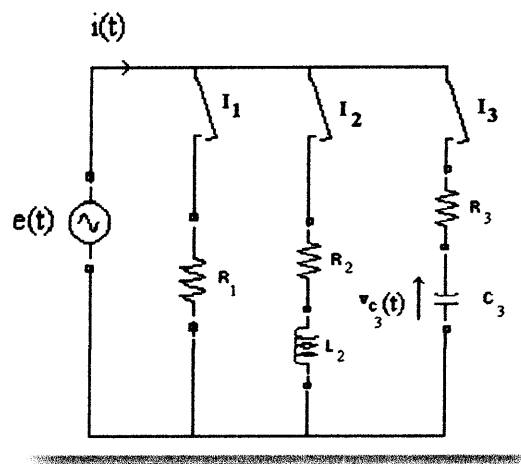


Figure II.9 Schéma électrique du circuit simulé dans le cas d'enclenchements séquentiels de trois charges mises en parallèle.

La méthode des ondelettes appliquée au signal  $i(t)$  permet de détecter les trois instants de changement d'état  $t_1$ ,  $t_2$  et  $t_3$ . La figure II.10 illustre ce résultat. Elle présente la décomposition du courant noté ici  $s$  au niveau 1 à l'aide d'une ondelette mère de type db4. Les trois instants  $t_1$ ,  $t_2$  et  $t_3$  apparaissent nettement dans le signal  $d1$ .

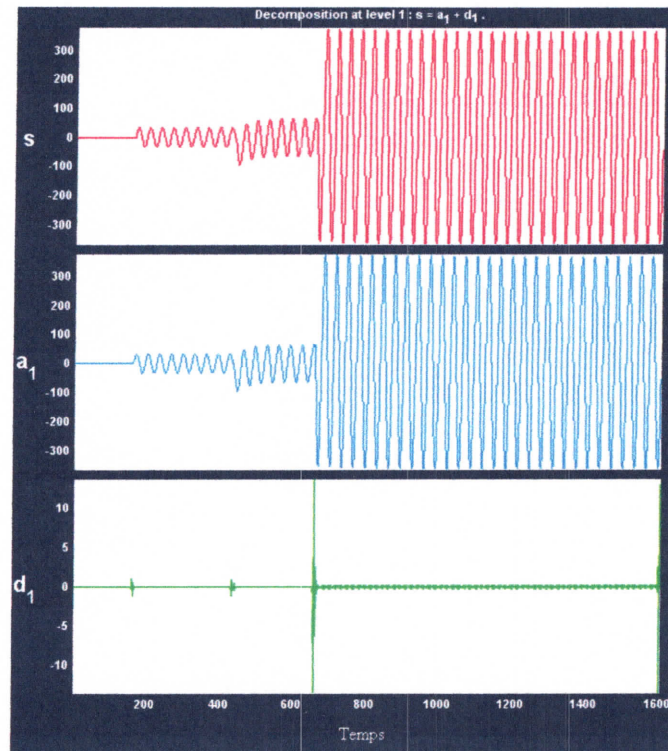


Figure II.10. Décomposition en Ondelettes db4 niveau 1 du courant d'entrée.

Dans un deuxième temps la méthode de Matrix Pencil est appliquée sur les fenêtres successives de 20ms [11].

#### IV. Cas des charges non linéaires

La plupart des dispositifs de l'électronique de puissance se comportent comme des charges non linéaires.

Par exemple, une lampe halogène alimentée directement est une charge linéaire alors que cette même lampe alimentée à travers un gradateur devient une charge non linéaire. Depuis quelques années, on assiste à une forte augmentation des charges non linéaires connectées au réseau électrique telles ordinateurs, télécopieurs, lampes à décharge, fours à arc, chargeurs de batterie, onduleurs alimentations électroniques, etc.

Ces charges non linéaires consomment de la puissance active ou réactive. Elles peuvent être traversées par des courants importants déformés qui ne sont pas purement sinusoïdaux.

Ces courants résultent de la superposition d'un courant fondamental à la fréquence de l'alimentation électrique et de différents courants harmoniques dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence fondamentale. Les différents harmoniques se différencient par leur rang de type pair ou impair. En raison de leur symétrie, les harmoniques de rang pair s'annulent fréquemment, ils n'existent qu'en présence d'une composante continue et sont donc très souvent négligeables en milieu industriel. Au contraire les harmoniques de rang impair sont régulièrement rencontrés sur le réseau électrique.

L'analyse d'un courant non linéaire par la méthode de Matrix Pencil peut être réalisée de différentes manières. Une première approche consiste à éliminer les parties nulles du signal afin de se rapprocher au mieux du traitement d'une charge linéaire. Une deuxième approche consiste quant à elle à traiter le courant dans sa globalité [11].

## Conclusion

Dans notre deuxième chapitre nous avons présenté l'analyse théorique d'un circuit électrique, en déterminant ses valeurs de pôles et résidus par la méthode de Matrix pencil. Ainsi que nous avons analysé des simples charges linéaires telles que R, RL, RC, RLC et leur mise en parallèle.

Nous avons donné les valeurs analytiques des pôles et résidus de ces circuits et des paramètres de comparaison entre les charges élémentaires, et nous avons fini le chapitre par une mention sur la charge non linéaire.



# Chapitre III

*Validation et quelques applications*

### Introduction

Nous avons vu dans la deuxième partie de ce mémoire de fin d'étude quelques développements analytiques des expressions des courants traversant des charges élémentaires ainsi qu'une mise en série et/ou en parallèle de ces dernières. Durant le deuxième chapitre, nous avons montré la possibilité de décomposition mathématique des différentes expressions des courants en une somme de pôles et de résidus selon la méthode pencil [12]. Afin de valider les concepts théoriques que nous avons évoqués, nous proposons dans cette dernière partie quelques applications. Nous commençons par des validations de nos simulations en confrontant nos résultats de calculs avec ceux publiés [11].

### I.1 Validation de nos résultats par la méthode de Matrix pencil

Le but de cette application est de valider nos résultats de simulation avec ceux issus de la littérature, Nous avons traité différents circuits électriques tels que :

- Charge résistive pure R
- Charge RL série et parallèle
- Charge RC parallèle
- Charge RLC série

Nous examinons en suite leurs mises en parallèles ainsi que quelques cas réels des charges domestiques qui consistent en une mise en parallèle des charges électriques élémentaires sus cités.

### I.2. Signaux analysés

Les signaux étudiés dans ce chapitre ne sont pas des signaux électriques mesurés mais ceux obtenus à l'aide d'outils de simulation de circuits électriques SIMULINK [14]. De façon générale, le circuit électrique simulé peut être représenté par le schéma suivant (figure III.1).

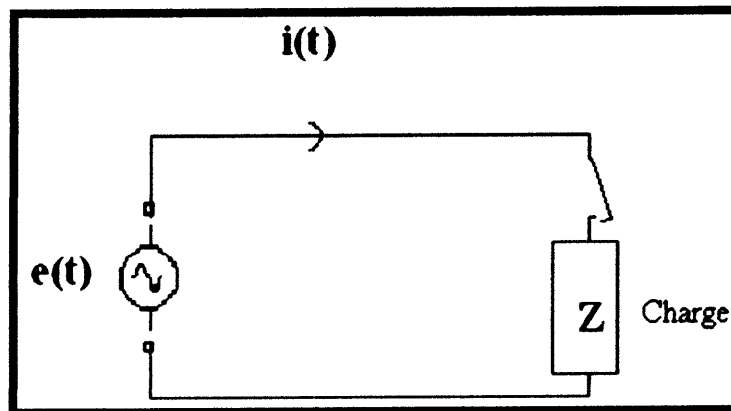


Figure III.1. Schéma général d'une charge électrique simulée.

La source de tension sinusoïdale idéale  $e(t) = E\sqrt{2} \sin(\omega t)$  modélise la tension secteur. On considère  $E = 230V$  et  $\omega = 100\pi$  rd/s.

Le terme charge modélise l'ensemble des charges domestiques en présence. Cette charge totale peut être constituée de plusieurs charges élémentaires en

parallèle. L'interrupteur permet de simuler l'enclenchement (mise en marche) ou le déclenchement (mise en arrêt) de la charge. D'autres groupes de charges avec leurs interrupteurs peuvent être ajoutés en parallèle. Chacune des charges élémentaires peut être enclenchée ou déclenchée indépendamment des autres.

Le courant  $i(t)$  représente le courant à l'entrée de l'installation. Ce courant, dont les valeurs sont calculées par l'outil de simulation, constitue le signal à analyser en vue de l'identification par matrix pencil [13].

Les résultats obtenus par nos développements sous environnement Matlab sont présentés dans les tableaux III.1 à III.7. Nos résultats de calcul sont comparés avec ceux publiés par H. NAJMEDDINE [11].

### I.3. Validation de nos résultats avec ceux publiés

#### I.3.1. Charge résistive pure

Nous présentons dans cette application la simulation d'une charge résistive en utilisant le logiciel SIMULINK [14]. Les résultats numériques seront donnés pour une résistance  $R = 100 \Omega$ .

Le courant traversant la charge est donné en figure III.2.

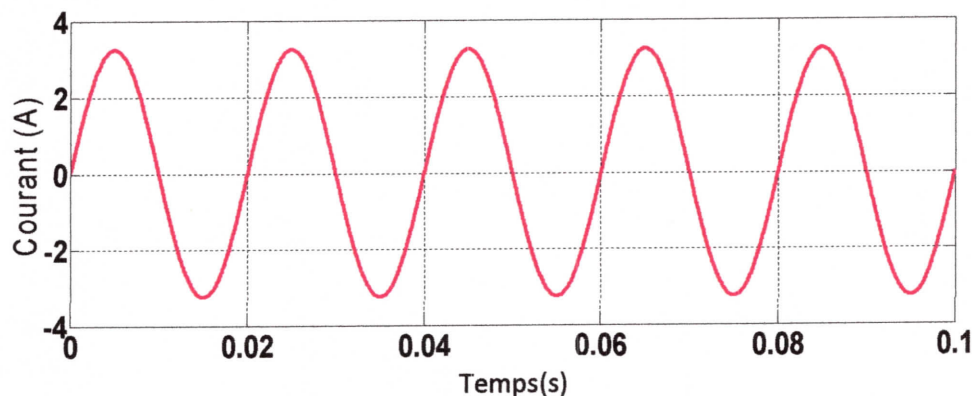


Figure III.2. Courant pour  $R = 100 \Omega$

L'analyse mathématique de ce courant par la méthode matrix pencil [13] donne les résultats regroupés dans le tableau III.1.

Valeurs numériques	
Pôles $S_i$	Résidus $R_i$
$-9.43689 \cdot 10^{-11} + 314.159j$	$-2.96422 \cdot 10^{-13} - 1.62634j$
$-9.43689 \cdot 10^{-11} - 3.14.159j$	$-2.95902 \cdot 10^{-13} + 1.62634j$

a. Nos résultats.

Valeurs théoriques	
$s_i$	$\mathcal{R}_i$
$0 + 314,16j$	$0,0001 - 1,63j$
$0 - 314,16j$	$0,0001 + 1,63j$

b. Résultats publiés [11].

Tableau III.1. Valeurs des pôles et résidus pour une charge résistive.

Nous remarquons que le courant traversant la charge résistive se représente par deux pôles imaginaire pures et conjuguées comme nous avons déjà montré précédemment ; les valeurs théoriques sont  $j\omega$  et  $-j\omega$  liés au régime forcé et associés à deux valeurs de résidus également conjuguées  $0 + \frac{E\sqrt{2}}{j2R}$  et  $0 - \frac{E\sqrt{2}}{j2R}$ .

Nous notons une très bonne concordance entre nos résultats de calculs et ceux publiés [11] et avec la théorie générale.

### I.3.2. Charge RL parallèle

Nous nous intéressons dans cette partie au cas d'une charge RL parallèle, les valeurs numériques de la charge seront donnés pour une charge de valeurs :  $R = 1 \Omega$  et  $L = 10 \text{ mH}$  et le même générateur que précédemment.

Le courant traversant la charge en fonction du temps est donné en figure III.3.

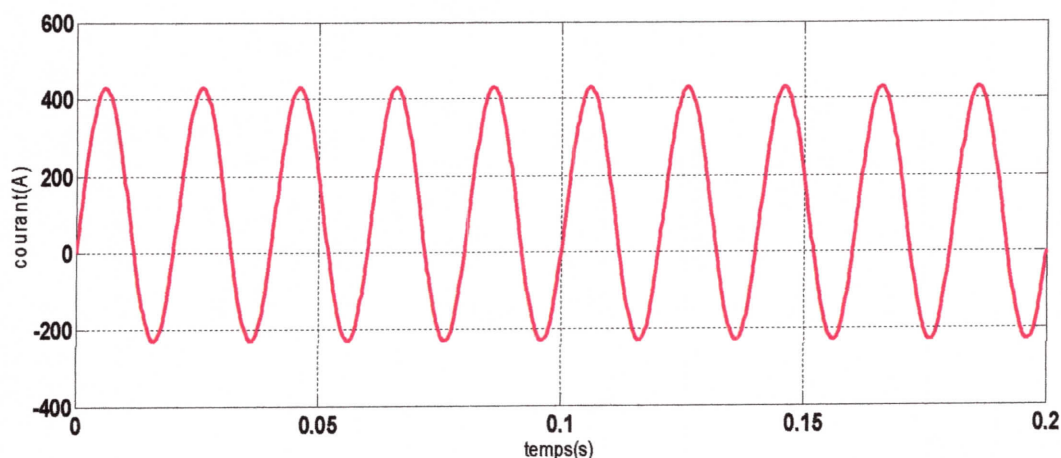


Figure III.3. Courant pour charge RL parallèle.

La décomposition du courant en une somme de pôles et de résidus par la méthode de matrix pencil donne les résultats suivant (Tableau III.2).

Valeurs numériques	
Pôles $S_i$	Résidus $R_i$
$4.09772 \cdot 10^{-8} + 314.159 j$	$-4.99745 \cdot 10^{-1} - 1.56999 \cdot 10^2 j$
$4.09772 \cdot 10^{-8} - 314.159 j$	$-4.99745 \cdot 10^{-1} + 1.56999 \cdot 10^2 j$
$-9.998290 \cdot 10^{-5}$	$9.99483 \cdot 10^{-1} + 3.49635 \cdot 10^{-15} j$

a. Nos résultats de calculs.

Valeurs théoriques	
$s_i$	$\mathcal{R}_i$
$0 + 314,16j$	$-51,77 - 162,63j$
$0 - 314,16j$	$-51,77 + 162,63j$
0	$103,54 + 0j$

b. Résultats publiés [11].

Tableau III.2. Valeurs des pôles et résidus pour une charge RL parallèle.

Nous remarquons une précision acceptable de nos résultats de calculs comparativement avec ceux publiés par H. Najmeddine [11].

Les résultats obtenus confirment les prévisions théoriques ; le régime forcé est représenté par la présence de seulement deux pôles imaginaires purs conjugués  $j\omega$  et  $-j\omega$  associés à deux valeurs de résidus également conjuguées  $\pm \frac{E\sqrt{2}}{2jR \cos(\phi)} e^{\mp j\phi}$ . En revanche, on observe un pôle nul associé à une valeur de résidu réelle non nulle

$$i_{L0} - \frac{E\sqrt{2}}{R \cos(\phi)} \sin(\omega t_0 - \phi)$$

### I.3.3. Charge RL série

Nous proposons dans cette application la simulation d'une charge RL série

Les résultats numériques seront donnés pour une charge de valeurs :

$R = 1 \Omega$  et  $L = 10 \text{ mH}$ .

Le courant traversant la charge en fonction du temps est donné en figure III.4.

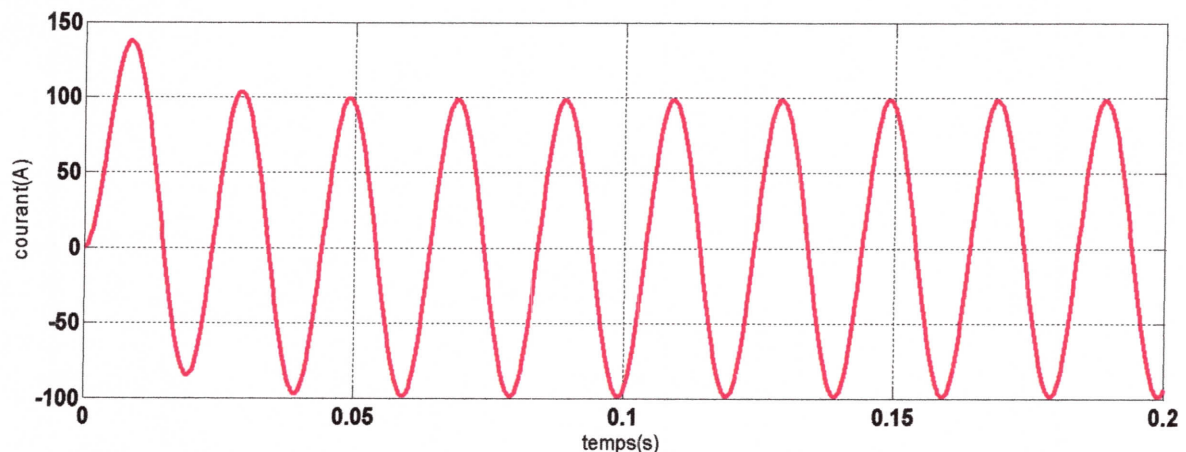


Figure III.4. Courant traversant une RL série.

Les résultats de la décomposition du courant en une somme de pôles et de résidus par la méthode de matrix pencil dans ce cas sont donnés dans le tableau III.3.



Valeurs numériques	
Pôles $S_i$	Résidus $R_i$
-100.000	94.0110-2.70029 $10^{-11}j$
$-1.79856 \cdot 10^{-9} + 314.159j$	-47.00551-14.96231 j
$-1.79856 \cdot 10^{-9} - 314.159j$	-47.00551+14.96231 j

a. Nos résultats.

Valeurs théoriques	
$s_i$	$\mathcal{R}_i$
$0 + 314,16j$	$-47 - 14,96j$
$0 - 314,16j$	$-47 + 14,96j$
$-100 + 0j$	$94,01 + 0j$

b. Résultats publiés [11].

Tableau III.3. Pôles et résidus pour une charge RL série.

Nous remarquons une très bonne concordance de nos résultats de calculs avec ceux publiés [11] en plus que les prévisions théoriques sont confirmés. En effet, la charge est du RL série est caractérisée par trois couples pôle-résidu, deux pôles liés au régime forcé de valeurs  $\pm j\omega$  associés à des résidus complexes conjugués de valeurs  $\pm \frac{E\sqrt{2}}{2jR} \cos(\phi) e^{\mp j\phi}$  et un pôle réel négatif traduisant le régime libre et associé à un résidu réel positif de valeur égale à  $i_{L0} - \frac{E\sqrt{2}}{R} \cos(\phi) \sin(\omega t_0 - \phi)$ .

### I.3.4. Charge RC série

Nous examinons dans cette partie le cas d'une charge RC série, les valeurs de la charge seront donnés comme suit :  $R = 10 \Omega$  et  $C = 1 \text{ mF}$ .

La variation du courant traversant cette charge en fonction du temps est donnée par simulation en figure III.5.

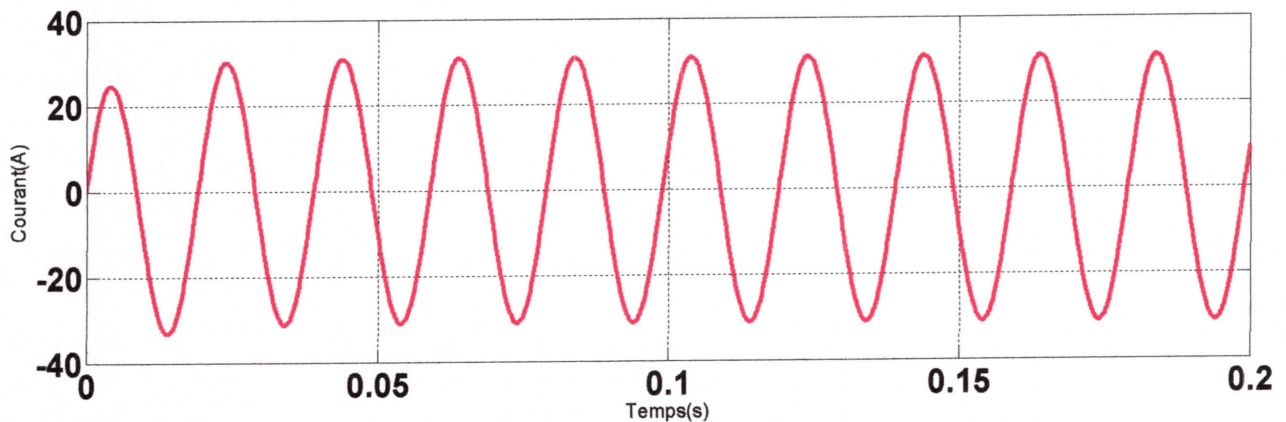


Figure III.5. Variations du courant pour une charge RC série.

Les résultats des pôles et résidus dans ce cas sont (Tableau III.4) :

Valeurs numériques	
Pôles $S_i$	Résidus $R_i$
$2.44249 \cdot 10^{-10} + 314.15926j$	$4.70055 - 14.76722j$
$2.44249 \cdot 10^{-10} - 314.15926j$	$4.70055 + 14.76722j$
$-100.00000 + 0j$	$-9.40111 - 4.12950 \cdot 10^{-14}j$

a. Nos résultats.

Valeurs théoriques	
$s_i$	$\mathcal{R}_i$
$0 + 314,16j$	$4,7 - 14,77j$
$0 - 314,16j$	$4,7 + 14,77j$
$-100 + 0j$	$-9,40 + 0j$

b. Résultats publiés [11].

Tableau III.4. Pôles et résidus pour une charge RC série

Nous remarquons que la bonne concordance de nos résultats de calculs avec ceux publiés et aussi avec les prévisions théoriques est toujours présente.

Ainsi une charge RC série est caractérisée par trois couples pôle-résidu, deux pôles liés au régime forcé de valeurs  $\pm j\omega$  associés à des résidus complexes conjugués de valeurs  $\pm \frac{E\sqrt{2}}{2jR} \cos(\varphi) e^{\pm j\varphi}$  et un pôle réel négatif traduisant le régime libre et associé à un résidu réel négatif de valeur  $-\frac{1}{R}(v_{C0} - E\sqrt{2} \sin(\varphi) \cos(\omega t_0 - \varphi))$ .

### I.3.5. Charge RLC série

Les valeurs numériques de la charge seront données par les valeurs :  
 $R = 1\Omega$ ,  $L = 20\text{mH}$  et  $C = 60\text{mF}$ .

Le courant en fonction du temps débité à charge est illustré en figure III.6.

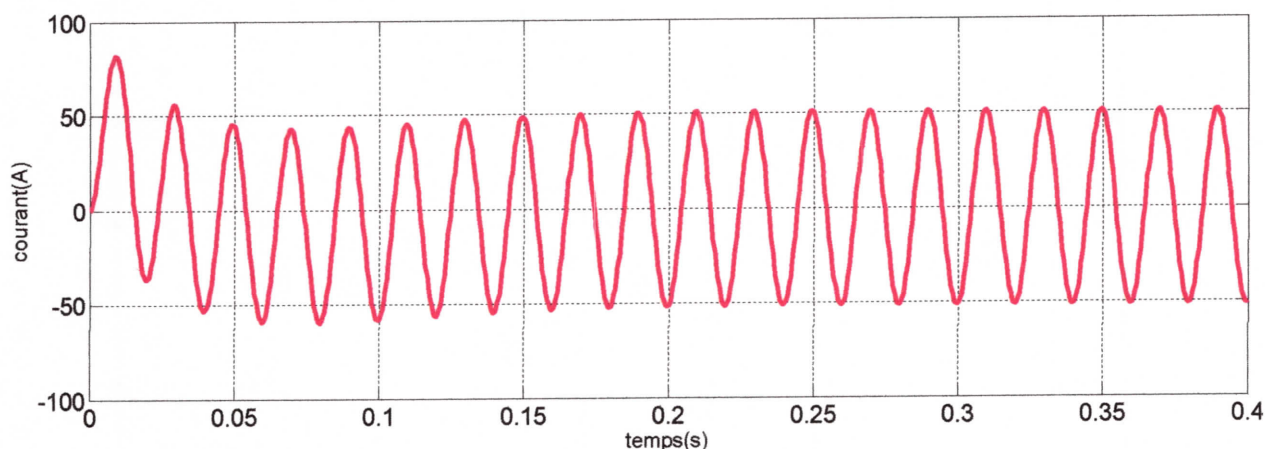


Figure III.6. Courant pour une charge RLC.

La décomposition du courant en des pôles et des résidus par la méthode de matrix pencil donne les résultats regroupés dans le tableau III.5

Valeurs numériques	
Pôles $S_i$	Résidus $R_i$
$7.11737 \cdot 10^{-8} + 314.15926j$	$-25.44885 - 4.08480j$
$7.11737 \cdot 10^{-8} - 314.15926j$	$-25.44885 + 4.08480j$
$-25.00000 + 14.43374j$	$25.44885 + 44.82915j$
$-25.00000 - 14.43374j$	$25.44885 - 44.82915j$

a. Nos résultats.

Valeurs théoriques	
$s_i$	$\mathcal{R}_i$
$0 + 314,16j$	$-25,45 - 4,08j$
$0 - 314,16j$	$-25,45 + 4,08j$
$-25 - 14,43j$	$25,45 - 44,83j$
$-25 + 14,43j$	$25,45 + 44,83j$

b. Résultats publiés [11].

Tableau.III.5. Pôles et résidus dans le cas d'une charge RLC série.

Comme dans les cas précédents, il apparaît dans cette application les deux pôles imaginaires purs conjugués  $+j\omega$  et  $-j\omega$  liés au régime forcé et associés à deux valeurs de résidus complexes conjuguées. S'y ajoutent deux pôles supplémentaires complexes conjugués qui traduisent le régime libre, associés à deux valeurs de résidu également complexes conjuguées.

## II. Mise en parallèle des charges élémentaires

Nous proposons dans cette application d'étudier la mise en parallèle des charges élémentaires similaires et différente. Cette application trouve son intérêt dans la pratique puisque une charge domestique se représente par quelques charges du premier et/ou du deuxième ordre [15].

### II.1. Enclenchements simultanés de charges de même type

Nous commençons cette application par l'étude de l'enclenchement de charges simultanées de deux charges du premier ordre (RC série).

Les deux charges seront caractérisées par les deux constantes de temps  $\tau_1 = R_1C_1 = 10 \times 10^{-3} = 10\text{ms}$  et  $\tau_2 = R_2C_2 = 10 \times 5 \cdot 10^{-3} = 50\text{ms}$ .

La décomposition du courant en les pôles et les résidus est donnée dans le tableau III.6.

Valeurs Numériques	
Pôles $S_i$	Résidus $R_i$
$5.94637 \cdot 10^{-6} + 314.15927j$	$5.73172 - 30.96501j$
$5.94637 \cdot 10^{-6} - 314.15927j$	$5.73172 + 30.96501j$
$-100.00012 + 0j$	$-9.46913 - 1.49240 \cdot 10^{-10}j$
$-19.99986 + 0j$	$-2.062323 + 5.70872 \cdot 10^{-14}j$

Tableau III.6. Pôles et résidus dans le cas de deux charges RC série.

Pour reconnaître la nature RC série ou RL série des charges, on calcule, à partir des résidus liés au régime forcé, la valeur de  $\varphi$ . Celle-ci est liée à l'argument du résidu  $R_1$  par :  $\varphi = -\pi/2 - \arg(R_1)$ .

Le signe de  $\varphi$  permet de définir si la charge est plutôt inductive ou plutôt capacitive.

Dans le cas d'une charge RL série,  $\varphi$  est positif.

Dans le cas d'une charge RC série,  $\varphi$  est négatif.

Dans ce cas  $\varphi = -\pi/2 - \arg(5.73172 - 30.96501j) = -\pi/2 - (-1.38778) = -0.18$  rd.

D'où les deux charges sont de type RC avec respectivement des constantes de temps de :  $1/100 = 10\text{ms}$  et  $1/20 = 50\text{ms}$ .

## II.2. Enclenchements simultanés de charges de types différents

Nous examinons dans cette application l'étude de la mise en parallèle de deux charges différentes, on considère une charge RC série en parallèle avec une charge RLC série.

Les charges sont enclenchées à l'instant  $t = t_0 = 0$ . Les conditions initiales sont données par  $v_{c1}(t = t_0) = v_{10}$ ,  $i_{L2}(t = t_0) = i_{20}$ ,  $v_{c2}(t = t_0) = v_{20}$ . Les deux charges seront définis par les valeurs :

$R_1 = 10 \Omega$ ,  $C_1 = 50 \text{ mF}$  et  $R_2 = 1 \Omega$ ,  $C_2 = 30 \text{ mF}$ ,  $L_2 = 1 \text{ mH}$ .

La décomposition de courant en des pôles et des résidus donne les résultats en tableau III.7.

Valeurs numériques	
Pôles $S_i$	Résidus $R_i$
$-965.47461 + 0j$	$102.80595 + 7.40539 \cdot 10^{-14}j$
$-2.16763 \cdot 10^{-6} + 314.15926j$	$-32.32962 - 172.14946j$
$-2.16763 \cdot 10^{-6} - 314.15926j$	$-32.32962 + 172.14946j$
$-34.52530 + 0j$	$-37.93945 - 3.02279 \cdot 10^{-15}j$
$-3.2870 \cdot 10^{+5} + 0j$	$-1.81750 \cdot 10^{-4} + 1.058950 \cdot 10^{-11}j$

Tableau III.7. Pôles et résidus pour une charge RC série en parallèle avec une charge RLC série

Pour le régime forcé, les pôles sont invariants tandis que les résidus se rajoutent algébriquement. Pour le régime libre, les pôles et les résidus se regroupent.

### **Conclusion**

Ce troisième chapitre consacré aux applications nous a permis de mener une validation des concepts théoriques que nous avons détaillé durant le deuxième chapitre. En effet, la comparaison de nos résultats de calcul avec ceux publiés a montré une très bonne concordance.

Notre investigation des différents types de charges nous a bien renseignés sur la représentativité des charges par les pôles et des résidus. En outre, la mise en parallèle des charges du premier et du deuxième ordre nous a offert une nouvelle opportunité pour l'étude des charges domestique réelle où leurs représentations sont basées sur la mise en parallèle de quelques charges élémentaires.



# Conclusion générale

## *Conclusion générale*

Le développement grandissant des réseaux électriques intelligents (Smart Grids) incite les gestionnaires du réseau électrique de s'adapter avec les exigences imposés afin d'assurer une gestion optimal et intelligente du réseau électrique. Le but principal de notre mémoire qui se résume en l'identification d'une charge électrique dans un réseau électrique domestique constitue une partie prenante de ces exigences multiples.

Nous avons montré durant ce travail de fin d'études comment on peut identifier une charge domestique afin de déterminer la consommation par usages est effectué à partir des signaux transitoires et permanents en basse fréquence issus directement de l'entrée de l'installation.

La méthode d'identification utilisée pour construire la signature de tout appareil électrique est la méthode de Matrix Pencil qui traduit la signature transitoire et permanente de cet appareil en un nombre très limité de pôles et de résidus.

Nous avons appliqué cette méthode sur le courant instantané issu de la simulation avec Simulink à l'entrée de différents circuits canoniques : R, RL, RC et RLC, etc.

Afin que nous pouvons réaliser notre travail, nous avons opté à la subdivision de notre mémoire en trois parties principales. Après une introduction générale, dans le premier chapitre nous avons commencé par des généralités sur les réseaux intelligents (SMART GRID) en suite nous avons proposé une historique sur les smart grids, leurs objectifs et fondement, avantages et inconvénients, ainsi que leurs fonctionnements et modèles.

Le deuxième chapitre a été consacré à l'exposé théorique du modèle de calcul que nous avons utilisé, dont le but est l'analyse d'une charge électrique dans un réseau électrique domestique par la méthode de Matrix pencil, nous avons testé cette analyse sur le signal de courant délivré aux charge auparavant mentionné.

Ce travail nous a permet d'identifier des charges électriques élémentaires par leurs pôles et résidus en utilisant la méthode de Matrix pencil. Et donc nous pouvons

identifier une charge électrique domestique qui est en pratique représentée par une mise en série et parallèle de charges élémentaires.

Les différentes applications que nous avons proposées ont montré une très bonne concordance de nos résultats de calculs avec ceux publiés. L'analyse des résultats obtenus et les interprétations que nous avons constatées nous permettent de confirmer l'intérêt de l'outil mathématique utilisé « Matrix pencil » qui a un apport certain pour le développement des Smarts Grids.

# Bibliographie

## Références Bibliographiques

- [1] Enabling Tomorrow's Electricity System: Report of the Ontario smart Grid Forum.  
[http://www.ieso.ca/imoweb/pubs/smart\\_grid/Smart\\_Grid\\_Forum\\_Report.pdf](http://www.ieso.ca/imoweb/pubs/smart_grid/Smart_Grid_Forum_Report.pdf), traduction libre.
  
- [2] Miles Keogh, The Smart Grid: Frequently Asked Questions for State Commissions, The National Association of Regulatory Utility Commissioners, mai 2009, p. 2, traduction libre.
  
- [3] The Smart Grid: An Introduction. U.S. Department of Energy:  
[http://www.oe.energy.gov/DocumentsandMedia/DOE\\_SG\\_Book\\_Single](http://www.oe.energy.gov/DocumentsandMedia/DOE_SG_Book_Single)
  
- [4] Source: ABB, Deutsche Telekom, 2010.  
[www.abb.com](http://www.abb.com), consulté en janvier 2012
  
- [5] Gimélec : Groupement des industries de l'équipement électrique, du contrôle-commande et des services associés - [www.gimelec.fr](http://www.gimelec.fr)
  
- [6] Smart Grids: une vision d'avenir avec de nombreux points d'interrogation, Nouvelles de l'énergie 3/2011, Forum suisse de l'énergie, Berne, 2011

- [7] C. Cometta, F. Hannich, M. Rauh, <<Smart meters: un thème pour les EAE suisses >> Bulletin SEV/ AES 12s/2010, Fehraltorf/ Aarau, 2010
- [8] Source : <http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/reseau-intelligent-smart-grid>
- [9] Guillaume Gu´erard « Optimisation de la diffusion de l´energie dans les smart-grids. Modélisation et simulation ». Université de Versailles-Saint Quentin en Yvelines, 2014. Français. <NNT : 2014VERS0049>.
- [10] Source: <http://oesterreichsenergie.at>
- [11] Hala Najmeddine, «Méthode d´identification et de classification de la consommation d´energiepar usages en vue de l´intégration dans un compteur d´energie électrique ». thèse de doctorat, Electromagnétisme. Université Blaise Pascal –Clermont-Ferrand II, 2009. France
- [12] Y. HUA, and T. K. SARKAR, « Matrix Pencil Method for Estimating Parameters of Exponentially Damped/Undamped Sinusoids in Noise » IEEE Transactions on Acoustics, Speech, & Signal Processing, Vol. 38, No. 5, pp. 814-824, May 1990.

- [13] T. K. SARKAR, F. HU, Y. HUA, and M. WICKS « A Real Time Signal Processing Technique for Approximating a Function by a Sum of Complex Exponentials Utilizing the Matrix-Pencil Approach- Signal Processing » A Review Journal, (Invited Paper), Vol. 4, No. 2, pp. 127-140, April 1994.
- [14] SIMULINK, outil de simulation sous Matlab, [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)
- [15] Djamel Guezgouz, « Contribution `a la modélisation du réseau électrique domestique en vue de la caractérisation du canal de propagation CPL ». Thèse de doctorat, Electric power. Université François Rabelai- Tours, 2010. France.