



Analyse et prévision des perturbations conduites basses fréquences dans les réseaux de distribution à faible puissance de court-circuit

Patrick Guérin

► To cite this version:

Patrick Guérin. Analyse et prévision des perturbations conduites basses fréquences dans les réseaux de distribution à faible puissance de court-circuit. Energie électrique. Université de Nantes, 2007. <tel-05507603>

HAL Id: tel-05507603

<https://theses.hal.science/tel-05507603v1>

Submitted on 12 Feb 2026

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0 - Attribution - Non-commercial use - No Derivative Works - International License

UNIVERSITE DE NANTES

ECOLE DOCTORALE

SCIENCES ET TECHNOLOGIES

DE L'INFORMATION ET DES MATERIAUX

Année 2007

Habilitation à Diriger des Recherches

Patrick GUERIN

Docteur de l'Université de Nantes

Ingénieur ENSEM

ANALYSE ET PREVISION DES PERTURBATIONS CONDUITES BASSES FREQUENCES DANS LES RESEAUX DE DISTRIBUTION A FAIBLE PUISSANCE DE COURT-CIRCUIT

soutenue le 4 Juillet 2007 à Saint Nazaire devant le jury composé de :

président	:	M. Bernard MULTON	Professeur à l'ENS – SATIE, Bruz
rapporteurs	:	M. Seddik BACHA	Professeur à l' Université J. Fourier - LEG, Grenoble
		M. Bernard DAVAT	Professeur à l'ENSEM – GREEN, Nancy
		M. Benoît ROBYNS	Professeur à l'Ecole HEI – L2EP, Lille
examineurs	:	M. Luc LORON	Professeur à l'EPUN – IREENA, St Nazaire
		M. Serge TOUTAIN	Professeur à l'EPUN – IREENA, Nantes
invités	:	M. René LE DOEUFF	Professeur à l'EPUN – IREENA, St Nazaire
		M. Jean Yves JAOUEN	Directeur Industriel – AKER YARDS, St Nazaire

Laboratoire : IREENA – 37 bd de l'Université – BP 406 – 44602 Saint-Nazaire cedex

AVANT PROPOS

Ce mémoire constitue une synthèse de mes activités de recherche qui ont débuté en 1993 avec ma thèse de Doctorat. Ces travaux se sont déroulés au sein du Pôle Atlantique de Génie Electrique (GE44 - UPRES EA 1770) puis à l'Institut de Recherche en Electrotechnique et Electronique de Nantes Atlantique (IREENA - EA 1770) nouvellement créé par le rapprochement de 4 laboratoires de la région Nantes - St Nazaire.

Ces recherches sont le fruit d'un travail personnel et collectif. Sans la participation de nombreux chercheurs, étudiants en stage de Master ou de D.E.A, elles n'auraient pu connaître un tel développement et justifier cette synthèse. Je souhaite témoigner ici toute ma gratitude à ces chercheurs confirmés ou en formation, pour leur contribution directe ou indirecte.

Je ne saurais commencer ce mémoire sans adresser mes plus sincères remerciements à chacun des membres du jury qui ont bien voulu me consacrer de leur temps et m'apporter leur contribution par des conseils constructifs.

Je souhaite ainsi exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur B. Multon, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure - antenne de Bretagne, pour l'intérêt manifeste qu'il a su porter à ces recherches et pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury de soutenance.

Mes très sincères remerciements vont également à Messieurs S. Bacha, Professeur à l'Université J. Fourier de Grenoble, B. Davat, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure d'Electricité et de Mécanique de Nancy et B. Robyns, Professeur à l'Ecole des Hautes Etudes d'Ingénieur de Lille, pour le temps et l'énergie qu'ils ont consacré à ce travail, en qualité de rapporteur, ainsi que pour leur soutien scientifique.

J'adresse également tous mes remerciements à Messieurs L. Loron et S. Toutain, Professeurs à l'Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, pour l'intérêt qu'ils ont témoigné à l'égard de mes travaux.

Je tiens également à remercier Monsieur R. Le Doeuff, Professeur Emérite en retraite, pour la confiance qu'il a su m'accorder, en me confiant dès le début la conduite de ces recherches.

Je n'oublie pas Monsieur J.Y. Jaouen, Directeur Industriel à Aker Yards, que je souhaite remercier pour le soutien qu'il a apporté à l'origine de ces travaux et pour l'intérêt qu'il continue de leur manifester.

L'environnement dans lequel s'effectue nos activités de recherche est important et c'est pourquoi je souhaite adresser mes plus sincères remerciements à chacun de mes collègues (chercheurs, enseignants, doctorants, administratifs et techniques) qui m'ont exprimé leurs encouragements et leur soutien.

Enfin, je souhaite exprimer toute ma reconnaissance à Laurence pour sa fidèle collaboration dans la conduite de ces travaux et sa présence permanente dans les joies et les déceptions induites par ces recherches.

SOMMAIRE

1	INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1.1	CONTEXTE	1
1.2	PERTURBATION ET RÉSEAU ÉLECTRIQUE : UN COUPLE CENTENAIRE	1
1.2.1	<i>Les premiers usages de l'électricité.....</i>	<i>1</i>
1.2.2	<i>Les courants alternatifs et les réseaux</i>	<i>2</i>
1.2.3	<i>Perturbations Electriques et Harmoniques.....</i>	<i>3</i>
1.2.4	<i>Apparition des circuits électroniques.....</i>	<i>9</i>
1.2.5	<i>Commentaire général.....</i>	<i>9</i>
1.3	HISTORIQUE DES TRAVAUX DE RECHERCHE.....	10
1.3.1	<i>Origine</i>	<i>10</i>
1.3.2	<i>Modèles harmoniques de charges et outils de simulation.....</i>	<i>12</i>
1.3.3	<i>Méthodes prévisionnelles</i>	<i>14</i>
1.4	L'ÉTUDE DES RÉSEAUX ET DE LEUR QUALITÉ EN FRANCE	15
1.5	LA QUALITÉ DE L'ÉNERGIE DANS LE MONDE	18
1.6	CONCLUSION	19
2	LES HARMONIQUES.....	21
2.1	OBSERVATION	21
2.2	IDENTIFICATION	22
2.3	MODÉLISATION	23
2.3.1	<i>Charge non linéaire</i>	<i>23</i>
2.3.2	<i>Réseau</i>	<i>24</i>
2.4	REPRODUCTION	25
2.4.1	<i>Simulation des charges non linéaires.....</i>	<i>26</i>
2.4.2	<i>Réseau</i>	<i>28</i>
2.5	PRÉVISION	29
2.6	CONCLUSION	32

3	LES INTERHARMONIQUES	34
3.1	OBSERVATION	34
3.2	IDENTIFICATION	35
3.3	MODÉLISATION	36
3.4	REPRODUCTION	37
3.4.1	<i>Charge non linéaire</i>	37
3.4.2	<i>Réseau</i>	42
3.5	PRÉVISION	43
3.6	CONCLUSION	47
4	COMPORTEMENT ALÉATOIRE	49
4.1	OBSERVATION	49
4.2	IDENTIFICATION	50
4.3	MODÉLISATION	54
4.3.1	<i>Représentation d'une charge non linéaire</i>	54
4.3.2	<i>Réseau</i>	56
4.4	REPRODUCTION	56
4.4.1	<i>Détermination des lois de probabilité relatives aux charges non linéaires</i>	57
4.4.2	<i>Réseau</i>	59
4.5	PRÉVISION	62
4.5.1	<i>Hypermarché</i>	63
4.5.2	<i>Système de propulsion d'un navire de croisière</i>	66
4.6	CONCLUSION	68
5	CARACTÉRISATION DE L'ÉVOLUTION TEMPORELLE	70
5.1	OBSERVATION	70
5.2	IDENTIFICATION	71
5.3	MODÉLISATION	72
5.3.1	<i>Série temporelle</i>	73
5.3.2	<i>Décomposition fréquentielle</i>	76
5.4	REPRODUCTION	77
5.5	PRÉVISION	78
5.6	CONCLUSION	80

6	CARACTÉRISATION EN AMPLITUDE ET EN DURÉE	81
6.1	INTRODUCTION	81
6.2	OBSERVATION	81
6.3	IDENTIFICATION	82
6.3.1	Détermination des durées.....	82
6.3.2	Histogramme des occurrences	83
6.3.3	Lois marginales	85
6.3.4	Lois conditionnelles	86
6.4	MODÉLISATION	87
6.5	REPRODUCTION	88
6.6	PRÉVISION	89
6.7	CONCLUSION	91
7	QUALITÉ ET FIABILITÉ DES RÉSEAUX ELECTRIQUES	93
7.1	INTRODUCTION	93
7.2	MODÉLISATION FRÉQUENTIELLE DES CONSTITUANTS D'UN RÉSEAU	95
7.3	ANALYSE DES PERTURBATIONS D'UN ENSEMBLE CONVERTISSEUR-MACHINE	97
7.4	ANALYSE DES PERTURBATIONS DU RÉSEAU D'UN NAVIRE TOUT ÉLECTRIQUE	99
7.5	PLATE-FORME 'RÉSEAU'	102
7.5.1	Contexte	102
7.5.2	Description de la plate-forme réseau	103
7.5.3	Implantation dans les locaux du CRTT	105
7.5.4	Plate-forme et perspectives de recherche.....	106
7.5.5	Autres axes de recherche et collaborations.....	107
7.6	CONCLUSION	108
8	EXTENSION DE L'APPROCHE STOCHASTIQUE	109
8.1	INTRODUCTION	109
8.2	MODÈLE DE COMPORTEMENT	110
8.3	MODÈLE DE CONNAISSANCE	112
8.4	APPLICATION À LA CONCEPTION DES RÉSEAUX EMBARQUÉS	115
8.5	APPLICATION À LA PRODUCTION D'ÉNERGIE LOCALISÉE	116
8.6	CONCLUSION	120
9	CONCLUSION GÉNÉRALE.....	121
	BIBLIOGRAPHIE.....	125

Introduction

Introduction Générale

1 INTRODUCTION GENERALE

1.1 Contexte

En débutant la rédaction de cette synthèse des activités scientifiques en vue de l'Habilitation à Diriger des Recherches, je pensais que les phénomènes perturbateurs des réseaux d'énergie électrique étaient apparus avec leur accroissement en taille et en puissance transportée. En particulier, j'adoptais le point de vue couramment admis que les perturbations harmoniques soient devenues une préoccupation pour les chercheurs et les industriels lors de la diffusion des convertisseurs statiques à base de semi-conducteurs de puissance.

Par curiosité, je me suis intéressé à l'histoire de l'énergie électrique et notamment la création des réseaux de transport en France. Quelle ne fut pas ma surprise de constater que d'illustres électriciens analysaient et débattaient déjà des problèmes d'harmoniques alors que les réseaux de distribution n'étaient formés que de quelques kilomètres de câbles ou de lignes autour d'une ou deux génératrices. Il fallait se rendre à l'évidence que dès leur origine, les réseaux électriques avaient été soumis à des perturbations qui par ailleurs avaient certainement freiné leur extension.

En conséquence, il m'est apparu utile de rappeler quelques difficultés techniques rencontrées lors du développement des réseaux et notamment celles liées à leur qualité. Concernant les travaux de recherche auxquels j'ai contribué, soit directement, soit partiellement au travers de l'encadrement de stages ou de thèses de doctorat, une chronologie est proposée dans cette introduction générale, en précisant le contexte dans lesquels ils se sont déroulés. Après ce positionnement temporel, une situation sur un plan géographique sera proposée par une rapide synthèse des recherches nationales et internationales sur le sujet.

1.2 Perturbation et réseau électrique : un couple centenaire

1.2.1 Les premiers usages de l'électricité

La notion de fluide électrique est connue depuis les expériences de Benjamin Franklin (1706-1790). Par contre, il a fallu attendre de nombreuses décennies pour que son usage sorte des laboratoires ou des exhibitions scientifiques. Le télégraphe mis à part, l'un des premiers exemples cités concerne l'éclairage du phare du Cap de la Hève en 1863. L'emploi de

l'électricité se développera surtout après les années 1880. Cet essor n'a pu avoir lieu que par la mise au point de matériels dans trois domaines simultanément [Histoire_97] :

- la production, grâce à la machine de Gramme proposée en 1871/1874,
- le transport, par la connaissance acquise dans le télégraphe électrique arrivant à maturité dans les années 1870,
- la consommation, avec les bougies Jablochkoff en 1876 qui éliminent les régulateurs des anciennes lampes à arc.

Ainsi, au début des années 1880, des installations électriques commencent à voir le jour et à se multiplier. Pour l'année 1881, il est cité en France plusieurs exemples [Histoire_97] :

- l'éclairage du port du Havre par 32 bougies Jablochkoff en complément des lampes à gaz,
- la création d'usines électriques pour l'éclairage de bâtiments ou lieux publics (hall de gare, hôtel de ville de Paris, théâtres, parc Monceau),
- l'exposition internationale d'électricité de Paris.

A cette occasion, en plus de l'éclairage, l'énergie électrique était fournie à plusieurs machines-outils raccordées en dérivation. L'ensemble formait ainsi une première tentative de réseau de distribution à courant continu composé de charges diverses.

Profitant certainement de cette exposition d'électricité, Marcel Deprez [Deprez_81] pose alors les relations de base du transport de l'énergie calorifique et mécanique, dans le cas de deux machines reliées par un circuit électrique. La notion de puissance maximale transmissible apparaît déjà. Il propose également des outils graphiques pour déterminer les points de fonctionnement stables et optimaux des machines. Ce travail théorique montre l'intérêt de disposer de tensions élevées pour optimiser le transport de l'énergie électrique.

Les années suivantes vont voir se développer les installations à courant continu, que ce soit pour l'éclairage, la force motrice ou bien l'électrochimie naissante. En 1888, avec la concession de quatre secteurs de Paris à des entreprises, la distribution électrique prend de l'ampleur, même si cela reste encore peu structuré.

1.2.2 Les courants alternatifs et les réseaux

La décennie 1880-1890 voit l'émergence d'une nouvelle technologie autour des courants alternatifs. En 1883, M. Deprez indique lors d'une discussion théorique que deux machines à courant alternatif décalées de 90° pourraient produire un champ tournant. C. Gaulard propose en 1884 le premier transformateur à courant alternatif. Suite à ces travaux sur le transformateur, Galiléo Ferraris présente en 1888, un moteur utilisant directement les

courants alternatifs, fortement semblable à la machine asynchrone de Tesla en 1889. La même année, ce dernier développe également l'alternateur triphasé.

Au début des années 1890, tous les éléments de la chaîne électrique en alternatif sont disponibles. L'emploi des transformateurs autorise l'accès à des valeurs de tensions bien supérieures à celles que peuvent fournir les génératrices continues. Des installations de transport en haute tension et sur de longues distances voient le jour. Au Havre en 1890, une usine de deux alternateurs de 225kW monophasés à 70 périodes fournit l'énergie à un réseau de 10km. L'exposition d'électricité de Francfort en 1891 est alimentée par l'usine de Lauffen via une ligne triphasée 8000V de 177km. En 1893 dans les alpes, l'usine hydroélectrique de Lancey alimente les communes environnantes. L'extension de ce réseau en 1897 portera sa longueur à 75km pour une tension de service de 10kV. Dans Paris et sa banlieue, les installations en courant alternatif viennent compléter celles à courant continu pour satisfaire la demande des consommateurs. Le 3000V alternatif à 40 périodes est choisi pour approvisionner les deux nouvelles concessions de Levallois Perret (1892) et d'Issy les Moulineaux (1896).

La dernière décennie du 19^{ème} siècle est une période de développement des réseaux de transport et de distribution avec une prédominance de plus en plus marquée pour les courants alternatifs. La possibilité d'élever et d'abaisser la tension alternative par des transformateurs donne à cette technologie un avantage décisif.

1.2.3 Perturbations Electriques et Harmoniques

Ce n'est donc pas un hasard si des problèmes liés à des 'perturbations électriques' sont cités dans la littérature dès cette période, relatant les premières études s'intéressant à ces nouveaux phénomènes. Dès l'année 1900, des solutions sont envisagées afin de rendre la tension délivrée par les alternateurs la plus sinusoïdale possible. M. Pérot suggère d'utiliser des machines synchrones à self induction, dans le but de réduire les harmoniques des f.é.m. des alternateurs. Antérieurement à cette tentative, G. Claude aurait cherché à rendre plus sinusoïdale la tension délivrée par les alternateurs de l'usine des Halles à Paris [Claude_00]. Pour ce faire, il aurait utilisé des circuits résonnants séries raccordés aux bornes des alternateurs. Malheureusement, les isolants des condensateurs de l'époque ne devaient pas encore supporter de telles surtensions et ces contraintes entraînaient une rupture de ceux-ci. Si les réalisations pratiques se heurtent à des difficultés techniques, la notion de filtre harmonique résonnant, son dimensionnement et les calculs d'atténuation sont alors bien établis à cette période [Claude_00][Picou_04].

En 1903, M. Field [Field_03] présente les résultats de ses expériences sur la station centrale de Glasgow. Les relevés sont effectués à l'aide d'un oscillographe dérivé du modèle Blondel et montre la forme d'onde des f.é.m. des alternateurs pour différentes configurations de charge. Il met en évidence l'existence d'harmoniques 11 et 13 et démontre leur lien avec le nombre de dents des alternateurs (figure 1). Une décomposition en série de Fourier des formes d'ondes indique également la présence d'un harmonique de rang 5. Il suggère que celui-ci provienne de la répartition du cuivre dans l'induit. Dans le même exposé, M Field précise les conditions d'existence des harmoniques multiples de 3 selon le type de couplage des f.é.m. Une modélisation sommaire de l'alternateur et plus détaillée d'un câble lui permet d'expliquer les phénomènes possibles de résonance en fonction des caractéristiques du circuit. Des essais avec plusieurs longueurs de câble valident ses travaux (figure 2).

Dans une seconde partie, M. Field expose des phénomènes oscillatoires et transitoires lors de la mise en charge ou décharge de circuits inductifs ou capacitifs. Il conclut sur les combinaisons critiques de valeurs d'inductances et de capacités à éviter, mais juge que les

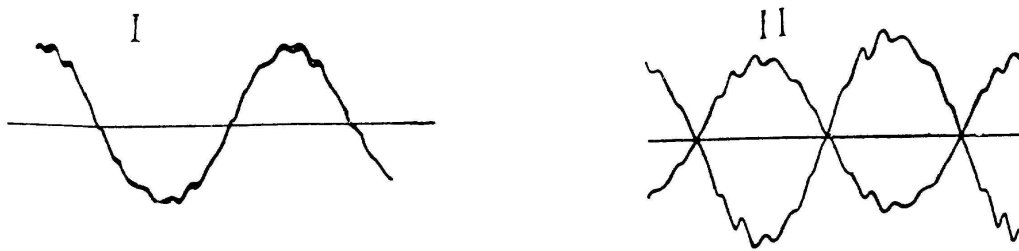


figure 1 : I) onde de force électromotrice d'un alternateur débitant 245A ; II) onde de force électromotrice et d'intensité d'un transformateur débitant sur résistance liquide

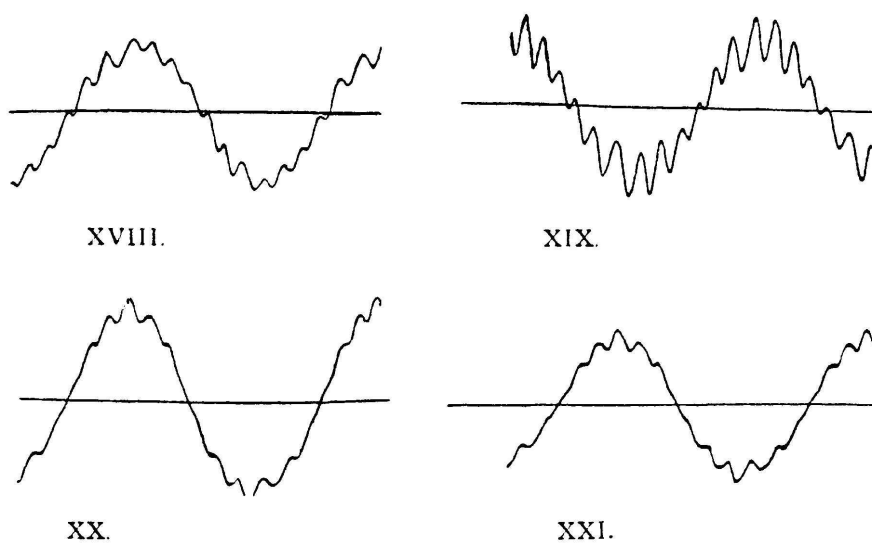


figure 2 : onde de force électromotrice sans charge, avec XVIII : 65 km de câbles reliés ; XIX : 47,3 km de câbles reliés ; XX : 8,5 km de câbles reliés ; XXI : 2 km de câbles reliés

effets de résonance liés aux harmoniques ne sont pas dangereux. Cet avis ne semble pourtant pas partagé par Ms. Blackley et Dudell [Field_03]. Ce dernier ayant également réalisé des relevés sur quatre installations a constaté :

- une fatigue des isolants des câbles,
- une diminution du rendement des machines,
- une altération de la régulation des moteurs.

Il note que les voltmètres des stations centrales mesurent la valeur efficace de l'onde et donc que les valeurs crêtes peuvent échapper à la surveillance de l'ingénieur de service.

Dans ces constatations, nous retrouvons les principales conséquences, désormais attribuées de manière classique, aux perturbations harmoniques. La remarque sur l'indication des voltmètres est toujours d'actualité et renvoie aux précautions à prendre et aux choix des appareils lors des mesures sur des réseaux électriques où l'onde de tension ou de courant n'est pas sinusoïdale.

Une autre étude des oscillations électriques dans les réseaux alternatifs est présentée par Charles David en 1904 [David_05A]. L'usine du Plan du Var est prise comme site expérimental de mesure. Cette usine hydroélectrique de 600kVA alimente en 10kV - 25Hz, le réseau naissant du littoral méditerranéen (figure 3). La mise en évidence des harmoniques l'oscillographe de Blondel-Carpentier, suivie par une décomposition en série de Fourier effectuée graphiquement. La deuxième, basée sur les travaux de M. Armagnat [Armagnat_02], consiste à insérer un oscillographe en série dans le circuit, associé à des éléments inductifs et capacitifs afin d'obtenir une résonance (figure 4). La connaissance des

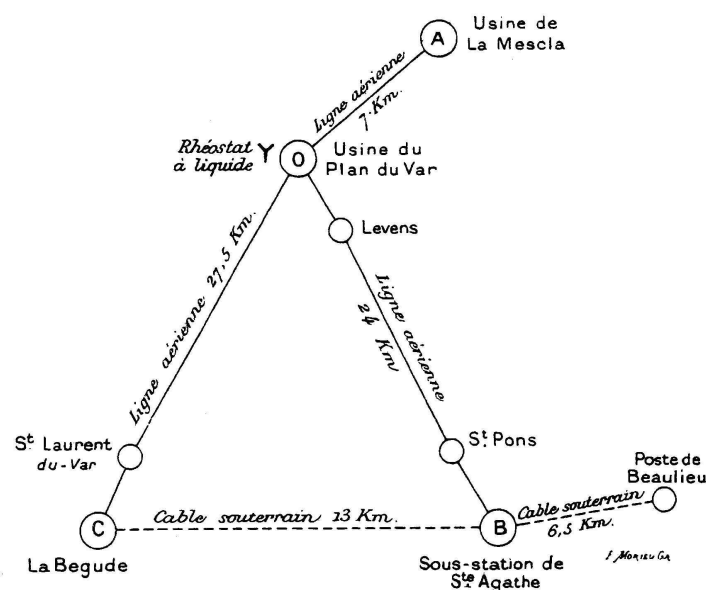


figure 3 : l'usine du Plan du Var et son réseau

éléments LC permet d'obtenir l'harmonique d'ordre n correspondant à la résonance et la résistance du circuit fournit son amplitude.

Ces méthodes ont permis de déterminer les harmoniques des f.é.m. des alternateurs et des tensions en bout de ligne (réseau bouclé) dans plusieurs configurations. De nombreux régimes transitoires lors de l'ouverture et de la fermeture des circuits complètent l'étude harmonique. Par exemple, M. David signale une variation régulière de 12 à 13 périodes sur l'intensité de l'alternateur lors du fonctionnement en parallèle de deux usines sur le même réseau (figure 5). Un phénomène de 'pompage' ou une perturbation sous-harmonique est donc déjà signalée même si les termes n'existent pas encore. Nous noterons que le fonctionnement en parallèle de plusieurs alternateurs fait encore l'objet de recherche à notre époque.

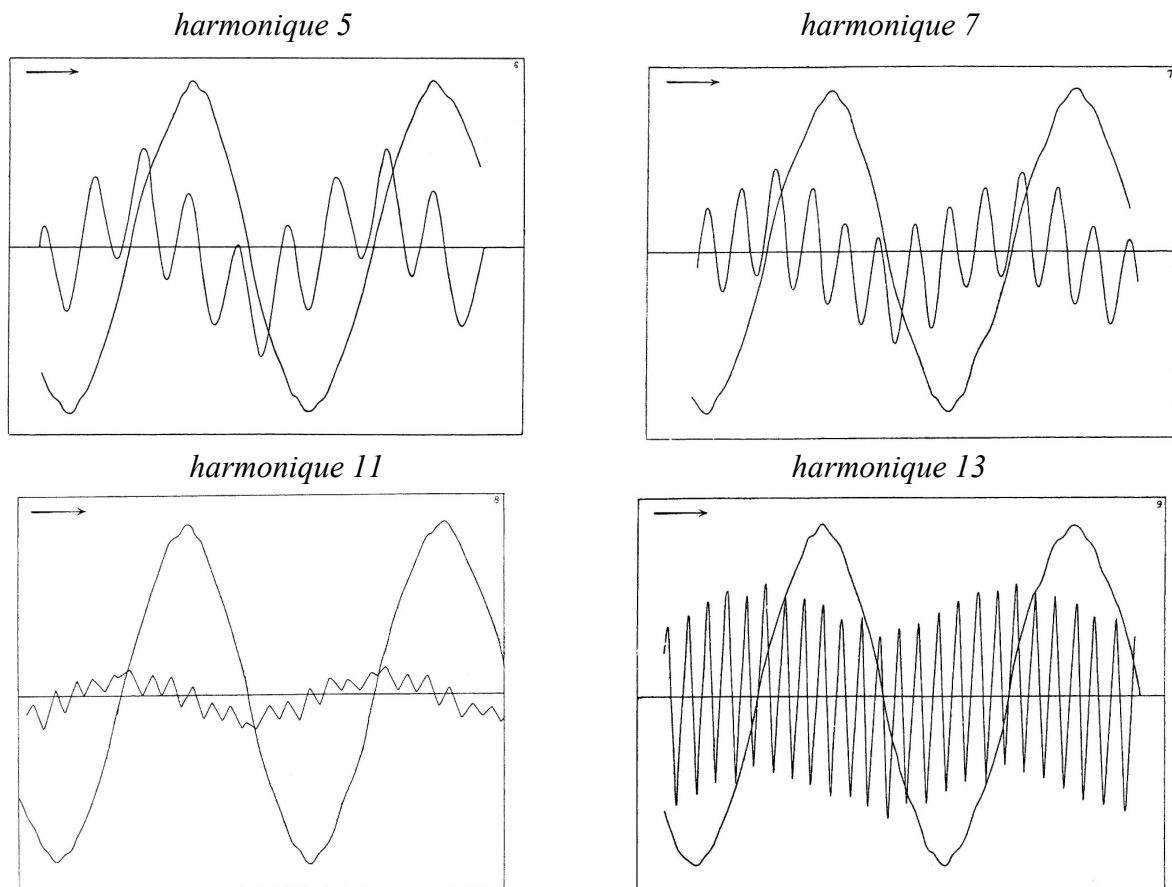


figure 4 : force électromotrice de l'alternateur à vide (7000V entre phase) et ses harmoniques

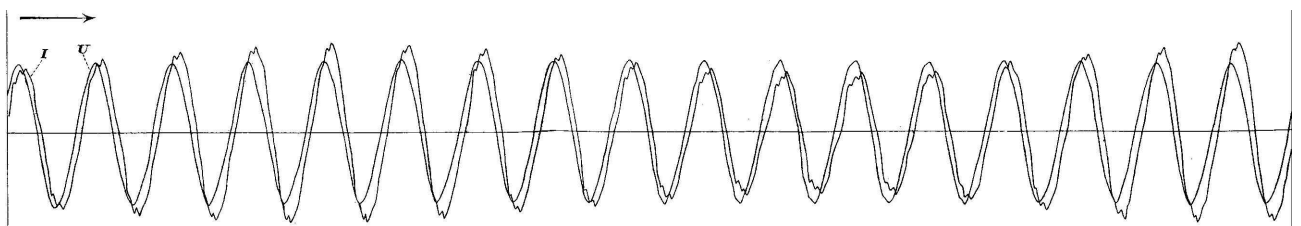


figure 5 : fonctionnement en parallèle de deux usines génératrices

L'auteur relève également le courant lors de l'enclenchement d'un transformateur à vide. Il s'étonne alors de la forme d'onde, des surintensités et de la durée du phénomène, s'étalant sur 32 périodes. Il formule des hypothèses pour tenter d'expliquer de tels phénomènes, notamment sur l'influence de l'état magnétique du noyau et de l'instant de fermeture du circuit par rapport à la forme de la tension. Les phénomènes apparaissant à l'enclenchement des transformateurs sont mieux connus à présent mais demeurent problématiques sur des réseaux à faible puissance de court circuit.

A cette époque, tout comme aujourd'hui, les mesures sur les réseaux hautes tensions s'effectuaient par l'intermédiaire de transformateurs de mesure. M. David présente en 1905 [David_05B] une étude détaillée sur l'influence de ces transformateurs de tension sur la forme d'onde. Il ne constate pas de déformation significative imputable à ces derniers. Ayant des préoccupations similaires et la bande passante de ces transformateurs n'étant pas (ou rarement) donnée par leur fabricant, des essais en laboratoire nous ont conduit aux mêmes conclusions, tout au moins dans le domaine des basses fréquences.

Les relevés à l'oscillographe de Charles David ont certainement été analysés de près par la communauté scientifique car l'année 1905 fut riche en discussions et publications s'y rapportant. Cette année-là se situe également dans une période de forte expansion des réseaux alternatifs et le besoin de solutions pour répondre aux perturbations et dysfonctionnements rencontrés, devait se faire ressentir de manière plus pressante.

A l'aide d'expressions mathématiques M. Brylinski [Brylinski_05] propose une explication théorique aux essais de M. David. Cependant, si les calculs de résonances dans les circuits sont bien maîtrisés [Picou_04], l'auteur se heurte au problème de la modélisation des éléments du réseau et particulièrement celle de l'alternateur. Ses calculs lui permettent néanmoins de déterminer les oscillations propres des circuits, les harmoniques résonnants, les tensions minimales et maximales sur la ligne en fonction de sa longueur. A l'aide d'exemples chiffrés, il montre que l'augmentation de capacités tendrait à 'étouffer' les harmoniques supérieurs. Cet avis est partagé par M. Picou [Brylinski_05] qui suggère même de chercher à augmenter cette capacité, naturellement présente dans les câbles, par l'introduction de condensateurs industriels.

Dans [Blondel_05A], l'auteur rappelle les difficultés inhérentes aux mesures sur un réseau en exploitation. Un siècle plus tard, les moyens de mesures ont considérablement évolué facilitant d'autant les recherches sur les perturbations électriques des réseaux. Cependant, les contraintes vis-à-vis de l'exploitation n'ont guère changé, voire se sont accentuées, limitant les possibilités d'investigation. Par la suite, M. Blondel commente plusieurs relevés de M. David.

En s'appuyant sur ses propres mesures, il confirme que l'amplification de certains harmoniques est provoquée par la capacité des câbles raccordés aux alternateurs.

Lors d'une seconde discussion [Blondel_05B], M. Blondel reprend la question de la modélisation des éléments, notamment les valeurs d'inductance des alternateurs à considérer dans les calculs. Il propose même diverses expériences pour caractériser les paramètres des alternateurs, des transformateurs et des lignes, monophasés ou triphasés. Il étudie aussi la circulation des harmoniques de rang 3 et leurs influences dans un réseau triphasé, pour conclure sur la nécessité d'obtenir les caractéristiques équivalentes des circuits vis-à-vis de ces harmoniques ; aujourd'hui nous parlerions d'impédance homopolaire. Dans ce contexte, M. Blondel suggère de relier les points neutres des machines à la terre afin de réduire les risques de déséquilibre des tensions, mais uniquement lorsque les harmoniques d'ordre 3 ou multiple de 3 ne sont pas assez importants pour produire un échauffement.

Dans cette même discussion [Blondel_05B], M. Boucherot signale l'existence d'essais en cours sur différents circuits, pour des fréquences allant de 50Hz à 900Hz. N'ayant pu retrouver d'articles relatant ces essais, je ne saurais dire si ceux-ci préfigurent de l'identification fréquentielle des machines et transformateurs proposée dans la suite de ce mémoire.

En 1906, M. Guéry expose de manière très détaillée [Guéry_06] les origines possibles des tensions harmoniques dans un alternateur, en les classant en deux grandes catégories :

- les harmoniques de 1^{ère} sorte dus à la répartition non sinusoïdale de l'induction périodique,
- les harmoniques de 2^{nde} sorte dus aux variations pulsatoires du flux.

Il signale que la forme du courant débité imposée par la charge (moteur, transformateur, bobine, lampe à arc) peut déformer l'allure de la tension. En règle générale, il suppose que ces modifications sont négligeables, bien qu'elles aient été observées avec des commutatrices, des redresseurs et des moteurs à collecteur. A notre époque, avec la prolifération de l'électronique de puissance, ces perturbations engendrées par des charges non linéaires sont devenues largement prépondérantes.

Dans la même communication [Guéry_06], les influences possibles des tensions harmoniques produites par un alternateur sont analysées :

- accroissement des pertes et augmentation des chutes de tension sur l'alternateur,
- risque de surtension selon les capacités en présence,
- absorption d'un courant par une ligne à vide, raccordée à un alternateur.
- défaut de lecture des appareils de mesure.

M. Guéry remarque que les harmoniques de premiers rangs sont les plus dangereux. Il laisse également entendre qu'une machine asynchrone se comporterait comme un transformateur en court-circuit vis-à-vis des harmoniques.

Pour réduire les tensions harmoniques dès la source, l'auteur propose différentes solutions en agissant directement sur la construction des alternateurs : forme des pôles, répartition des conducteurs de l'induit, inclinaison des encoches et des bords des pièces polaires.

1.2.4 Apparition des circuits électroniques

Les harmoniques feront parler d'eux [Read_45] avec l'apparition des tubes électroniques. Ces tubes vont permettre de contrôler le sens du courant et même l'instant d'établissement du courant dans un circuit. Les 'phanotrons', 'ignitrons' et autres thyatrones seront assemblés pour construire des redresseurs ou des variateurs de vitesse pour machines à courant continu [Cockrell_53]. Ces dispositifs absorbent alors un courant dont l'allure ne dépend plus directement de la forme de la tension d'alimentation. Une nouvelle catégorie de charges non linéaires vient ainsi d'être créée, produisant des courants non sinusoïdaux et donc source de courants harmoniques.

Les progrès de l'électronique au silicium permettront le développement des semi-conducteurs de puissance. La généralisation de leur usage dans les matériels du milieu industriel et tertiaire va accroître fortement la génération de courants harmoniques. Par l'intermédiaire des impédances du réseau, la circulation de ces courants engendre des tensions harmoniques résultantes. Parallèlement, les contraintes imposées par les distributeurs sur le facteur de puissance des installations vont favoriser la mise en place de batteries de condensateurs pour compenser l'énergie réactive. Après plusieurs décennies, nous retrouvons une situation analogue où capacités et harmoniques se côtoient dans les réseaux.

1.2.5 Commentaire général

Le début du 20^{ème} siècle a donc été marqué par des perturbations harmoniques principalement sur les tensions produites par les générateurs alternatifs et amplifiées par les câbles ou lignes constituant les réseaux. Nous pouvons raisonnablement penser que les solutions préconisées par M. Guéry ainsi que d'autres améliorations ont été adoptées depuis, afin de rendre les f.é.m. plus sinusoïdales. De nos jours, les alternateurs ne sont plus considérés comme des

sources importantes de tensions harmoniques, mais la question mériterait cependant d'être posée dans le cas de machines de faible puissance et à bas prix.

Les harmoniques de courant liés à des charges non linéaires sont également signalés sur ces premiers réseaux de distribution. Cependant, ils sont considérés comme négligeables en raison, soit du nombre relativement faible de ces charges, soit de l'amplitude peu importante de ces courants par rapport aux déformations rencontrées sur la tension.

Depuis les années 1970, le nombre de publications traitant des perturbations harmoniques a fortement augmenté. Leur lecture laisserait facilement entendre que ces phénomènes se découvriraient avec la diffusion croissante des convertisseurs de puissance. Ce bref rappel historique montre que les origines, les effets, les interactions et même certaines solutions étaient déjà parfaitement connues dès le début des années 1900. Il faut rendre hommage à ces électriciens qui ont su mettre en évidence et formaliser des phénomènes physiques non visibles, avec des moyens de calculs et d'essais expérimentaux nous apparaissant aujourd'hui comme bien rustiques. Nous noterons également que des questions comme la modélisation et l'identification des machines ou des circuits vis-à-vis des harmoniques, sont restées relativement ouvertes.

Il est curieux de constater que plus d'un siècle après la mise en évidence des premières perturbations harmoniques, leurs principales causes ont changé mais les perturbations engendrées et la qualité des réseaux qui en résulte restent une problématique de recherche d'actualité, dont l'avenir paraît même très prometteur.

1.3 Historique des travaux de recherche

1.3.1 Origine

Mes activités de recherches sur les 'perturbations des réseaux' ont débuté en janvier 1993, par une thèse de doctorat, au sein du Laboratoire Atlantique de Recherche en Génie Électrique (LARGE) créé en 1991 à Saint Nazaire. Elles s'inscrivaient également dans l'axe Convertisseurs et Compatibilité Electromagnétique du GE-44, groupement d'intérêt scientifique associant trois laboratoires de la région (LEEP, LRTI, LARGE). En janvier 2004, celles-ci se sont poursuivies à l'Institut de Recherche en Electrotechnique et Electronique de Nantes Atlantique (IREENA - EA 1770) nouvellement créé par le rapprochement de 4 laboratoires de la région Nantes - St Nazaire. Malgré les changements successifs des structures de rattachement, ces recherches se sont toujours inscrites dans le contexte des

perturbations conduites basses fréquences des réseaux électriques, notamment ceux à faible puissance de court-circuit ou ilôtés.

L'origine de ces travaux est liée à ma thèse de doctorat, lancée dans le cadre d'une convention CIFRE avec les Chantiers de l'Atlantique, pour répondre à leurs interrogations sur la compatibilité électromagnétique du réseau électrique à bord de leurs navires. A partir des années 1990, les équipements utilisant l'électronique de puissance ont investi les navires de tous types. Leur nombre était en constante augmentation et leur puissance unitaire variait de quelques centaines de watts à plusieurs dizaines de mégawatts. De plus, le réseau électrique d'un navire est un réseau isolé et donc d'impédance relativement élevée par rapport à celle d'une distribution terrestre. A titre indicatif, un navire de croisière 'classique' possède une propulsion électrique de 20MW à 40MW contrôlée par des convertisseurs statiques, pour une puissance totale disponible de 30MVA à 55MVA. Le record reste détenu par le 'Queen Mary II', d'une puissance de 130MVA dont 80MW de propulsion. Dans ce type de configuration, les perturbations harmoniques sont susceptibles d'atteindre rapidement des niveaux élevés.

Afin d'assurer le bon fonctionnement de leurs installations, les Chantiers de l'Atlantique souhaitaient disposer d'une prévision des perturbations harmoniques à un stade avancé de la phase de conception du réseau. Cette anticipation devait leur permettre de prendre à temps les mesures adéquates pour réduire ces harmoniques ou du moins pour en atténuer les effets néfastes. Par ailleurs, les éléments du réseau (câbles, transformateurs, convertisseurs, filtres...) pouvaient dès lors être dimensionnés plus précisément, autorisant une réduction du coût global de l'ensemble de l'installation et un accroissement de sa fiabilité.

Avec un tel cahier des charges, les travaux de thèse se sont attachés à recenser et à proposer des modèles de convertisseurs statiques de puissance et des méthodes de prévision des harmoniques. Les convertisseurs devaient pouvoir être analysés séparément les uns des autres ou associés, afin d'estimer les niveaux harmoniques sur l'ensemble du réseau. En raison du nombre important de convertisseurs et des modes de fonctionnement, les techniques usuelles d'évaluation ne semblaient plus adaptées et une autre approche basée sur l'étude probabiliste des courants absorbés et des tensions résultantes a pu être proposée et validée.

Ces travaux réalisés en collaboration avec les Chantiers de l'Atlantique ont ainsi confirmé tout l'intérêt de disposer d'une évaluation fiable au plus tôt dans la phase de conception d'une installation nouvelle. Cet objectif a continué de guider les recherches suivantes, en améliorant et en affinant les moyens et méthodes d'estimation afin de fournir des prévisions les plus réalistes possibles. Deux orientations ont été prises :

- le développement de modèles harmoniques des charges non linéaires et des outils de simulations,

- les méthodes prévisionnelles basées sur une approche stochastique des grandeurs électriques.

Le Tableau 1 propose une chronologie de l'ensemble des activités car ces deux axes ont été menés en parallèle en fonction des avancées obtenues et parfois, il faut bien le dire, des circonstances extérieures qui se présentaient à nous.

1993	Début des travaux	
1994	Simulation 'déterministe' des harmoniques	modèle harmonique d'un ensemble de gradateurs
1995	Prévision des harmoniques par une approche stochastique	
1996	Développement logiciel : PHARE	modèle harmonique des redresseurs en conduction discontinue
1998	Caractérisation par des lois de probabilité sur l'amplitude et la durée des harmoniques	Calcul d'optimisation de la puissance de filtrage
1999	Identification de l'évolution temporelle des harmoniques par un modèle auto-régressif	modèle harmonique des redresseurs en conduction continue (fortes ondulations)
2000		Développement logiciel : OSCHAR
2001		Discrimination de l'origine des harmoniques
2002	Identification de l'évolution temporelle des harmoniques par FFT	Interface graphique d'OSCHAR Interharmoniques produits par un pont redresseur
2003		Modélisation fréquentielle des transformateurs
2004		Interharmoniques dans une propulsion électrique, Observation des courants de fuite.
2005	Simulation de scénario de fonctionnement de véhicules terrestres	
2007	Application de l'approche stochastique aux réseaux de bord des avions	Modélisation fréquentielle d'un ensemble convertisseur-machine asynchrone

Tableau 1 : Chronologie des travaux de recherche regroupés selon 2 catégories : méthodes d'identification et de prévision, modèles de charges non linéaires

1.3.2 Modèles harmoniques de charges et outils de simulation

Dans la suite logique de ma thèse, un premier logiciel de simulation (PHARE) a été développé en 1996. Construit autour d'un algorithme de Monte-Carlo, celui-ci fournit les lois de probabilité correspondant aux courants et tensions harmoniques susceptibles d'apparaître dans un réseau électrique non maillé. Le retour d'expérience acquis sur la simulation de

quelques plates-formes navales, nous a rapidement démontré la faiblesse des modèles harmoniques des convertisseurs usuellement employés. Dans la période 1996 à 2001, de nouveaux travaux ont permis de combler ces lacunes [Lemoine_96][Miègeville_01A]. En particulier, une structure très répandue de redresseurs triphasés à filtre inductif ou capacitif a pu être modélisée et validée. Basé sur des expressions entièrement analytiques, ce modèle présente l'avantage d'une grande rapidité de calcul, compatible avec les techniques de simulations de Monte-Carlo. Ces nouveaux modèles de convertisseurs, associés à une optimisation du dimensionnement des filtres harmoniques a conduit à la naissance d'un second logiciel de simulation des réseaux [Guérin_02A] dans les années 2000.

L'année 2001 a été déterminante pour l'élargissement de notre spectre d'étude. Jusque là, nos activités étaient principalement concentrées autour des harmoniques, même si nos observations sur le terrain nous avaient révélé d'autres types de perturbations. Dans le cadre d'une thèse DGA/CNRS en collaboration entre le Groupement d'Etudes Sous Marine de l'Atlantique (DGA/GESMA) et les Chantiers de l'Atlantique, des recherches ont été lancées afin d'évaluer l'influence du réseau de distribution électrique sur la signature électromagnétique basse fréquence d'un navire.

Dans le cas de navires militaires, le concept de navires tout électrique (NTE) suppose l'intégration au sein d'une même coque, d'un nombre important d'équipements de forte puissance (propulsion électrique, systèmes d'armes...). L'alimentation de ces installations réclame un accroissement considérable de l'énergie électrique à produire et à distribuer. Cette augmentation de la puissance électrique installée ne doit pas compromettre la 'discrétion' du navire, notamment par une signature électromagnétique non-contrôlée.

Les objectifs de ces travaux de thèse étaient d'analyser les courants et tensions présents sur le réseau électrique dans la gamme de fréquences allant du Hz au kHz et de déterminer la circulation possible de courants de fuite entre le réseau et la coque du navire. Ce sujet nous a amenés à étudier les processus de génération de composantes fréquentielles autres que harmoniques, notamment pour les structures de variations de vitesse à commutateur de courant et onduleur de tension employées dans les systèmes de propulsion électrique [Bourguet_04C].

Le calcul de la propagation de ces courants 'interharmoniques' suppose alors de disposer de modèles fréquentiels des différents constituants et non plus seulement de modèles harmoniques. D'où le lancement en 2002 de travaux sur la modélisation des transformateurs et la recherche de collaboration dans ce domaine [Riu_03].

Actuellement, nos efforts se concentrent autour des processus de génération des perturbations basses fréquences incluant les interharmoniques et les courants de fuite. De plus, la modélisation fréquentielle des ensembles convertisseurs-machines et des transformateurs se poursuit, soit par une approche de type circuit [Belhaj_05], soit par une représentation analytique et matricielle [Ballerin_04].

1.3.3 Méthodes prévisionnelles

A partir de 1997, en liaison avec la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France, la thèse de Doctorat de M^{me} Miègeville a débuté sur la caractérisation et l'évaluation des variations temporelles des harmoniques. L'objectif était d'intégrer dans la description des courants harmoniques, une information concernant leurs variations temporelles. Cette information, associée aux lois de probabilité, devait alors permettre d'estimer l'amplitude des harmoniques, mais également leur durée, caractérisant ainsi les contraintes thermiques susceptibles d'être appliquées aux matériels électriques. Le but à plus long terme était de dimensionner des équipements avec davantage de précision, ou encore, d'évaluer l'impact des harmoniques sur leur durée de vie. Ce dernier point était par ailleurs inscrit dans le premier thème du G.D.R. 'sûreté et disponibilité des systèmes électrotechniques'.

Toujours à l'aide d'outils probabilistes, ces travaux ont abouti en 1999, à l'identification des surcharges électriques probables liées au courant fondamental et aux harmoniques [Miègeville_99]. Néanmoins, le manque d'informations disponibles auprès des fabricants concernant les capacités de surcharge des matériels, ne nous a pas permis de généraliser l'application de ces résultats.

D'autre part, il est apparu que certaines charges ou installations présentaient un comportement aléatoire venant se superposer à un fonctionnement 'déterministe' et périodique, par exemple sur une journée. L'évolution des harmoniques a été caractérisée par l'emploi de séries temporelles et l'exploitation de celles-ci a permis de prévoir le comportement des harmoniques que provoquerait l'ajout d'un nouveau perturbateur sur une installation existante ou encore de simuler l'évolution des grandeurs électriques d'une installation dans le temps et dans déduire les éventuelles surcharges.

Depuis 2001, ces méthodes prévisionnelles font toujours l'objet de recherches, soit au niveau de la caractérisation des évolutions temporelles des harmoniques, soit dans les techniques de reproduction et d'estimation des grandeurs fondamentales et harmoniques. Dans ce contexte et compte tenu des enjeux, nous nous intéressons plus particulièrement à la prévision des

puissances susceptibles d'être consommées par des charges intermittentes ou au fonctionnement continûment variable. L'objectif à plus long terme est l'optimisation de la conception des installations électriques ou de leur exploitation.

1.4 L'étude des réseaux et de leur qualité en France

Sans oublier les recherches publiées au début du 20^e siècle sur la qualité de l'énergie et les réseaux, nous allons dresser un bref récapitulatif des travaux des laboratoires de Génie Electrique français au cours de ces dernières années. En observant leurs thèmes de recherche, un grand nombre d'entre eux s'est intéressé à la qualité des réseaux au travers des perturbations harmoniques. Cependant, celles-ci ont surtout été abordées dans le cadre d'études liées aux convertisseurs statiques de puissance. Deux catégories se dégagent facilement. La première rassemble les travaux destinés à déterminer et à éliminer les harmoniques générés par différents types de convertisseurs selon leur structure et algorithme de contrôle [Cocquerelle_99]. La seconde concerne l'utilisation d'un convertisseur pour éliminer la propagation de courants harmoniques [Peng_90A]. Depuis les années 1980 et les travaux de M. Akagi sur les filtres actifs [Akagi_95], c'est certainement cette dernière catégorie qui a fait l'objet du plus grand nombre de publications autour des harmoniques. Les structures possibles de ces filtres (commutateur de courant, onduleur de tension, raccordement en série, en parallèle ou hybride...) ayant été rapidement envisagées, les recherches se sont principalement portées sur la partie commande de ces convertisseurs. Les 'automaticiens' ont même trouvé là un nouveau champ d'applications, tant sur les méthodes d'extraction des harmoniques que sur la régulation et le contrôle des courants [Bruyant_99]. La mise en œuvre de ces algorithmes de plus en plus sophistiqués a été grandement facilitée par l'augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs et l'apparition de processeurs dédiés (DSP).

En revanche, l'observation des activités de recherches dans la période 1990-2000, démontre que peu de laboratoires universitaires se sont intéressés aux aspects 'réseaux électriques'. Quelques équipes ont travaillé dans ce domaine, avec une orientation marquée vers les réseaux de transport. Nous citerons en particulier :

- le L.E.G. sur la détection et la localisation de défauts,
- le service Electrotechnique et Electronique Industriel de l'E.S.E. sur la simulation numérique, l'étude des régimes transitoires et les perturbations des réseaux.

Il faut souligner que ces laboratoires collaboraient étroitement avec la Direction des Etudes et Recherche (DER) d'Electricité de France, principal utilisateur potentiel des résultats de ces recherches.

Si dans le milieu industriel, EdF est forcément impliquée dans les études de réseaux, il convient de signaler l'activité des centres de recherche de Cegelec (Alstom) et de Merlin Gerin (Schneider) dans le domaine de la compensation d'énergie réactive et du filtrage des harmoniques.

De notre côté, les recherches sur les perturbations harmoniques des réseaux ont débuté à St Nazaire dans un contexte peu concurrentiel, d'autant plus que nous nous sommes limités aux réseaux de distribution ilôtés (navires) ou à faible puissance de court-circuit tels que les réseaux industriels ou tertiaires.

Concernant l'utilisation d'outils probabilistes associés à la qualité des réseaux mais hors étude de fiabilité, deux autres équipes ont abordé l'analyse des harmoniques avec la même approche :

- les travaux de M. Pierrat et de ses collaborateurs au LEG, sur les harmoniques produits par un redresseur triphasé [Wang_93] et le problème de la sommation de plusieurs vecteurs 'aléatoires' [Pierrat_91A].
- le groupe 'qualité de la tension' de la DER avec la caractérisation statistique des harmoniques produits par un grand nombre de charges non linéaires [Letzelter_96], telles que les téléviseurs ou les conditionneurs d'air [Gorgette_00].

Curieusement, avec la remise en cause du monopole d'EdF et la re-régulation du marché de l'électricité, ces recherches semblent ne pas avoir été poursuivies. Par contre, ce changement dans le paysage électrique français a fait émerger à la fin des années 90, de nouvelles thématiques de recherche dans les laboratoires. Nous pouvons les classer arbitrairement selon trois grandes catégories :

a) L'électronique de puissance appliquée aux réseaux : Il s'agit de concevoir et piloter des structures de convertisseurs statiques en vue d'améliorer la qualité de l'énergie (harmoniques, flicker, creux de tension...) ou d'en contrôler les flux sur les lignes (FACTS). Ce dernier point devient un enjeu majeur dans un contexte de 'libre échange' de l'énergie, alors que le nombre de lignes de transport est limité pour des raisons économiques et environnementales. Dans la suite des filtres actifs, la plupart des laboratoires se sont intéressés à cette problématique, en particulier ceux possédant une longue histoire en électronique de puissance (CEGELY, GREEN, LEEI, L2EP, LEG, LGEP, SATIE,...).

b) Interface avec le réseau : Dans le contexte d'une production décentralisée, notamment éolienne ou photovoltaïque, le raccordement des générateurs réclame le plus souvent une conversion des caractéristiques de l'énergie (tension, fréquence) pour l'adapter aux spécifications et contraintes du réseau. Les efforts portent sur les structures et la commande

de convertisseurs employés comme interface. Globalement, nous retrouvons là encore, les laboratoires précédemment cités avec quelques autres (LEM, GREAH, IREENA...).

c) Sécurité - fiabilité des réseaux : Bien que les deux thèmes précédents participent à la qualité des réseaux, nous pouvons regrouper les activités présentant une action plus globale sur les réseaux et par là même pouvant se rapprocher de nos propres activités :

- la gestion des flux d'énergie, la détection et la localisation de défaut, la conception des réseaux (LEG - Syrel),
- l'étude des interactions réseau-convertisseur, comprenant également les fréquences de découpage des semi-conducteurs (LEG - Syrel, GREAH – Electrotechnique...)
- l'impact des systèmes de production dispersés (L2EP - réseaux électriques et systèmes énergétiques, LEEI - système - commande et diagnostic, SEEI).

Sur ce dernier point, il faut remarquer la création en septembre 2001 d'un Centre National de Recherche Technologique (CNRT) dans la région lilloise, dont un des programmes porte sur l'impact de la génération d'énergie décentralisée dans les réseaux de distribution. Cet exemple montre clairement une volonté de développer les travaux autour de la problématique 'réseau et production décentralisée'. Notons également que les travaux des laboratoires ne concernent plus uniquement le transport de l'énergie mais également sa distribution au travers des réseaux embarqués (avions, navires) ou spéciaux (ferroviaire, tramway).

Cette rapide synthèse montre un accroissement important durant ces dernières années, des recherches institutionnelles liées aux réseaux et à leur qualité. Si un effet de mode n'est pas à négliger, il semble néanmoins évident que les contraintes d'exploitation actuelles et futures, les évolutions des moyens de production et de leur architecture ainsi que les défaillances apparues à l'étranger, révèlent de réelles difficultés. Il est alors naturel que les chercheurs se mobilisent ou soient sollicités autour de ces questions.

Pour notre part, ayant acquis une expérience dans les réseaux à faible puissance de court circuit, de type industriel ou tertiaire, en mode îloté ou non, nous poursuivons nos travaux en nous limitant volontairement à ce domaine d'étude. A la vue des perspectives de recherche des autres laboratoires, il semble que nous puissions conserver cette spécificité encore quelques années, notamment par l'approche stochastique que nous employons pour traiter certains problèmes. Par contre, du fait de nos orientations exposées dans la 3^{ème} partie de ce mémoire, des rapprochements voire des similitudes apparaîtront plus nettement dans l'avenir (exemple : l'impact d'une production éolienne sur la stabilité du réseau). L'augmentation du nombre de chercheurs concernés par les réseaux de distribution devrait favoriser les échanges scientifiques autour de ce thème. La création de l'équipe Distribution Production de l'Energie Electrique (DPEE) du Réseau Thématique Pluridisciplinaire (RTP 48) a représenté un

premier exemple de ce type de collaboration. Plus récemment, la constitution du groupement de recherche SEEDS (Systèmes d'Energie Electrique dans leur Dimension Sociétales) a fédéré les laboratoires et les équipes académiques du Génie Electrique autour de quatre pôles thématiques. Parmi ces quatre pôles, deux sont susceptibles d'être directement concernés par les problématiques de la qualité, de la fiabilité et de la disponibilité des réseaux d'énergie embarqués (pôle Transport) ou terrestre (pôle Ressources et Réseaux).

1.5 La qualité de l'énergie dans le monde

L'analyse réalisée sur les recherches en France peut aisément être étendue à un plan international. Les réseaux et en particulier ceux de distribution à faible puissance de court-circuit ne représentent qu'une infime partie des activités du génie électrique. Cependant, sans avoir effectué un décompte précis, il existerait proportionnellement plus de laboratoires travaillant sur ce sujet à l'étranger qu'en France. Le fait que des entreprises privées soient directement impliquées au niveau de la production et du transport de l'énergie a peut-être contribué au développement de recherches universitaires. Des organisations internationales comme l'EPRI ou la CIGRE se sont même constituées autour des problématiques réseaux, en particulier celles liées au transport.

Les questions de fiabilité des réseaux et de qualité de l'énergie sont devenues, en une dizaine d'années, un thème abordé dans de nombreux congrès internationaux, sans compter ceux qui leur sont entièrement dédiées (ICHQP, PQA, CIRED, EPQU...). Les outils probabilistes y sont parfois exposés mais principalement dans le but de définir des indicateurs de fiabilité [Billinton_02].

En se focalisant sur les perturbations des réseaux électriques traitées par une approche stochastique, le nombre de chercheurs se restreint à une petite communauté. Sans prétendre être exhaustif, le Tableau 2 liste les principaux membres ou équipes selon les thèmes privilégiés. Nous rassemblerons sous une rubrique particulière nos collègues italiens car leur nombre important et les collaborations croisées rendent difficile une éventuelle classification. Nous citerons par ordre alphabétique : R. Carbone, P. Caramia, G. Carpinelli, A. Cavallini, F. De Rosa, R. Langella, P. Marino, G.C. Montanari, F. Rossi, A. Russo, F. Ruggiero, A. Testa, P. Verde. Leurs travaux particulièrement variés vont de l'identification des harmoniques et interharmoniques générés par des convertisseurs de puissance à des calculs de propagation des harmoniques en tenant compte des variations aléatoires des impédances du réseau.

Ayant une approche commune pour aborder la question des perturbations en utilisant des outils mathématiques semblables, nos recherches s'inscrivent parfaitement dans cette communauté scientifique. Nos contributions les plus originales se situent sur les modèles analytiques des convertisseurs (gradateurs, redresseurs à filtre capacitif), la caractérisation des variations temporelles par des lois ou modèles probabilistes, avec de surcroît une volonté affirmée d'appliquer nos travaux à des installations réelles.

<i>Chercheurs</i>	<i>Institut</i>	<i>sommation des harmoniques</i>	<i>caractérisation statistique</i>	<i>modèle des redresseurs</i>
Baghzouz	University of Nevada / USA	X	X	
Kazibwe / Ortmeyer	Clarkson University / USA	X		
Kaprielian	USA	X		
Cyganski, Orr, Emanuel, Morrison	Worcester Polytechnic Institut / USA	X	X	
Heine, Lehtonen	Helsinki University of Technology / Finland	X		
Pierrat / Wang	L.E.G / France	X		X
Ngandui	UQTR / Quebec			X
Grady	University of Texas, USA		X	
Fauquenbergue Gorgette, Lachaume, Letzelter	D.E.R.- EdF / France		X	

Tableau 2 : équipes de recherche ayant une approche probabiliste des harmoniques

1.6 Conclusion

Les phénomènes perturbateurs des réseaux, comme l'apparition de composantes fréquentielles non désirables, sont étudiés depuis les origines de la distribution électrique. Sans l'élimination ou la réduction de certaines de ces perturbations (amélioration des génératrices, maîtrise des résonances...), les réseaux n'auraient sans doute pas connu un développement aussi important et rapide.

Aujourd'hui encore, réseaux et perturbations se retrouvent associés, même si les raisons ont changé et sont principalement liées à la prolifération de charges non linéaires, notamment les convertisseurs à base d'électronique de puissance. La baisse de la qualité de l'énergie distribuée se fait ressentir jusque chez les consommateurs. Les conséquences sur les matériels sont loin d'être négligeables, même si elles sont difficilement chiffrables [Ba_99].

La 're-régulation' du marché de l'électricité, accompagnée d'une production décentralisée, font apparaître (ou ressurgir) des difficultés. Sur un plan international comme national, les activités de recherches autour des réseaux et de leur qualité y ont trouvé un regain d'intérêt.

Mes travaux et ceux auxquels j'ai pu contribuer s'insèrent également dans ce contexte. Une orientation très marquée vers les réseaux de distribution industriels, tertiaires ou embarqués, alliée à une approche stochastique leur ont donné une certaine originalité. La suite de ce mémoire devrait permettre au lecteur d'appréhender ces spécificités et de les situer par rapport aux recherches françaises et étrangères succinctement présentées.

Dans cet objectif, après cette introduction générale, les principaux travaux et résultats vont être exposés plus en détails. Ces activités de recherche ne se sont pas nécessairement déroulées de manière linéaire dans le temps. De plus, leur développement s'est parfois effectué sous l'impulsion de circonstances extérieures ou de rencontres fortuites, même si une orientation générale a toujours pu être conservée et maîtrisée. C'est donc volontairement que les travaux sont regroupés en deux grandes catégories correspondant aux deux premières parties de ce mémoire et non pas dans l'ordre chronologique de leur réalisation. La première partie, composée de deux chapitres, aborde les perturbations conduites basses fréquences avec une vision purement déterministe. Les trois autres chapitres de la seconde partie traitent des méthodes probabilistes mises en œuvre sur de nombreux exemples, orientés majoritairement sur les harmoniques.

Afin de traduire notre démarche scientifique, les chapitres sont présentés de manière uniforme, allant de l'observation des phénomènes à leur prévision, en passant par les phases d'identification et de modélisation. Cette démarche peut naturellement être discutée. Si elle nécessite parfois un processus itératif, son efficacité nous a toujours conduit à des résultats. Par ailleurs, cette démarche présente à mes yeux l'avantage de maintenir une relation étroite avec les phénomènes physiques réellement rencontrés.

Enfin, les travaux en cours et ceux envisagés à plus ou moins long terme sont exposés dans une troisième partie. Cette prospective scientifique s'appuie sur l'expérience acquise, les préoccupations des industriels rencontrés, aboutissant dès lors à une certaine vision des futurs réseaux de distribution électrique, de l'importance croissante de l'énergie et de sa gestion dans nos sociétés.

1^{ere} Partie :

Les Perturbations Basses Fréquences

2 LES HARMONIQUES

2.1 Observation

La question de la déformation des courants et tensions d'alimentation et en particulier celle des perturbations liées aux harmoniques, se pose de manière plus pressante depuis la généralisation d'équipements intégrant de l'électronique de puissance. Il semble donc naturel d'observer les formes d'onde des courants absorbés par ce type de charge.

La figure 6 donne deux exemples de courants absorbés par un ordinateur individuel et un pont redresseur triphasé à diode. Ces deux matériels sont des représentants typiques des charges perturbatrices du secteur industriel et tertiaire. Dans les deux cas, les courants sont périodiques mais d'allure non sinusoïdale, malgré une tension d'alimentation pouvant être considérée comme sinusoïdale. Le courant ne peut alors plus s'exprimer à partir de la tension d'alimentation à l'aide d'une relation linéaire : $I \neq a.V + b$, où a et b seraient des coefficients complexes. Pour cette raison, ces charges sont dites non linéaires. Dans la suite de ce document, les termes de convertisseurs ou de charges non linéaires seront parfois employés l'un à la place de l'autre, sachant qu'un convertisseur statique de puissance constitue une charge non linéaire (sauf exception) alors qu'une charge non linéaire n'est pas systématiquement un convertisseur (ex : four à arc, tube fluorescent).

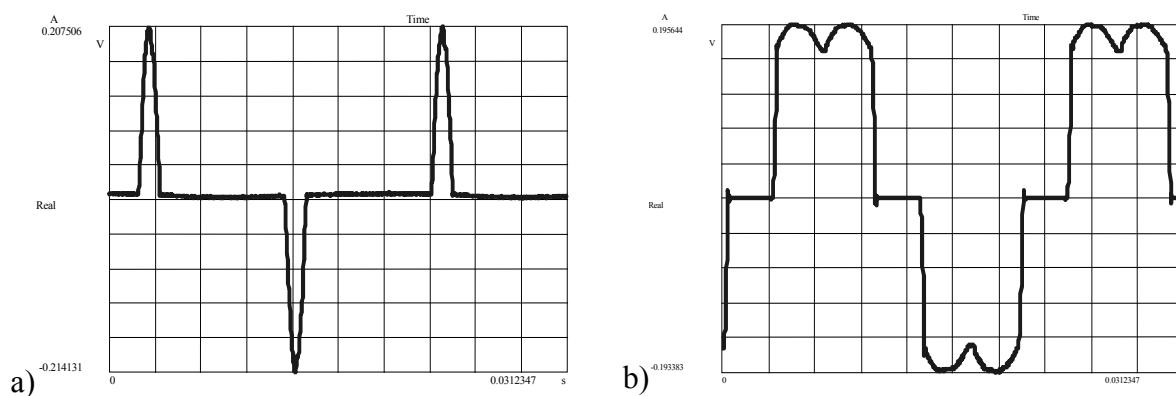


figure 6 : allure temporelle des courants absorbés par un :

a) ordinateur ; b) redresseur triphasé

2.2 Identification

La forme des signaux observés est très différente d’une charge à une autre. Un point commun est qu’ils sont non sinusoïdaux mais périodiques. La décomposition en série de Fourier apparaît alors comme l’un des moyens usuels pour caractériser ce type de signal. D’un point de vue mathématique, le signal temporel $i(t)$ est représenté par une somme infinie de sinusoïdes dont les fréquences sont des multiples de la fréquence ‘principale’ de $i(t)$. Chacune de ces sinusoïdes est appelée ‘harmonique’ ; la première d’entre-elle est dénommée ‘fondamental’.

$$\begin{aligned} i(t) &= \sum_{h=1}^{\infty} (X_h \cos(h\omega t) + Y_h \sin(h\omega t)) \\ &= \sum_{h=1}^{\infty} I_h \sin(h\omega t - \Phi_h) \end{aligned} \quad (1)$$

L’amplitude et la phase de chaque harmonique sont déterminées à partir des coefficients de la série de Fourier :

$$\begin{aligned} X_h &= \frac{2}{T} \int_0^T i(t) \cos(h\omega t) dt & Y_h &= \frac{2}{T} \int_0^T i(t) \sin(h\omega t) dt & (2) \\ & & \text{où } I_h &= \sqrt{X_h^2 + Y_h^2} \text{ et } \Phi_h = \arctg(Y_h/X_h) \end{aligned}$$

Dans les réseaux de distribution électrique, les courants et tensions sont généralement identiques sur l’alternance positive et négative. Grâce à cette symétrie, les harmoniques de rang pair (2, 4, 6...) sont alors négligeables. De plus, l’amplitude des harmoniques décroît relativement rapidement avec l’augmentation du rang. De fait, le signal temporel $i(t)$ peut être facilement représenté par un nombre limité de composantes harmoniques et donc par un petit nombre de paramètres. Typiquement, le courant de la figure 6b) est assez bien décrit à l’aide de 18 paramètres, correspondant aux principaux harmoniques allant du fondamental au rang 25.

D’un point de vue expérimental, le signal (courant ou tension) est observable dans le domaine temporel à l’aide d’un oscilloscope. Il est également possible de l’observer et de l’identifier directement sous la forme d’un spectre dans le domaine fréquentiel grâce à un analyseur harmonique ou un analyseur de spectre. La figure 7 fournit une représentation fréquentielle des courants de la figure 6. Les principales raies correspondent aux premiers harmoniques significatifs du signal.

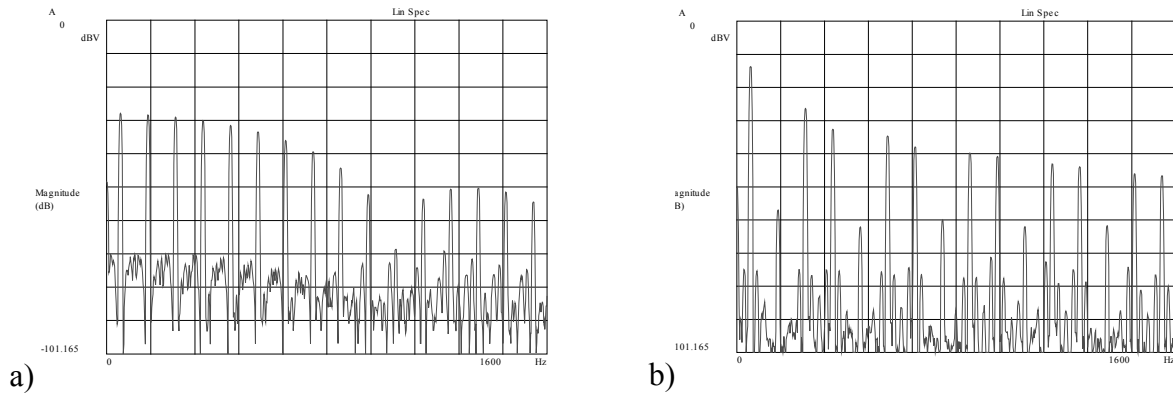


figure 7 : spectre fréquentiel des courants absorbés par :
a) un ordinateur ; b) un pont redresseur triphasé

2.3 Modélisation

2.3.1 Charge non linéaire

Par définition, ce type de charge absorbe un courant non sinusoïdal même lorsque la tension d'alimentation l'est parfaitement. De par leur nature, les convertisseurs de puissance sont placés dans cette catégorie. Le courant absorbé par ces charges a été caractérisé par des composantes harmoniques, correspondant à une somme de courants sinusoïdaux de fréquences différentes. Il devient alors presque naturel de modéliser ces charges par une succession de générateurs de Norton équivalents (voir figure 8), injectant chacun un courant sinusoïdal à la fréquence harmonique considérée. La somme de ces courants doit bien évidemment reproduire le courant réellement absorbé par la charge non linéaire.

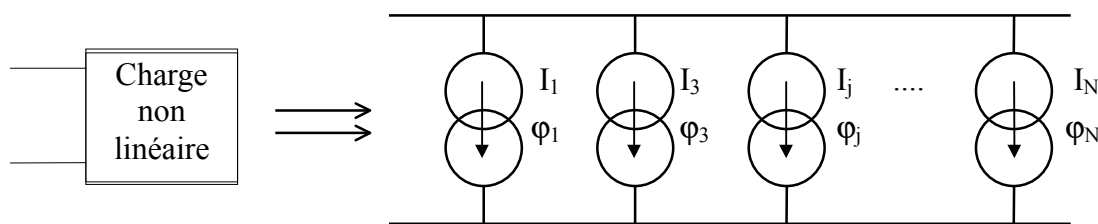


figure 8 : modélisation d'une charge non linéaire

Le cas est peu fréquent dans les réseaux de distribution, mais si un matériel produisait des tensions harmoniques, le même type de modélisation est envisageable, en considérant un ensemble de générateurs de Thévenin équivalents.

Dans le but de simplifier les études, le processus de génération des courants harmoniques sera supposé indépendant de la forme d'onde de la tension d'alimentation. Cette approximation est

en général valide pour les convertisseurs constitués d'un redresseur associé à une inductance de lissage et pour des taux de distorsion harmonique en tension peu élevés (<10%). Grâce à cette hypothèse où les phénomènes sont considérés découplés, les convertisseurs et leurs courants harmoniques sont étudiés séparément, sans tenir compte de l'influence éventuelle de la tension du réseau. Si cette influence devait être considérée, certains auteurs [Perard_79][Barret_97] proposent d'utiliser des générateurs équivalents imparfaits en insérant des impédances en parallèle avec les sources de courant. Cela suppose néanmoins l'existence d'une relation linéaire entre tension et courant harmoniques.

2.3.2 Réseau

Dans les circuits électriques linéaires en régime permanent sinusoïdal, les relations entre tensions et courants sont connues et maîtrisées avec une palette d'outils parfaitement adaptés : lois de Kirchhoff, diagramme de Fresnel, grandeurs complexes, 'phaseurs'... Pour les régimes non sinusoïdaux, une solution consisterait à revenir aux équations différentielles décrivant les interactions entre tensions et courants. En considérant une installation ou un réseau électrique, la résolution d'un système d'équations différentielles, où l'ordre et le nombre de celles-ci sont potentiellement élevés, n'est plus aussi trivial.

Dans une grande majorité des situations, les circuits électriques peuvent être supposés linéaires, c'est-à-dire que pour des signaux sinusoïdaux de fréquence donnée, il est possible d'écrire la loi d'Ohm en grandeur complexe : $U = Z \times I$. Au lieu d'étudier les circuits électriques dans le domaine temporel pour des régimes non sinusoïdaux, il semble alors préférable de travailler dans le domaine fréquentiel, où pour chaque fréquence harmonique considérée, les circuits électriques sont régis par un système d'équations linéaires de la forme : $U(h) = Z(h).I(h)$ où $U(h)$ et $I(h)$ sont les composantes harmoniques de la tension et du courant et donc des grandeurs sinusoïdales.

La caractérisation des tensions et courants non sinusoïdaux par leurs composantes harmoniques montre alors pleinement son intérêt. D'une résolution d'un seul système d'équations différentielles, la détermination des tensions et des courants dans une installation s'effectuera par le traitement de plusieurs systèmes d'équations linéaires et définies pour chaque rang harmonique h .

$$U(h) = Z(h).I(h) \quad \text{pour } h = 1 \text{ à } N \quad (3)$$

L'analyse des circuits et la résolution de ces équations font appel aux mêmes techniques et outils, largement employés dans l'étude des circuits en régime sinusoïdal.

Le calcul des courants et tensions sur un réseau de distribution électrique est donc envisageable à partir de la connaissance de l'impédance $Z(h)$. Dans l'hypothèse où les phénomènes de saturation sont négligeables, la plupart des éléments d'un réseau ainsi que les charges 'passives' ont un comportement linéaire et peuvent donc être représentés par une impédance équivalente à la fréquence harmonique considérée. Les caractéristiques de ces impédances dépendent de la complexité des modèles employés [Mombauer_93][Barret_97].

La précision de ces modèles et la connaissance de leurs paramètres seront déterminantes, du point de vue de la qualité des estimations faites sur les tensions harmoniques. En l'absence de condensateurs sur le réseau de distribution, l'impédance la plus faible correspond à l'impédance de court-circuit au point de raccordement. Dans le cas d'un réseau iloté, tel celui d'un navire, ce rôle est assuré par l'impédance équivalente des alternateurs des groupes de production. Lorsque les perturbateurs sont connectés au plus près de la source d'alimentation, les tensions harmoniques résultantes sont directement liées aux caractéristiques des alternateurs ou plus généralement à l'impédance de court-circuit du réseau amont.

2.4 Reproduction

Malgré la puissance de calcul disponible actuellement dans nos ordinateurs, il est difficilement envisageable de simuler le comportement temporel de l'ensemble d'un réseau électrique et de ses charges, en raison :

- de la complexité et du nombre d'éléments à prendre en considération,
- de la modélisation relativement fine des systèmes, nécessaire à la mise en évidence des phénomènes étudiés,
- de la simulation de l'ensemble sur une durée de l'ordre de plusieurs périodes afin d'analyser un régime permanent et d'en déduire les harmoniques,
- du temps de simulation prohibitif, même avec l'emploi d'algorithmes particuliers pour la recherche du régime permanent.

Certains auteurs [Tou_92][Yacamini_80] proposent des algorithmes itératifs dédiés à la simulation de plusieurs convertisseurs dans le domaine temporel. L'objectif est de réduire la complexité de l'installation à simuler et de l'adapter aux moyens de calcul disponibles. L'inconvénient majeur de ces processus itératifs est cependant un accroissement des temps de calcul nécessaires à la convergence des résultats. En dehors des 'petites' installations électriques (une source plus ou moins parfaite, un ou deux convertisseurs associés à leur charge), ce type de simulation temporelle est, le plus souvent, difficilement réalisable.

Pour une reproduction des phénomènes harmoniques, il est généralement plus avantageux de simuler l'installation dans le domaine fréquentiel. Pour une fréquence donnée, le système pouvant être considéré comme linéaire, la simulation devient plus aisée et surtout, le temps réel de calcul devient indépendant de la période de temps simulée. L'obtention du régime permanent est implicite. Par contre, une étude complète de l'installation exigera une répétition des simulations, pour toutes les fréquences harmoniques considérées.

Compte tenu des modélisations proposées pour les charges non linéaires et le réseau, la simulation des courants et tensions harmoniques d'une installation peut se décomposer en deux sous problèmes et s'effectuer en deux étapes plus ou moins indépendantes, selon les hypothèses simplificatrices choisies.

2.4.1 Simulation des charges non linéaires

La première étape pour évaluer les harmoniques sur le réseau consiste à déterminer les courants harmoniques générés par les charges non linéaires à l'origine des perturbations. Selon que le processus de génération de ces courants harmoniques est supposé indépendant ou non de la forme d'onde de la tension d'alimentation, cette étape est effectuée une seule fois ou bien insérée dans un processus, le plus souvent itératif, afin de déterminer les courants harmoniques 'réellement' injectés sur le réseau par les charges non linéaires. Plusieurs méthodes sont alors envisageables pour l'obtention de ces courants.

2.4.1.1 Simulation numérique

Le convertisseur, ou de manière plus générale, la charge perturbatrice non linéaire, est étudiée isolément du reste de l'installation. De fait, toutes les interactions avec le réseau ou les autres charges ne sont plus directement prises en compte. Le convertisseur étant seul, sa simulation et la reproduction des courants qu'il est susceptible d'absorber est possible avec des logiciels dédiés à la simulation numérique d'ensembles convertisseurs-machines (Saber, Psim, Matlab/PSB...). Cette simulation temporelle fournit l'allure du courant absorbé (figure 9) ainsi qu'une analyse harmonique ou spectrale de celui-ci. Le Tableau 3 en donne les principales composantes harmoniques. Les amplitudes, et le cas échéant les phases de ces dernières, serviront à définir les sources de courant équivalentes représentant le convertisseur.

h	11	13	23	25
I_h (A)	35.9	30.2	17.1	15.7

Tableau 3 : estimation des courants harmoniques générés par un $\frac{1}{2}$ moteur d'un système de propulsion à $P = 4.5$ MW

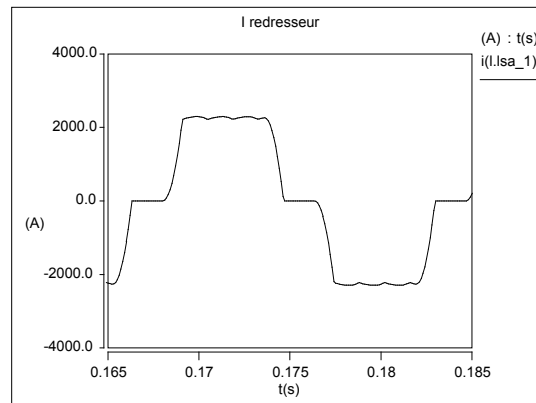


figure 9 : allure temporelle du courant absorbé par l'étage redresseur dodécaphasée
d'un système de propulsion à $P = 4.5$ MW

2.4.1.2 Modèle harmonique analytique

Selon les hypothèses prises pour décrire l'allure des courants absorbés par les convertisseurs, des modèles harmoniques plus ou moins simplifiés sont proposés dans la littérature [Dobinson_75][Graham_83][Grötzbach_95]. Ces modèles présentent l'avantage de fournir directement les composantes harmoniques des courants de ligne des convertisseurs à partir de quelques paramètres (tension, courant redressé, puissance, impédance de source, inductance de lissage...). Les harmoniques ainsi obtenus correspondent au régime permanent de la charge pour une configuration donnée.

Comme tout modèle, leur domaine de validité est parfois réduit et leur usage n'est pas toujours adapté aux situations réelles, notamment quant à la définition de certains paramètres : à titre d'exemple, la valeur du courant redressé à la fin de l'empiètement lors d'une commutation sur un pont de diodes. La précision des résultats allant souvent de pair avec la complexité des modélisations, l'utilisateur se doit de choisir ces dernières en fonction des objectifs de l'étude envisagée : calcul à titre indicatif ; analyse harmonique détaillée...

La définition de modèles harmoniques de convertisseurs plus précis ou valides sur un domaine d'utilisation plus large est en soi une thématique de recherche. Notons que les travaux menés au laboratoire ont abouti à une modélisation :

- d'un ensemble de gradateurs [Guérin_95A]
- d'un pont redresseur en régime de conduction discontinue [Guérin_97A]
- d'un pont redresseur en régime de conduction continue en présence de fortes ondulations du courant redressé [Miègeville_01A].

L'usage d'un calcul formel a facilité l'obtention des expressions des courants harmoniques. Malgré une complexité accrue, ces modèles basés entièrement sur des expressions analytiques

permettent d'obtenir des résultats satisfaisants, tout en conservant des temps de calcul réduits et compatibles avec soit des algorithmes itératifs, soit des simulations de Monte Carlo.

2.4.1.3 Mesure

Lorsque l'installation électrique existe et est accessible, une solution consiste à réaliser la mesure des courants absorbés par la ou les charges étudiées. Les composantes harmoniques sont obtenues soit directement si la mesure est effectuée par un analyseur harmonique (figure 7), soit après une analyse spectrale si les mesures sont issues d'un enregistrement temporel.

Cette technique présente l'avantage d'être particulièrement simple dans son principe et de pouvoir analyser de la même manière, une seule charge ou un ensemble de charges complexes. Hélas, dans la pratique cette méthode est parfois délicate à mettre en oeuvre pour des raisons très variées et indépendante de la volonté du chercheur : disponibilité de l'installation et des personnels d'intervention, accès aux points de mesures, niveaux de tension... De plus, elle suppose que les mesures sont effectuées dans la configuration correspondant à celle de l'installation à simuler.

2.4.2 Réseau

Compte tenu de la modélisation adoptée, chaque élément 'passif' du réseau est représenté par une impédance équivalente, définie pour chaque fréquence harmonique considérée. Le calcul de la propagation des courants harmoniques et des tensions résultantes s'effectue en écrivant les équations électriques en chaque noeud du réseau (équations nodales) et en résolvant le système d'équations final :

$$[I_h] = [Y_h][V_h]$$

où pour chaque rang harmonique h :

- I_h est le vecteur injection de courant, obtenu à partir de la simulation des charges selon les méthodes proposées précédemment,
- Y_h est la matrice admittance du réseau déduite des impédances de chaque élément le constituant,
- U_h est le vecteur tension en chaque noeud du réseau.

Des logiciels commerciaux de simulation harmoniques des réseaux (Harmonique, CymHarmo...) sont basés sur ce principe. Ils permettent la mise en équation du réseau, le calcul de la propagation des courants harmoniques et des tensions résultantes en chaque noeud. Les caractéristiques des modèles employés sont généralement fournis avec la documentation, mais la création et l'adjonction de nouveaux modèles ne sont pas prévues dans les fonctionnalités proposées. Pour ces raisons, nous avons développé nos propres

programmes de calcul afin de disposer d'une maîtrise complète des modèles des éléments linéaires (ex : transformateur) et de mettre en oeuvre des modèles plus précis pour certains types de convertisseurs [Guérin_96B][Guérin_02A].

Par ailleurs, ces logiciels supposent que les convertisseurs, ou du moins leurs courants harmoniques, sont indépendants entre eux et qu'il n'existe pas d'interactions via l'impédance du réseau et les tensions résultantes. Pourtant, ce type d'interaction a pu être mis en évidence dans de nombreux cas [Guérin_02B], notamment pour des ensembles de gradateurs sur charge résistive (ex : éclairage gradé) ou pour des redresseurs à filtrage capacitif où les courants sont fortement influencés par la forme de la tension durant les périodes de conduction des diodes. Afin de prendre en compte ces inter-dépendances, les deux étapes de calcul proposées précédemment (convertisseur / réseau) peuvent être insérées dans un algorithme itératif [Yacmini_80]. La convergence d'un tel algorithme n'a pas vraiment été démontré d'un point de vue théorique mais il semble néanmoins que les simulations convergent vers des résultats stables et uniques. L'usage de ce type d'algorithme nécessite des modèles appropriés de charges non linéaires, intégrant la forme de la tension d'alimentation ou de ses harmoniques dans le processus de génération des courants harmoniques [Sakui_92][Hu_97][Ngandui_98][Cano_01].

2.5 Prévision

Dans le cadre des études harmoniques, l'un des principaux objectifs est de fournir une estimation des valeurs des composantes harmoniques susceptibles d'apparaître sur une future installation électrique ou par suite d'une modification de celle-ci. Il s'agit donc de reproduire le comportement de cette installation dans le but de *prévoir* ses courants et tensions harmoniques.

Afin d'illustrer sur un cas réel les différentes étapes d'une analyse harmonique, nous proposons dans cette partie la mise en oeuvre des méthodes les plus usuelles parmi celles décrites précédemment. L'estimation des courants harmoniques générés par le système de propulsion d'un navire de croisière ainsi que la prévision de leur propagation dans le réseau et des tensions résultantes seront ainsi exposées et détaillées. Le cas particulier d'un navire est très représentatif des réseaux à faible puissance de court circuit, tels que les réseaux industriels, et peut donc être facilement généralisé.

2.5.1.1 Description du réseau de distribution

La structure générale du réseau est donnée en figure 10. La production d'énergie est assurée par quatre diesel-alternateurs de 12 MVA qui alimentent deux tableaux principaux sous 6.6kV, 60Hz. Les charges de fortes puissances sont raccordées directement sur ces tableaux, notamment la propulsion électrique composée de deux moteurs synchrones à double stator de 12 MW. La partie hôtellerie du navire est découpée en 4 zones incendies, où une sous-station de 1.5 MVA distribue l'énergie sous 440V et 220V. Deux transformateurs de 4 MVA alimentent deux tableaux 'machines', auxquels sont raccordés tous les auxiliaires et installations techniques nécessaires au fonctionnement du navire.

L'étude harmonique est effectuée en considérant une configuration particulière du réseau où toutes les caractéristiques et les charges doivent être définies. Le Tableau 4 récapitule toutes les informations relatives à l'exemple proposé.

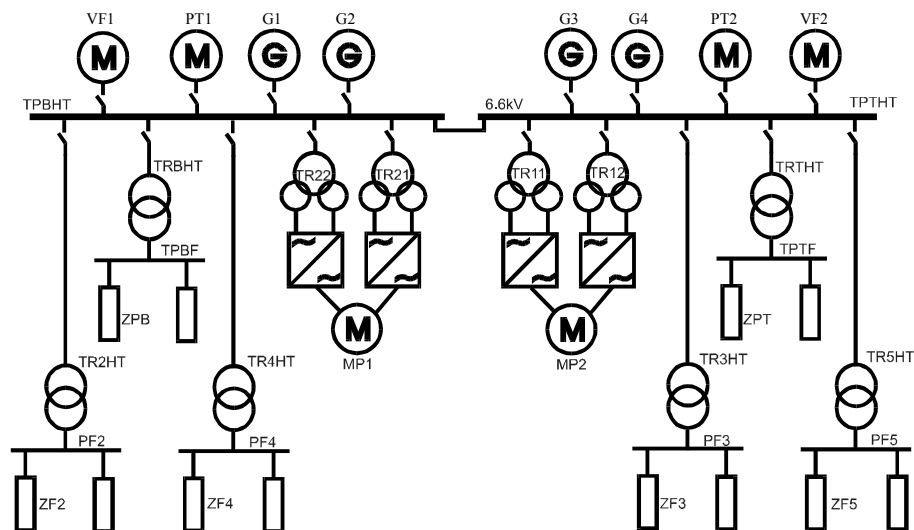


figure 10: structure générale du réseau

équipement	nbre	Un (V)	Sn (MVA)	Pn (MW)	cos Φ	
Alternateurs G1 - G4	4	6600	12			$S_{cc_{tot}} = 240\text{MVA}$
Propulsion MP1 & MP2	2	6600		9	0.98	
Transformateurs 'machine'	2	6600/440	4			$ucc = 8\%$
Charges ZPB & ZPT		440		0.93	0.8	
Transformateurs de sous-station	4	6600/440	1.5			$ucc = 6\%$
Charges sous-station		440		0.92	0.8	
Pompes PT1 & PT2	2	6600		1.2	0.8	

Tableau 4 : configuration et caractéristiques du réseau

2.5.1.2 Simulation des Convertisseurs

La deuxième étape consiste à déterminer les courants harmoniques générés par les convertisseurs de propulsion, à l'origine des principales perturbations. Dans le but de simplifier les études, le processus de génération de ces courants harmoniques sera supposé indépendant de la forme d'onde de la tension d'alimentation.

Pour la configuration envisagée avec une propulsion à 2x9 MW, la simulation d'un convertisseur fournit l'allure et le spectre du courant de la figure 9. Compte tenu du rapport des transformateurs et en supposant tous les convertisseurs identiques, un demi-moteur de la propulsion électrique génère sur le 6.6 kV les courants harmoniques du Tableau 3.

2.5.1.3 Estimation des tensions harmoniques

En considérant l'injection des courants harmoniques définie dans le Tableau 3, la simulation du réseau choisi pour exemple fournit les tensions harmoniques présentées dans le Tableau 5. En raison de la structure dodécaphasée des variateurs de vitesse de la propulsion, les courants harmoniques de rangs 5, 7, 17 et 19 sont théoriquement éliminés. Les rangs $12k \pm 1$ étant naturellement plus faibles, les tensions résultantes présentent une amplitude relativement peu élevée, compte tenu des puissances mises en jeu. Cependant, le niveau de perturbation dépasse les limites recommandées par les normes internationales et celui-ci se trouve aggravé dans certaines configurations moins favorables : fonctionnement à trois diesel-alternateurs, puissance de propulsion plus importante ...

Les tensions harmoniques sont plus élevées sur le jeu de barres 6.6 kV, puisque l'injection de courants est réalisée en ce point. Les impédances des autres charges 6.6 kV étant grandes devant celles des alternateurs, elles n'ont que peu d'influence sur l'amplitude des tensions résultantes. Sur le 440V des sous-stations, l'impédance des transformateurs associée à celles de leurs charges font office de diviseur de tension, réduisant ainsi l'amplitude des harmoniques. Toutefois, ce résultat n'est valable que si aucun courant harmonique n'est injecté au niveau du 440V. Dans le cas contraire, la tension devient supérieure ou inférieure à celle estimée dans le Tableau 5, selon la phase des courants générés.

Généralement, l'estimation des courants et tensions harmoniques sur le réseau est effectuée pour trois ou quatre configurations principales. Les évaluations obtenues par cette méthode déterministe permettent d'identifier les situations où les limites recommandées par les normes ou bien imposées par les spécifications techniques de l'installation, sont dépassées. Dans ces conditions, il est souvent nécessaire de mettre en place une solution de filtrage des harmoniques.

rang harmonique	11	13	23	25	TDH
6.6 kV (%)	6.62	6.43	5.68	5.55	12.2
440V machine. (%)	6.40	6.17	5.16	4.98	11.4
440V sous station. (%)	5.95	5.62	4.19	3.95	10.0
norme CEI (%)	3.5	3	1.5	1.5	8

Tableau 5 : estimation des tensions harmoniques résultantes
(en % de la tension fondamentale)

2.6 Conclusion

Les modèles harmoniques et les algorithmes de calcul proposés dans ce chapitre permettent l'estimation et la prévision des harmoniques sur un réseau électrique de distribution. La démarche et la faisabilité ont pu être illustrées sur un exemple de réseau simplifié de navire.

Néanmoins, ces estimations sont réalisées à partir de la simulation simplifiée des installations, ne prenant pas en compte tous les phénomènes susceptibles de se produire dans la réalité. Les marges et sources d'erreurs doivent donc être recherchées, afin de pouvoir apprécier les estimations à leur juste valeur et en toute connaissance. Dans cet objectif, des campagnes de mesures ont été régulièrement menées, en vue de contrôler la véracité des prévisions. L'analyse de ces retours d'expérience a mis en évidence plusieurs sources d'erreurs, parmi lesquelles :

- les modèles des équipements 'passifs' du réseau (alternateur, transformateur) ainsi que ceux des convertisseurs sont parfois trop simplifiés et ne fournissent pas une bonne représentation de leur comportement harmonique, en particulier pour les rangs 'élevés' (23, 25),
- la configuration de l'installation prise au moment de l'étude peut être différente lors de la mise en exploitation ; des perturbateurs ou des condensateurs de compensation ont pu être négligés, modifiant localement les niveaux harmoniques estimés,
- les niveaux harmoniques ont souvent tendance à fluctuer dans le temps et il est bien difficile de mesurer et définir un "état harmonique" du réseau, c'est à dire une valeur précise de la tension harmonique sur chaque tableau de distribution et à un même instant,
- les caractéristiques des matériels données par les fournisseurs dans la phase de conception ont pu fortement évoluer lors de leur fabrication et ces informations sont rarement vérifiables, une fois les équipements raccordés,

- la prévision des harmoniques se concentre autour des convertisseurs de forte puissance. En réalité, la présence de charges non linéaires de puissance plus réduite peut également influencer les niveaux harmoniques mesurés. La contribution harmonique de ces perturbateurs est alors plus difficile à évaluer, du fait de leur grand nombre, de leur diffusion dans toute l'installation électrique et de leur différent type (gradateur de lumière, tube fluorescent, téléviseur, ordinateur, alimentation secourue, variateur de vitesse pour l'air conditionné ...).

En résumé, les principales sources d'incertitude viennent du manque de précision concernant le comportement des charges non linéaires et les caractéristiques des équipements du système. Si dans ce dernier cas, nous sommes en grande partie dépendants des fabricants, nous verrons qu'il est possible d'améliorer la représentation du fonctionnement des charges. Il faut cependant noter que cette question sur la précision des données relatives à une installation se pose plus largement à la simulation de tout système physique.

3 LES INTERHARMONIQUES

3.1 Observation

Dans le chapitre précédent, nous nous sommes intéressés aux composantes harmoniques des courants et tensions présents dans un réseau de distribution, c'est-à-dire aux composantes dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence fondamentale du réseau. En observant sur la figure 11, l'allure du courant absorbé par un variateur de vitesse du système de propulsion d'un navire, nous voyons apparaître des déformations de l'onde sinusoïdale :

- identiques et répétitives sur chaque période du courant, ce sont des harmoniques,
- répétitives, mais à des instants différents d'une période à une autre, notamment une variation plus ou moins périodique de l'amplitude du courant.

Ce signal ne contient donc pas exclusivement des composantes harmoniques à des fréquences multiples du fondamental, mais également d'autres composantes venant modifier sa forme d'onde.

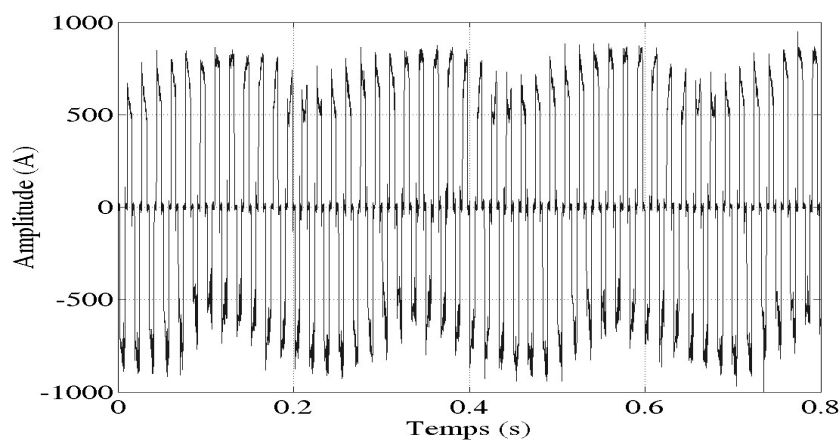


figure 11 : enregistrement temporel sur 0.8s du courant absorbé par un variateur de vitesse du système de propulsion électrique d'un navire ($f_2 = 9.2\text{Hz}$)

Afin de mettre en évidence toutes les composantes fréquentielles contenues dans ce courant, une analyse spectrale basée sur la transformation de Fourier est réalisée. Une telle analyse appliquée sur une période de 4s, fournit sur la figure 12 les amplitudes de toutes les composantes fréquentielles dans une gamme allant de 0.25 Hz à 1000 Hz. Le fondamental (60Hz) et les harmoniques de rangs $6k \pm 1$ sont parfaitement identifiables et correspondent aux harmoniques habituels d'un pont redresseur à diodes ou à thyristors. Par contre, il

apparaît également des raies entre ces harmoniques (dénommées interharmoniques) et des raies à des fréquences inférieures à celle de la tension d'alimentation du réseau électrique (60 Hz). Ces dernières sont communément appelées sous-harmoniques. Leur observation conditionne la durée d'acquisition du signal, pouvant s'étendre de quelques périodes à plusieurs secondes.

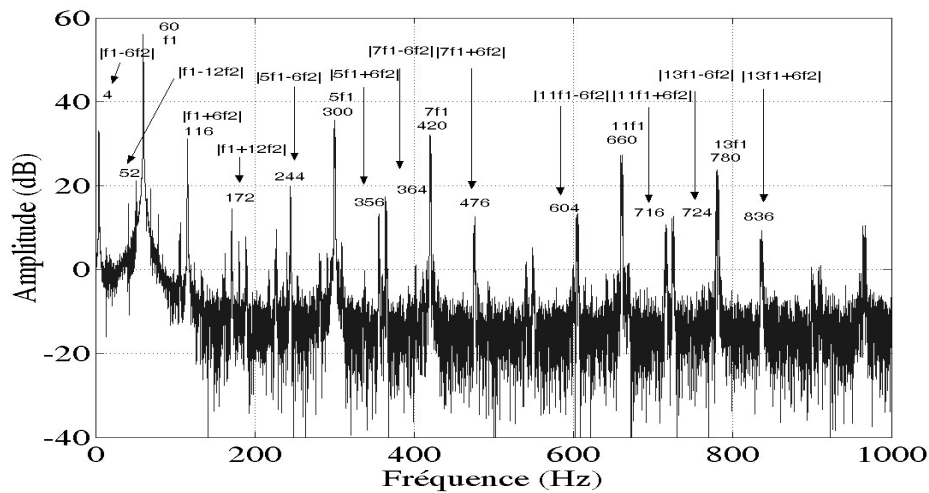


figure 12 : analyse spectrale du courant absorbé par un variateur de vitesse du système de propulsion électrique d'un navire ($f_2 = 9.2\text{Hz}$)

3.2 Identification

En supposant que le signal soit périodique sur la fenêtre temporelle d'observation, celui-ci est parfaitement identifiable par son spectre de raies (spectres d'amplitude et de phase). Comme pour les harmoniques, chaque composante fréquentielle peut être caractérisée par une amplitude, une phase et une fréquence. Selon le type d'étude ou les phénomènes envisagés, le nombre de composantes et la bande de fréquences à considérer pour caractériser le signal doit être en adéquation avec la précision et le but recherché. Dans certains cas, des raies de 'faibles' amplitudes pourront être négligées ou assimilées à du 'bruit'.

Au lieu de caractériser les raies fréquentielles par une amplitude et une phase, il est parfois plus intéressant de déterminer les parties réelles et imaginaires, en particulier lors de la sommation de signaux. Quelle que soit la représentation choisie, chaque composante est pleinement identifiée par trois paramètres. A titre d'exemple, en se limitant aux amplitudes supérieures à 0.5% du fondamental, le Tableau 6 donne une identification fréquentielle du courant de la figure 11, à l'aide de 3×17 paramètres.

Fréquence (Hz)	60	300	420	660	780	4	116	52	172
Origine	f_1	$5f_1$	$7f_1$	$11f_1$	$13f_1$	f_1-6f_2	f_1+6f_2	f_1-12f_2	f_1+12f_2
Courant (A)	640	61	40	23	15	45	36	11	5.4
Fréquence (Hz)	244	356	364	476	604	716	724	836	
Origine	$5f_1-6f_2$	$5f_1+6f_2$	$7f_1-6f_2$	$7f_1+6f_2$	$11f_1-6f_2$	$11f_1+6f_2$	$13f_1-6f_2$	$13f_1+6f_2$	
Courant (A)	10	4.5	7	4.2	4.6	3.2	4.2	3	

Tableau 6 : amplitude des composantes fréquentielles du courant absorbé par un variateur de vitesse du système de propulsion électrique d'un navire ($f_2 = 9.2\text{Hz}$)

3.3 Modélisation

L'identification des courants et tensions 'perturbés' d'un réseau par leurs composantes fréquentielles conduit logiquement à une modélisation sous forme de sources idéales, définies pour chaque fréquence considérée. Les charges non linéaires seront, comme dans le chapitre précédent, représentées par des sources de courant, mais leur fréquence pourra être quelconque et pas obligatoirement un multiple de la fréquence fondamentale. Chaque source sera définie par une fréquence et un couple de paramètres : amplitude - phase ou parties réelle et imaginaire.

La notion de phase suppose qu'une même référence temporelle soit choisie pour toutes les composantes. En soi, cette phase n'a que peu d'utilité, sauf dans le cas où il est nécessaire de reconstruire l'allure temporelle des signaux. Par contre, le déphasage entre composantes de même fréquence est indispensable à l'étude de la propagation des courants à travers l'installation électrique, afin de mettre en évidence les éventuels phénomènes de sommation ou d'annulation pouvant intervenir.

En conservant l'hypothèse d'un réseau constitué d'éléments linéaires, chaque équipement est représenté par une impédance dont les caractéristiques varient avec la fréquence. Les modèles proposés précédemment sont facilement réutilisables dans le cadre de l'étude des interharmoniques. Concernant les sous-harmoniques, une certaine prudence est de mise car le comportement des matériels (ex : transformateur) vis-à-vis des très basses fréquences ($<1\text{Hz}$) a été peu étudié et est donc mal connu. De manière générale, une vigilance certaine doit être apportée au domaine de validité des modèles employés.

3.4 Reproduction

Les remarques formulées sur la simulation temporelle des installations électriques en vue de l'étude des phénomènes harmoniques sont toujours d'actualité. Les difficultés sont même augmentées de par une plage de fréquences d'observation plus large, se répercutant sur le pas de calcul et la durée des simulations. L'analyse des systèmes dans le domaine fréquentiel s'avère alors plus avantageux.

Compte tenu des modélisations adoptées, pour réduire, il faut bien l'avouer, la complexité des systèmes à simuler, le problème est décomposé en deux parties : l'une détermine les courants émis par les charges non linéaires et l'autre traite de la propagation de ces courants à travers le réseau de distribution.

3.4.1 Charge non linéaire

Les trois méthodes vues au précédent chapitre pour calculer les courants harmoniques sont également applicables pour déterminer les interharmoniques injectés par les charges non linéaires. Quelques précautions ou développements supplémentaires sont néanmoins nécessaires.

3.4.1.1 Mesures

Dans l'hypothèse où l'installation est disponible et fonctionne dans la configuration souhaitée, la mesure des courants absorbés par la ou les charges non linéaires est tout à fait envisageable. Les composantes fréquentielles sont obtenues soit directement avec l'usage d'un analyseur de spectre, soit indirectement après enregistrement des grandeurs temporelles et traitement ultérieur par FFT. Une attention toute particulière doit être portée à la bande passante de toute la chaîne de mesure, capteurs compris. En effet, la classe de précision des transformateurs de tension ou de courant placés dans les tableaux de distribution est indiquée pour la fréquence fondamentale du réseau. Aucune information (ou peu) n'est fournie pour les autres fréquences.

Toutes les restrictions déjà formulées pour cette méthode sont bien évidemment applicables dans le cadre de la recherche des interharmoniques.

3.4.1.2 Simulation numérique

A partir de la simulation temporelle des courants de ligne absorbés par un convertisseur de puissance il est aisé d'en obtenir un spectre fréquentiel, à l'aide d'un algorithme de transformation de Fourier rapide (FFT).

La modélisation du convertisseur doit alors être convenablement choisie afin de permettre la reproduction des phénomènes recherchés. Il faudrait notamment prendre en compte les composants pouvant induire des résonances à des fréquences particulières ou encore les boucles de régulation avec leur fréquence propre.

La simulation d'un convertisseur associé à sa charge doit s'effectuer sur une durée suffisamment grande pour observer le régime permanent des courants, y compris vis-à-vis des basses ou très basses fréquences. Selon le dispositif à étudier, cela peut rapidement engendrer des temps de calcul prohibitifs et il est alors souhaitable d'inclure au programme de simulation un algorithme de recherche du régime permanent.

D'autre part, la simulation repose sur la résolution d'équations différentielles à chaque pas de calcul, conduisant à un échantillonnage des grandeurs électriques. Cet échantillonnage à pas fixe ou variable des signaux ne doit pas interférer avec les composantes fréquentielles recherchées. Dans le même ordre d'idée, l'association de certains composants (exemple : plusieurs inductances en série) conduit parfois à créer une instabilité numérique ou 'boucle algébrique' générant des oscillations parfaitement fictives sur les signaux. Il peut alors s'avérer bien difficile de distinguer les perturbations réelles liées au fonctionnement du convertisseur, des phénomènes induits par un défaut du simulateur. Si la simulation numérique des convertisseurs de puissance est un outil possible et performant pour la détermination des composantes fréquentielles des grandeurs électriques, cet outil est à manipuler avec prudence et rigueur.

3.4.1.3 Calcul analytique

Si la simulation numérique permet de reproduire les harmoniques et les interharmoniques générés par une charge non linéaire, elle ne permet pas d'en analyser la provenance, ni d'en distinguer les contributions issues de phénomènes différents. Par exemple, l'amplitude d'une composante à 5 fois la fréquence fondamentale peut résulter de la combinaison d'un harmonique de rang 5 et d'un harmonique non caractéristique à cette même fréquence. Ce type d'information ne peut être donnée que par une analyse fine du fonctionnement des

convertisseurs et des interactions existant entre les diverses grandeurs électriques. Pour ce faire, la technique la plus couramment employée repose sur la modulation de fréquences de signaux.

Afin d'illustrer cette méthode, considérons un système de propulsion électrique d'un navire et la structure classique de son convertisseur de puissance, tel que le propose la figure 13. En considérant un fonctionnement idéal des montages redresseurs et onduleurs (semi-conducteurs parfaits, empiètement négligé...), le comportement de chaque bras des convertisseurs est modélisé par une fonction de commutation $S(t)$ dont la forme est donnée sur la figure 14. En associant à chaque bras une fonction de commutation adaptée, il est permis d'écrire les relations générales entre les grandeurs électriques d'entrée et de sortie d'un convertisseur [Pelly_71].

Compte tenu de la forme de ces fonctions, leur décomposition en série de Fourier aboutit aux relations (4) pour la première phase 'a' d'alimentation du pont et dans le cas idéal de la figure 14 .

$$S_{a,1}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \cos[n \cdot \omega_1 \cdot t - n\alpha] \quad (4)$$

$$S_{a,1}(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cdot \left(\cos[\omega_1 \cdot t - \alpha] - \frac{1}{5} \cdot \cos[5 \cdot \omega_1 \cdot t - 5\alpha] + \frac{1}{7} \cdot \cos[7 \cdot \omega_1 \cdot t - 7\alpha] + \dots \right)$$

où α désigne l'angle de commande du pont redresseur.

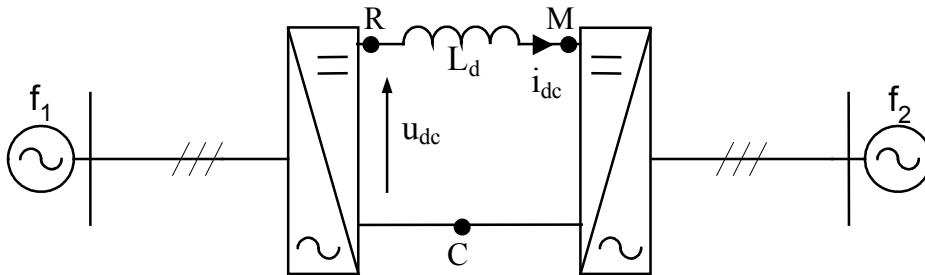


figure 13 : structure de principe d'un convertisseur de propulsion

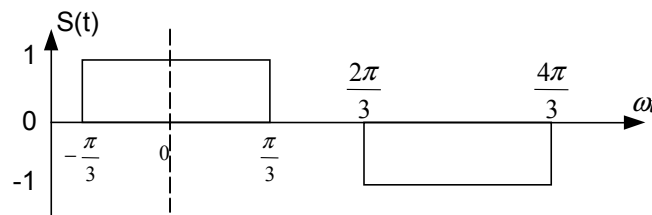


figure 14 : fonction de commutation idéale d'un pont redresseur ou onduleur de courant

Selon les phénomènes pris en considération pour l'étude du convertisseur (empiètement, déséquilibre de tension ou d'impédance de phase...), les allures de ces fonctions de commutation vont être différentes [Hu_92][Sakui_92][Cano_01] mais toujours périodiques, modifiant alors les caractéristiques de leur décomposition en série de Fourier. Pour notre exemple, nous nous limiterons à l'étude d'un cas idéalisé, qui sera néanmoins suffisant pour mettre en évidence les principales interactions pouvant intervenir entre un réseau d'alimentation, un convertisseur et une machine.

A l'aide de ces fonctions de commutation, il est possible d'exprimer la tension redressée à partir des tensions simples de l'alimentation (v_{an} , v_{bn} , v_{cn}) :

$$u_{dc}(t) = v_{an}(t) \cdot S_{a,1}(t) + v_{bn}(t) \cdot S_{b,1}(t) + v_{cn}(t) \cdot S_{c,1}(t) \quad (5)$$

Les courants dans chaque phase (a, b, c) de l'alimentation se déduisent du courant redressé :

$$i_{a,1}(t) = i_{dc}(t) \cdot S_{a,1}(t) \quad , \quad i_{b,1}(t) = i_{dc}(t) \cdot S_{b,1}(t) \quad , \quad i_{c,1}(t) = i_{dc}(t) \cdot S_{c,1}(t) \quad (6)$$

Le fonctionnement du commutateur de courant étant semblable à celui du pont redresseur, les courants dans la machine s'expriment par des relations similaires :

$$i_{a,2}(t) = i_{dc}(t) \cdot S_{a,2}(t) \quad , \quad i_{b,2}(t) = i_{dc}(t) \cdot S_{b,2}(t) \quad , \quad i_{c,2}(t) = i_{dc}(t) \cdot S_{c,2}(t) \quad (7)$$

Le produit des grandeurs électriques par ces fonctions de commutation traduit une modulation de fréquence des signaux entre eux, d'où le terme de théorie de modulation adopté par de nombreux auteurs [Hu_97] pour analyser les convertisseurs par cette technique.

D'après les expressions (6) et (7), les courants de ligne coté réseau et coté machine sont parfaitement définis lorsque le courant dans l'étage continu est lui même déterminé. Vu de l'étage continu, l'ensemble réseau-convertisseur-machine peut être schématisé par la figure 15 . Le redresseur et le réseau peuvent être considérés comme un générateur de Thévenin dont la f.é.m. serait donnée par l'expression (5) et l'impédance serait fonction des impédances du réseau. Le commutateur de courant alimente obligatoirement une charge de type tension. Dans le cas présent, il s'agit d'une machine synchrone dont les f.é.m. imposent l'auto-pilotage du commutateur. Le commutateur et la machine sont alors assimilables à un générateur de Thévenin équivalent, en considérant la tension redressée issue des f.é.m. de la machine.

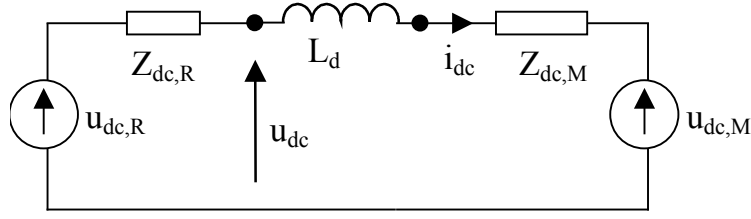


figure 15 : schéma équivalent du convertisseur vu de l'étage continu

Compte tenu de cette modélisation, l'ensemble du montage vu de l'étage continu est alors schématisé (figure 15) par deux sources de tension de composantes fréquentielles différentes. Le courant résultant $i_{dc}(t)$ peut alors s'exprimer d'une manière générale selon l'équation (8) :

$$i_{dc}(t) = I_d + \sum_{n=0}^{\infty} I_{6n} \cos(6n\omega_1 + \varphi_{6n}) + \sum_{p=0}^{\infty} I_{6p} \cos(6p\omega_2 + \phi_{6p}) \quad (8)$$

Le courant de l'étage continu étant déterminé, les équations (6) associées aux fonctions de commutation (4) fournissent l'expression générale (9) du courant dans chaque phase du réseau d'alimentation.

$$\begin{aligned} i_{a,1}(t) = & I_d \cdot \sum_{k=0}^{\infty} A_{6k\pm1} \cdot \cos[(6k\pm1) \cdot (\omega_1 \cdot t - \alpha)] \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} I_{6n} \cdot \sum_{k=0}^{\infty} A_{6k\pm1} \cdot \cos[(6k\pm1) \cdot (\omega_1 \cdot t - \alpha)] \cdot \cos[6n\omega_1 \cdot t + \varphi_{6n}] \\ & + \sum_{p=0}^{\infty} \left[I_{6p} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{A_{6k\pm1}}{2} \left(\cos[((6k\pm1)\omega_1 - 6p\omega_2) \cdot t - (6k\pm1)\alpha - \varphi_{6p}] \right. \right. \\ & \left. \left. + \cos[((6k\pm1)\omega_1 + 6p\omega_2) \cdot t - (6k\pm1)\alpha + \varphi_{6p}] \right) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

Cette équation indique la présence de nombreuses contributions fréquentielles :

- la composante fondamentale du réseau et ses harmoniques de pulsation $(6k\pm1) \cdot \omega_1$, correspondant au spectre habituel d'un pont redresseur,
- des harmoniques non caractéristiques provenant d'une ondulation à $(6n\omega_1)$ sur l'étage continu et se confondant avec les harmoniques 'classiques',
- des interharmoniques $(6k\pm1) \cdot \omega_1 \pm 6p \cdot \omega_2$, dus aux ondulations sur l'étage continu, mais générées par le commutateur de courant et la machine.

Ces interharmoniques se retrouvent par paire autour du fondamental et autour de chaque harmonique. Selon la valeur de ω_2 , il faut noter que ces interharmoniques peuvent apparaître à n'importe quelle fréquence. Notamment, dans le cas où $\omega_1 = 6 \cdot \omega_2$, ils interagissent avec la fréquence fondamentale et ses harmoniques. Une composante continue est même susceptible d'être générée.

Compte tenu des hypothèses simplificatrices utilisées, de nombreux paramètres tels que les impédances de source, l'impédance durant les commutations, la forme de la tension d'alimentation... n'ont pas été considérés. Les amplitudes des courants ainsi obtenues sont donc susceptibles de présenter une incertitude non négligeable par rapport au montage réel. Néanmoins, à partir de l'équation (9), les composantes fréquentielles des sources de courants équivalentes au convertisseur de puissance sont parfaitement déterminées.

3.4.2 Réseau

L'analyse de la propagation de toutes les composantes fréquentielles des courants dans un réseau peut avoir plusieurs objectifs. Dans un cadre général, le but est de calculer les courants dans toutes les branches du réseau et les tensions résultantes en chaque noeud. Pour des besoins plus réduits comme la recherche des interharmoniques produits par un système de propulsion de navire, un calcul analytique reste envisageable.

3.4.2.1 Cas Général

Les interharmoniques de courant injectés par les charges non linéaires dans le réseau sont supposés déterminés par une des précédentes méthodes. Leur propagation à travers toutes les impédances du réseau et les tensions résultantes sont calculées en résolvant le système d'équations (10) :

$$[I_f] = [Y_f].[V_f] \quad (10)$$

où pour chaque fréquence f :

- I_f est le vecteur injection de courant, obtenu à partir de l'étude des charges selon les méthodes précédemment proposées,
- Y_f est la matrice admittance du réseau déduite des impédances de chaque élément le constituant,
- U_f est le vecteur tension en chaque noeud du réseau.

D'un point de vue numérique, la résolution d'un tel système ne pose pas de difficulté particulière *a priori*, pour des réseaux à faible puissance de court-circuit dont la taille et le nombre d'éléments sont ou peuvent être réduits. En revanche, la mise en équation du système et sa résolution doivent être effectués pour chaque composante fréquentielle à analyser. Celles-ci sont plus nombreuses que les seuls harmoniques et augmentent ainsi le volume des calculs. Cependant, ces calculs peuvent être parfois conduits uniquement sur la ou les

fréquences susceptibles de créer de graves perturbations (résonance ou anti-résonance), réduisant alors la complexité des études.

3.4.2.2 Cas particulier

Sur des installations particulières et de petite dimension, il est envisageable de traiter la propagation des courants de manière analytique. Il s'agit alors de déterminer les déphasages entre les courants provenant de plusieurs charges et d'en déduire les courants résultants puis les tensions.

Ce type d'étude a pu être conduite sur des systèmes complets de propulsion électrique de navire [Bourguet_03][Bourguet_04A]. L'un des avantages est alors d'analyser et de bien comprendre les origines de ces courants interharmoniques, leurs chemins de propagation et les phénomènes de sommation ou d'annulation qui peuvent apparaître.

3.5 Prévision

Dans une optique de prévision des perturbations conduites basses fréquences, il semble opportun de mettre en oeuvre les précédents outils d'analyse et de reproduction des interharmoniques proposés. Pour juger de leur performance ou de discuter de leurs avantages et inconvénients, il est nécessaire de disposer de résultats expérimentaux afin de les confronter aux estimations pouvant être fournies par ces outils. Compte tenu des campagnes de mesures réalisées, l'étude prévisionnelle portera sur les interharmoniques générés par le dispositif de propulsion de navire, schématisé sur la figure 16.

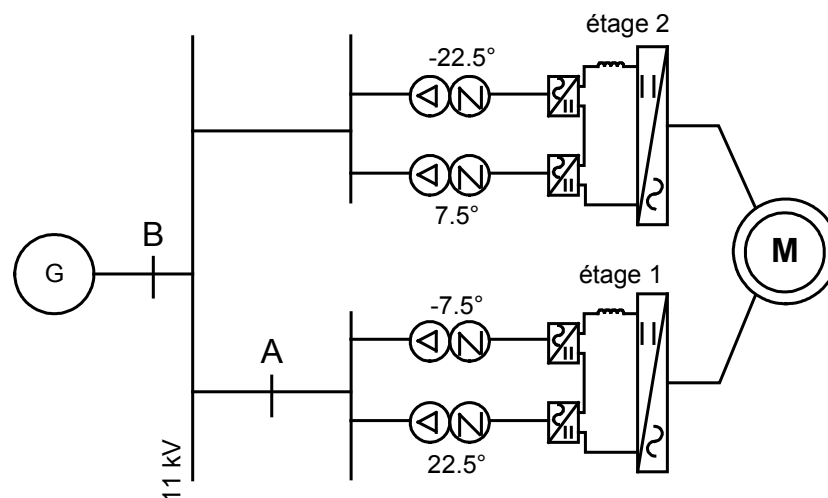


figure 16 : schéma unifilaire de l'alimentation d'un moteur électrique de propulsion

En supposant que la structure soit parfaitement équilibrée, que les 2 convertisseurs de puissance soient rigoureusement identiques et possèdent le même régime de fonctionnement, les expressions (9) définissent les harmoniques et interharmoniques contenus dans les courants de ligne à l'entrée des ponts redresseurs. Pour un angle de commande nul, le Tableau 7 récapitule ces résultats en précisant les amplitudes et les phases pour les principales composantes.

Compte tenu des indices horaires des transformateurs de propulsion, ces derniers introduisent des déphasages supplémentaires sur chaque composante fréquentielle des courants. Une étude particulière prenant en considération ces déphasages [Bourguet_04B] fournit les caractéristiques du Tableau 8 relatives aux courants primaires des transformateurs.

L'observation de ces courants dans les quatre transformateurs montrent que les composantes de pulsation $(12k \pm 1)\omega_1$ et $(12k \pm 1)\omega_1 \pm 6\omega_2$ possèdent une phase identique, alors que d'autres, $(6k \pm 1)\omega_1$, $(6k \pm 1)\omega_1 \pm 6\omega_2$, se retrouvent en opposition de phase. Ces prévisions sont confirmées par les mesures de la figure 17 effectuées à bord. Si les résultats concernant les harmoniques étaient attendus, cette étude explique clairement les phénomènes de sommation ou d'annulation apparaissant lors de la propagation des courants dans ce réseau, autant pour les harmoniques que pour les interharmoniques.

Pulsation ω	Phase (°)				Amplitude du courant
	étage 1		étage 2		
	$\delta = 22.5^\circ$	$\delta = -7.5^\circ$	$\delta = 7.5^\circ$	$\delta = -22.5^\circ$	
ω_1	22.5	-7.5	7.5	-22.5	$I_d A_1$
$5\omega_1$	112.5	-37.5	37.5	-112.5	$I_d A_5$
$7\omega_1$	157.5	-52.5	52.5	-157.5	$I_d A_7$
$11\omega_1$	-112.5	-82.5	82.5	112.5	$I_d A_{11}$
$13\omega_1$	-67.5	-97.5	97.5	67.5	$I_d A_{13}$
$\omega_1 \pm 6\omega_2$	$22.5 \pm \phi_6$	$-7.5 \pm \phi_6$	$-172.5 \pm \phi_6$	$157.5 \pm \phi_6$	$I_6 A_1 / 2$
$5\omega_1 \pm 6\omega_2$	$112.5 \pm \phi_6$	$-37.5 \pm \phi_6$	$-142.5 \pm \phi_6$	$67.5 \pm \phi_6$	$I_6 A_5 / 2$
$7\omega_1 \pm 6\omega_2$	$157.5 \pm \phi_6$	$-52.5 \pm \phi_6$	$-127.5 \pm \phi_6$	$22.5 \pm \phi_6$	$I_6 A_7 / 2$
$11\omega_1 \pm 6\omega_2$	$-112.5 \pm \phi_6$	$-82.5 \pm \phi_6$	$-97.5 \pm \phi_6$	$-67.5 \pm \phi_6$	$I_6 A_{11} / 2$
$13\omega_1 \pm 6\omega_2$	$-67.5 \pm \phi_6$	$-97.5 \pm \phi_6$	$-82.5 \pm \phi_6$	$-112.5 \pm \phi_6$	$I_6 A_{13} / 2$
$\omega_1 \pm 12\omega_2$	$22.5 \pm \phi_{12}$	$-7.5 \pm \phi_{12}$	$7.5 \pm \phi_{12}$	$-22.5 \pm \phi_{12}$	$I_{12} A_1 / 2$
$5\omega_1 \pm 12\omega_2$	$112.5 \pm \phi_{12}$	$-37.5 \pm \phi_{12}$	$37.5 \pm \phi_{12}$	$-112.5 \pm \phi_{12}$	$I_{12} A_5 / 2$
$7\omega_1 \pm 12\omega_2$	$157.5 \pm \phi_{12}$	$-52.5 \pm \phi_{12}$	$52.5 \pm \phi_{12}$	$-157.5 \pm \phi_{12}$	$I_{12} A_7 / 2$
$11\omega_1 \pm 12\omega_2$	$-112.5 \pm \phi_{12}$	$-82.5 \pm \phi_{12}$	$82.5 \pm \phi_{12}$	$112.5 \pm \phi_{12}$	$I_{12} A_{11} / 2$
$13\omega_1 \pm 12\omega_2$	$-67.5 \pm \phi_{12}$	$-97.5 \pm \phi_{12}$	$97.5 \pm \phi_{12}$	$67.5 \pm \phi_{12}$	$I_{12} A_{13} / 2$

Tableau 7 : amplitudes et phases des courants harmoniques et interharmoniques dans les secondaires de chaque transformateur de propulsion ; $k=0,1,2$ et $p=1,2$

Pulsation ω	Phase (°)				Amplitude du courant
	étage 1		étage 2		
	$\delta = 22.5^\circ$	$\delta = -7.5^\circ$	$\delta = -22.5^\circ$	$\delta = 7.5^\circ$	
ω_1	0	0	0	0	$MI_d A_1$
$5\omega_1$	135	-45	-135	45	$MI_d A_5$
$7\omega_1$	135	-45	-135	45	$MI_d A_7$
$11\omega_1$	-90	-90	90	90	$MI_d A_{11}$
$13\omega_1$	-90	-90	90	90	$MI_d A_{13}$
$\omega_1 \pm 6\omega_2$	$0 \pm \phi_6$	$0 \pm \phi_6$	$180 \pm \phi_6$	$180 \pm \phi_6$	$MI_6 A_1 / 2$
$5\omega_1 \pm 6\omega_2$	$135 \pm \phi_6$	$-45 \pm \phi_6$	$45 \pm \phi_6$	$-135 \pm \phi_6$	$MI_6 A_5 / 2$
$7\omega_1 \pm 6\omega_2$	$135 \pm \phi_6$	$-45 \pm \phi_6$	$45 \pm \phi_6$	$-135 \pm \phi_6$	$MI_6 A_7 / 2$
$11\omega_1 \pm 6\omega_2$	$-90 \pm \phi_6$	$-90 \pm \phi_6$	$-90 \pm \phi_6$	$-90 \pm \phi_6$	$MI_6 A_{11} / 2$
$13\omega_1 \pm 6\omega_2$	$-90 \pm \phi_6$	$-90 \pm \phi_6$	$-90 \pm \phi_6$	$-90 \pm \phi_6$	$MI_6 A_{13} / 2$
$\omega_1 \pm 12\omega_2$	$0 \pm \phi_{12}$	$0 \pm \phi_{12}$	$0 \pm \phi_{12}$	$0 \pm \phi_{12}$	$MI_{12} A_1 / 2$
$5\omega_1 \pm 12\omega_2$	$135 \pm \phi_{12}$	$-45 \pm \phi_{12}$	$-135 \pm \phi_{12}$	$45 \pm \phi_{12}$	$MI_{12} A_5 / 2$
$7\omega_1 \pm 12\omega_2$	$135 \pm \phi_{12}$	$-45 \pm \phi_{12}$	$-135 \pm \phi_{12}$	$45 \pm \phi_{12}$	$MI_{12} A_7 / 2$
$11\omega_1 \pm 12\omega_2$	$-90 \pm \phi_{12}$	$-90 \pm \phi_{12}$	$90 \pm \phi_{12}$	$90 \pm \phi_{12}$	$MI_{12} A_{11} / 2$
$13\omega_1 \pm 12\omega_2$	$-90 \pm \phi_{12}$	$-90 \pm \phi_{12}$	$90 \pm \phi_{12}$	$90 \pm \phi_{12}$	$MI_{12} A_{13} / 2$

Tableau 8 : amplitudes et phases des courants harmoniques et interharmoniques dans les primaires de chaque transformateur de propulsion

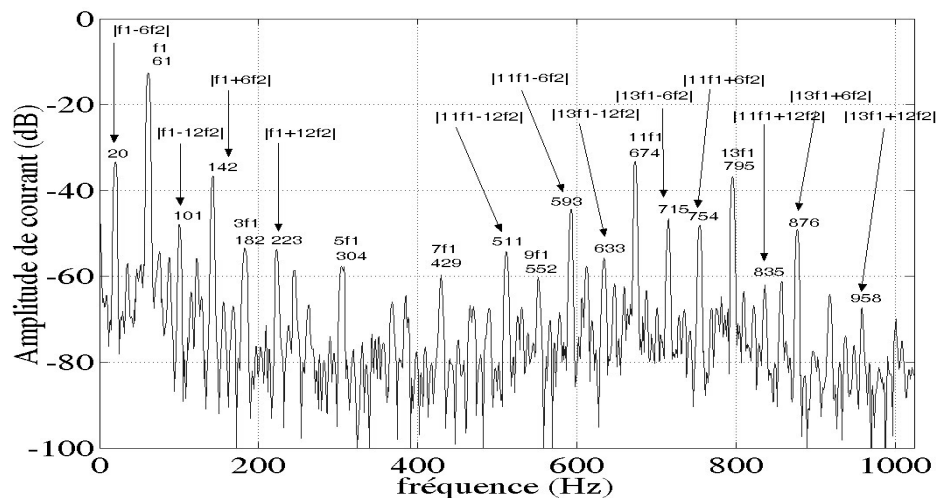


figure 17 : spectre du courant dans une phase d'un départ $\frac{1}{2}$ -moteur en amont de deux transformateurs de propulsion (point A), $f_2=13.33$ Hz (0 dB = 1400 A)

A partir du Tableau 8, il est également possible de prévoir les courants susceptibles d'être injectés au niveau des tableaux 11kV et donc partiellement dans les alternateurs. L'alimentation complète d'un moteur forme une structure équivalente à un montage redresseur à 24 pulsations afin d'éliminer les premiers rangs harmoniques. Théoriquement, il ne devrait subsister que les rangs $(24k \pm 1)$, ce qui est vérifié expérimentalement. Comme l'estimation le

prévoyait, les harmoniques $(12k \pm 1)\omega_1$ et les interharmoniques $(12k \pm 1)\omega_1 \pm 12\omega_2$ s'annulent, pour ne laisser que les interharmoniques $(12k \pm 1)\omega_1 \pm 6\omega_2$ et dans une moindre mesure les composantes à $(\omega_1 \pm 12\omega_2)$. Il faut remarquer que ces courants interharmoniques se propagent à travers les impédances du réseau et créent des tensions résultantes parfaitement visibles sur la figure 18 et à des amplitudes semblables à celles des harmoniques.

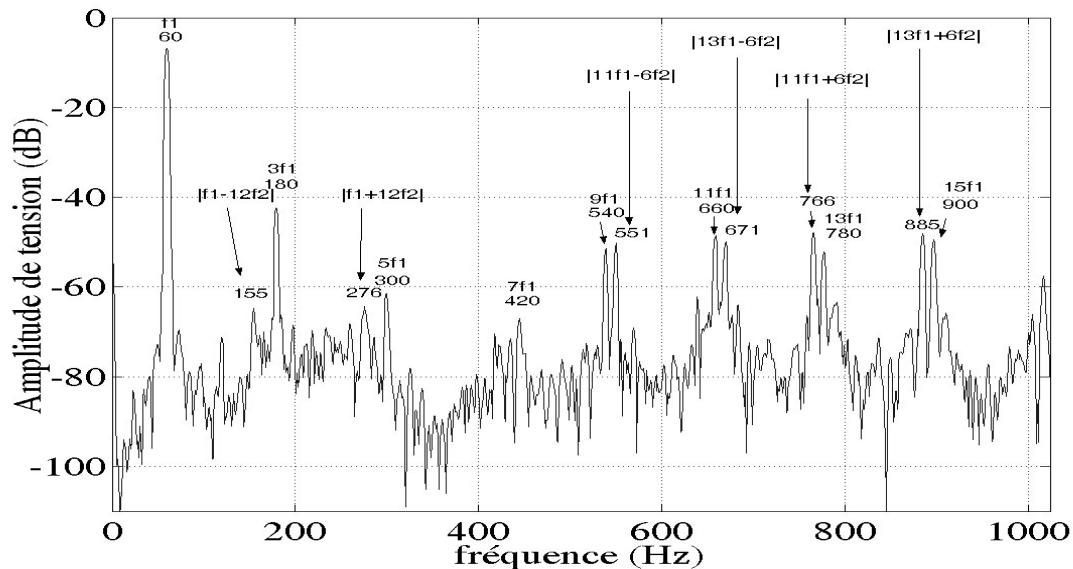


figure 18 : spectre de la tension 11 kV lors de la mesure du courant dans le générateur, $f_2=18.1$ Hz (0 dB = 20 kV)

A l'aide de cet exemple de système de propulsion, nous avons pu démontrer que les harmoniques et interharmoniques produits par des charges peuvent être prévus précisément ainsi que leur propagation dans le réseau. Cependant, il n'aura pas échappé au lecteur que les estimations précédentes ne portaient que sur les pulsations ou les fréquences et nullement sur les amplitudes. En effet, ne disposant pas des caractéristiques de l'installation (impédance réseau, angle de commande, inductance de lissage, paramètres de la machine...), il n'était pas possible d'évaluer les valeurs des courants dans la machine ou dans l'étage continu des convertisseurs. Pour ces mêmes raisons, la simulation numérique n'a pu être employée pour cette étude.

Néanmoins, en l'absence de toute information chiffrée sur le système, les fréquences des différentes composantes des courants ont été déterminées grâce à la méthode utilisée qui repose uniquement sur l'analyse du fonctionnement des convertisseurs à l'aide de fonctions de commutation.

3.6 Conclusion

L'association d'un réseau d'alimentation, d'un convertisseur et d'une machine tournante forme un ensemble de deux systèmes électriques de fréquences distinctes, au même titre que certaines liaisons de transport d'énergie (ex : HVDC). Le ou les convertisseurs de puissance assurent alors le transfert d'énergie entre ces deux systèmes. Cependant, leur couplage entraîne des interactions de l'un sur l'autre, d'où l'apparition de fréquences interharmoniques.

Dans le cas des variateurs de vitesse, ces fréquences correspondent à une modulation des harmoniques du réseau d'alimentation (fondamental inclus) par la fréquence de pilotage de la machine. Celle-ci étant par définition variable, les interharmoniques peuvent apparaître dans toute la gamme des basses fréquences (de 0Hz à quelques kHz), y compris avec des structures à onduleur MLI de tension [Bourguet_04C].

Du point de vue du réseau, ces interharmoniques peuvent être traités de la même manière que les harmoniques, c'est à dire fréquence par fréquence avec des modélisations semblables mais adaptées au domaine fréquentiel d'étude. Ces interharmoniques générés par les convertisseurs peuvent être perçus comme une injection de courants particuliers dans le réseau d'alimentation. Néanmoins, la détermination de ces courants devient plus complexe, leur fréquence n'étant pas connue *a priori*. Il n'existe plus de formules empiriques basées sur des formes d'ondes caractéristiques pour effectuer les calculs rapidement.

Deux méthodes ont été proposées pour reproduire et prévoir les interharmoniques produits par des convertisseurs de propulsion de navire. Celles-ci s'étendent alors à tout système de variation de vitesse. La simulation numérique est là encore un outil intéressant mais il est nécessaire d'être particulièrement vigilant sur le choix des modèles et des paramètres de simulation (durée, pas de calcul...), afin de mettre en évidence les perturbations fréquentielles réellement générées par le montage, sans en créer artificiellement par le biais du simulateur.

L'analyse du fonctionnement des convertisseurs à l'aide de fonctions de commutation permet également de prévoir toutes les composantes fréquentielles susceptibles d'apparaître dans les courants d'alimentation et de sortie des convertisseurs. De plus, cette méthode fournit une description de l'origine du phénomène ayant produit un interharmonique donné. Les exemples de ce chapitre ont montré que l'usage de fonctions de commutation simples ne donnait qu'un ordre de grandeur sur l'amplitude de ces perturbations. Pour obtenir des évaluations plus détaillées, il serait nécessaire d'employer des fonctions plus complexes traduisant de manière

plus réaliste l'évolution des grandeurs électriques durant les phases de commutation (ex : empiètement). Par contre, quel que soit le modèle choisi, les fréquences sont parfaitement déterminées, même en l'absence d'informations sur les caractéristiques des équipements. Cet aspect de la méthode lui confère un avantage important dans le cadre d'études prévisionnelles au premier stade d'un projet.

Indépendamment des méthodes et modèles employés, les remarques formulées lors de la prévision des harmoniques sur les incertitudes inhérentes aux paramètres des systèmes électriques sont malheureusement encore applicables aux cas des interharmoniques. Il est même possible de les compléter par quelques commentaires supplémentaires :

a) pour un entraînement à vitesse variable, le régime de fonctionnement est rarement constant et celui-ci peut être considéré comme continûment variable. Cela sous-entend que la puissance mais également la fréquence de pilotage évoluent dans le temps. De fait, l'amplitude, la phase mais surtout les fréquences des interharmoniques générés vont également varier continûment.

b) la précédente analyse des convertisseurs a supposé un régime de fonctionnement établi et figé, sans tenir compte de l'existence de boucles de régulation. Or, celles-ci vont modifier les instants de commutation des semi-conducteurs et ainsi influencer les phases et les amplitudes des interharmoniques.

Il semble alors illusoire d'espérer obtenir une grande précision sur les estimations des grandeurs harmoniques et interharmoniques simplement en augmentant la complexité des modèles. Un compromis doit être alors recherché entre précision et complexité selon les objectifs fixés et les contraintes liées à l'installation réelle.

2^{eme} Partie :

Approche Stochastique des Perturbations

4 COMPORTEMENT ALEATOIRE

L'étude des perturbations proposée dans la partie précédente s'appuie sur une approche déterministe qui suppose connu et figé le point de fonctionnement de toutes les charges du réseau. La méthode présente l'avantage d'être relativement simple de mise en œuvre et rapide en temps de calcul, mais possède toutefois quelques inconvénients qui méritent d'être explicités.

4.1 Observation

Utilisés pour faire varier le régime de fonctionnement de la charge (moteur à vitesse variable, gradateur de lumière ...), les convertisseurs de puissance s'insèrent à l'intérieur d'une chaîne de contrôle, où des boucles de régulation interviennent. Les courants harmoniques résultants sont alors liés, plus ou moins fortement, à un ensemble de paramètres, parmi lesquels les signaux de commande, eux-mêmes fonction de l'évolution de la puissance de la charge dans le temps. Par exemple, l'examen d'un enregistrement de la valeur efficace du courant absorbé par un variateur de vitesse d'un système de propulsion de navire montre sur la figure 19a) de fortes variations de puissance au cours du temps, lesquelles ont un impact direct sur les courants harmoniques injectés sur le réseau (figure 19b).

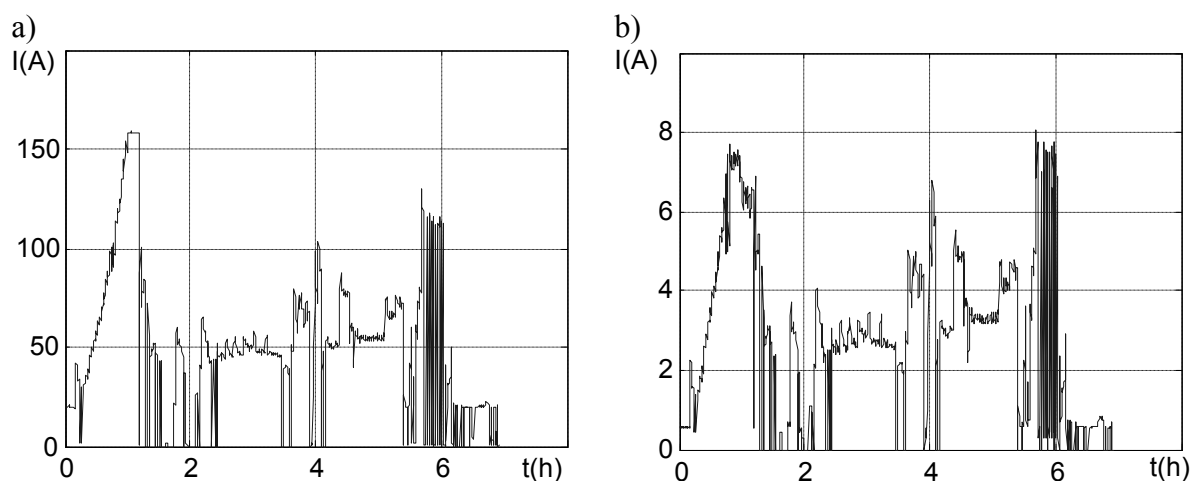


figure 19 : courant efficace absorbé par un convertisseur de propulsion de navire en fonction du temps : a) fondamental ; b) harmonique de rang 13

De même, les harmoniques de la tension délivrée par un réseau de distribution résultent principalement du foisonnement des courants produits par une multitude de charges non linéaires raccordées à ce réseau. La figure 20 présente un relevé de la tension d'alimentation d'un hypermarché sur 24H. Le fondamental subit des fluctuations liées aux chutes de tension créées par les courants d'appel des divers consommateurs et aux actions des dispositifs de régulation de la tension sur le réseau. Les harmoniques (figure 20b) montrent également des variations, qui ne semblent pas nécessairement corrélées à celles du fondamental. En revanche, elles sont liées au fonctionnement des charges non linéaires et à leur injection de courants harmoniques dans le réseau de distribution. L'augmentation de l'harmonique de rang 5 au voisinage de 20H pourrait correspondre à un usage accru des appareils électrodomestiques [Bieth_92].

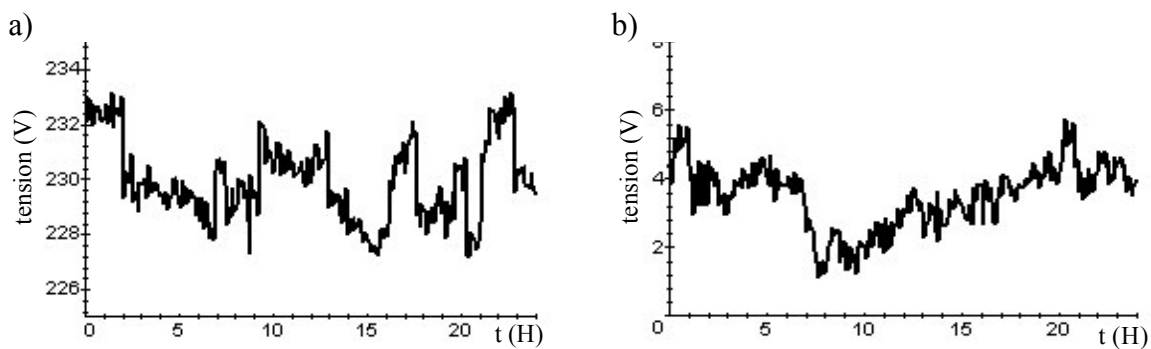


figure 20: évolution de la tension efficace d'alimentation d'un hypermarché sur 24H

a) fondamental ; b) harmonique de rang 5

4.2 Identification

L'observation et l'analyse du fonctionnement des convertisseurs de puissance ainsi que celles des harmoniques présents sur un réseau de distribution amènent à la conclusion que les perturbations harmoniques ont un comportement très variable et potentiellement imprévisible. Dans ce cas, l'utilisation d'une méthode classique déterministe ne serait pas très représentative pour une description des harmoniques réels. Face à ce type de problème, des méthodes particulières doivent être élaborées pour tenir compte de leur comportement fluctuant et non prévisible [Kniel_74][Baghzouz_87].

Les harmoniques et interharmoniques sur un réseau de distribution sont le fruit de plusieurs phénomènes où un grand nombre de paramètres intervient de manière plus ou moins indépendante. Si ces paramètres sont modifiés par le hasard, il est alors possible de formuler

l'hypothèse selon laquelle les perturbations des réseaux sont le résultat de phénomènes soit totalement soit partiellement aléatoires.

L'examen d'un grand nombre de phénomènes aléatoires montre que ceux-ci sont généralement décrits par des lois déterminées. Ces lois spécifiques, dites statistiques, représentent le comportement de l'ensemble. Elles sont alors pratiquement indépendantes des spécificités individuelles de chaque phénomène. Globalement, ces particularités se compensent, aboutissant alors à un résultat moyen, dont l'aspect aléatoire a quasiment disparu. C'est cette 'stabilité', vérifiée par l'expérience, qui permet l'utilisation de méthodes statistiques ou probabilistes dans l'étude des phénomènes physiques.

Pour illustrer ces propos, considérons l'exemple du tir sur une cible [Ventsel_73]. Pour un faible nombre de coups, la disposition des points sur la cible paraît désordonnée. Pour un nombre important, la répartition des points devient symétrique par rapport à un point central. La densité des points décroît du centre vers l'extérieur selon une loi parfaitement déterminée (ici une loi normale). Ce résultat est pratiquement indépendant des facteurs aléatoires pouvant intervenir dans un seul tir.

En considérant que les perturbations harmoniques sont le résultat de phénomènes en partie aléatoires, la méthode consiste à représenter les grandeurs harmoniques non plus par une valeur unique, comme l'envisage l'approche déterministe, mais par des lois de probabilité, permettant de caractériser le niveau des harmoniques par une amplitude non dépassée suivant une probabilité donnée. De cette façon, par la prise en compte des différents phénomènes de foisonnement susceptibles d'intervenir (déphasage des courants, régimes de fonctionnement variables ...), une image plus réaliste du niveau harmonique peut être apportée. L'objectif de l'approche stochastique repose alors sur l'identification d'un comportement général des harmoniques, où la notion d'aléatoire disparaît.

A partir des relevés expérimentaux effectués périodiquement sur un intervalle de temps donné, il est possible de déterminer les paramètres statistiques de ces échantillons, tels que la moyenne et l'écart quadratique moyen. Ceux-ci peuvent aider à l'interprétation des mesures en dégagant des caractéristiques propres à certaines charges ou en mettant en évidence une corrélation entre les harmoniques produits et l'apparition de phénomènes particuliers. Par exemple, les mesures réalisées sur des postes de transformation des réseaux de distribution indiquent clairement le rôle joué par les équipements électro-domestiques sur le niveau harmonique global, à certaines heures de la journée [Emanuel_93][Letzelter_96]. De même, sur des sites particuliers, comme un immeuble de bureaux ou un hypermarché, la corrélation

entre l'allumage des éclairages fluorescents et l'amplitude des harmoniques de rang 3 et 5 est clairement démontrée [Emanuel_91][Guerin_02C].

La détermination des paramètres statistiques peut être étendue à l'identification des lois régissant la dispersion des harmoniques. Dans ce but, les échantillons de mesures tels que ceux de la figure 19b, sont rassemblés sous la forme d'histogrammes des effectifs ou des fréquences (figure 21). Le choix des intervalles de groupement (ou classes) et de leur nombre influence beaucoup l'allure générale de ces histogrammes [Droesbeke_92]. Un nombre de classes trop faible conduit à une description grossière de la répartition des échantillons et un nombre trop important n'apporte pas davantage de précision car dans ces conditions, les données dans chaque intervalle ne sont pas suffisamment nombreuses pour être représentatives. En règle générale, l'expérience montre que le nombre de classes doit se situer entre 10 et 20. Néanmoins, l'application de la règle empirique de Sturge [Droesbeke 92] fournit un bon compromis en définissant un nombre raisonnable de classes, fonction du nombre total d'observations.

$$N_{\text{classe}} = 1 + 10/3 \cdot \text{Log}(N) \quad \text{où } N \text{ désigne le nombre total d'échantillons}$$

Selon le cas de figure, la longueur des classes est choisie identique pour chaque subdivision, ou bien variable si la répartition des données est irrégulière. A cet effet, il est intéressant de considérer des intervalles plus étroits dans un domaine où les densités sont fortes, comme dans le milieu des histogrammes de la figure 21.

Pour un nombre croissant d'observations, les classes seraient de plus en plus petites et l'histogramme se rapprocherait d'une courbe limite correspondant à la fonction de densité de probabilité de la variable étudiée. De même, la courbe de répartition déduite de

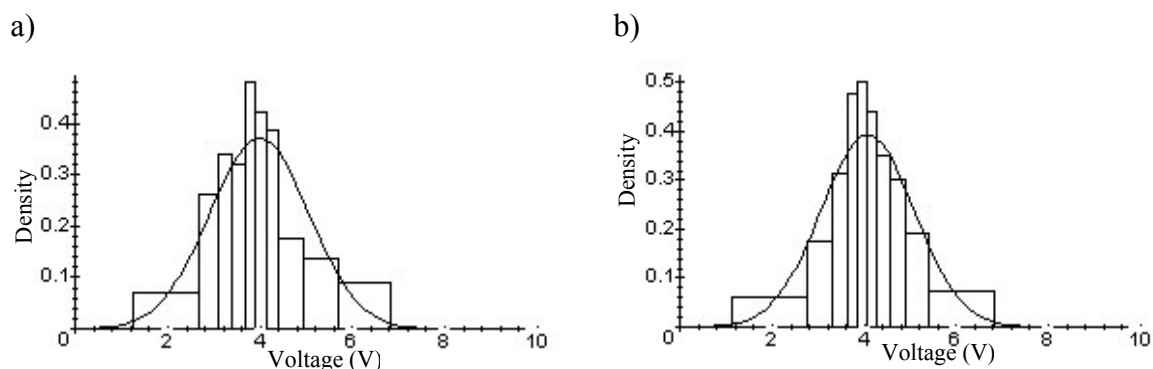


figure 21 : tension harmonique de rang 5 présente sur le TGBT d'un hypermarché,
 histogramme des fréquences et fonction de densité de probabilité :
 a) période diurne $N(3.98, 1.08)$; b) période nocturne $N(4.07, 1.02)$

l'histogramme (figure 22) tendrait vers la fonction des probabilités cumulées ou loi de répartition.

A partir de cette courbe, une valeur ' V_p ' non dépassée selon une probabilité ' p ' peut être extraite comme l'indique la figure 22. Cette valeur privilégiée est souvent définie pour une probabilité égale à 0.95 et sert parfois de référence [IEEE_519] pour décrire le niveau de 'pollution' du réseau électrique. Lorsque cette valeur est relative au courant absorbé par une même catégorie de charges perturbatrices, elle est utilisée pour définir un coefficient de diversité K (ou coefficient de foisonnement). Ainsi, pour une nouvelle installation constituée des mêmes charges mais en nombre différent, ce coefficient permet d'estimer les courants harmoniques engendrés [Lemoine_76][Crucq_89]. Les équipements électro-domestiques, comme les téléviseurs, se prêtent assez bien à l'application de cette méthode d'estimation [Lachaume_92].

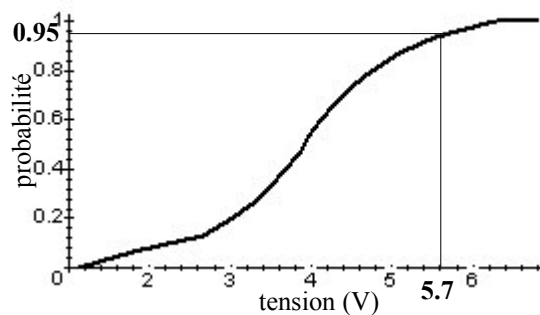


figure 22 : courbe de répartition de la tension harmonique de rang 5 / $V_{0.95} = 5.7V$

La courbe de répartition peut également être approchée ou identifiée par une loi de probabilité connue. Dans notre exemple, la loi normale donne une bonne description des fluctuations de la tension harmonique de rang 5. Le type de lois et leurs paramètres sont caractéristiques de la période et de la grandeur électrique observée (tension / courant). Les courants harmoniques générés par l'hypermarché cité en exemple ont été identifiés par une loi Gamma pour les périodes diurnes et par une loi normale pour les périodes nocturnes. Cela montre l'influence du fonctionnement des charges non linéaires sur la répartition des courants harmoniques. Dans le cadre des travaux réalisés au laboratoire, cette démarche a été adoptée dans plusieurs cas concrets de perturbations harmoniques : installation d'éclairage scénique, variateur de vitesse pour le ventilateur d'une chaudière, machinerie d'ascenseurs dans un hôpital, poste de transformation HTA/BT d'un bâtiment du tertiaire [Guérin_95A][Guérin_97B][Guérin_02C].

4.3 Modélisation

Lorsqu'il est question de phénomènes aléatoires, les études peuvent être abordées selon un point de vue statistique ou probabiliste. La frontière entre ces deux approches est parfois difficile à établir. L'une et l'autre peuvent être employées simultanément ou successivement lors d'une même étude. Dans ce mémoire, une étude sera considérée comme statistique lorsqu'elle s'intéressera uniquement à extraire les principales caractéristiques de la dispersion des résultats, à l'aide des outils disponibles en statistique. Elle sera dite probabiliste lorsqu'elle s'appuiera sur la théorie des probabilités et sur les moyens de calcul associés, pour représenter les perturbations électriques ou le processus qui les génère. Cette distinction arbitraire servira à répartir en plusieurs groupes les travaux traitant des harmoniques ou interharmoniques sous leurs aspects aléatoires.

4.3.1 Représentation d'une charge non linéaire

Comme dans l'approche déterministe, les charges non linéaires sont assimilées à des sources de courant parfaites. Chaque source est définie par son amplitude ' I_h ' et sa phase ' Φ_h '. Puisque les courants harmoniques sont supposés stochastiques, l'amplitude et la phase sont considérées comme des variables aléatoires (figure 23). De même, la composante réelle ' X_h ' et la composante imaginaire ' Y_h ' du courant harmonique de rang h , sont considérées comme des variables aléatoires. Celles-ci peuvent être plus simples à employer dans les calculs et seront donc parfois préférées au couple de variables aléatoires (I_h, Φ_h) .

Ces variables aléatoires sont alors caractérisées par des lois de probabilité :

- des fonctions de densité de probabilité conjointe $f_{XY}(x,y)$ sur les composantes réelle X_h et imaginaire Y_h des courants harmoniques, si ceux-ci doivent être sommés avec d'autres (figure 24a),
- des fonctions de densité de probabilité $f_{Ih}(ih)$ sur le module des harmoniques (figure 24b),
- des lois de répartition sur l'amplitude $F_{Ih}(ih)$ (figure 25).

Dans la littérature [Corbyn_72] [Sherman_72] [Rowe_74] [Kazibwe_89] [Pierrat_91A] [Lehtonen_93], les lois de probabilité correspondant aux différentes variables aléatoires (I_h, Φ_h) ou (X_h, Y_h) sont souvent supposées connues a priori ou assimilées à des lois 'simples'. Dans la plupart des publications, les variables aléatoires I_h et Φ_h sont supposées indépendantes, chacune étant décrite par une loi de probabilité. Dans la réalité, l'amplitude des harmoniques est souvent étroitement liée à la phase. Pour s'en convaincre, il suffit

d'examiner la figure 24a) représentant le comportement du courant harmonique de rang 5 d'un gradateur. Aussi, semble-t-il préférable lorsque cela est nécessaire, de prendre en compte cette dépendance dans la détermination des lois de probabilité.

La détermination des courants harmoniques générés par une charge non linéaire ne fournit alors pas une valeur unique mais une loi de probabilité, caractérisant une source de courant équivalente.

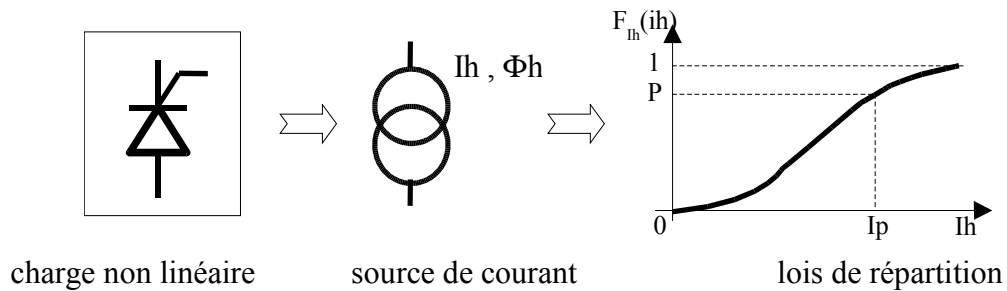


figure 23 : modélisation d'une charge non linéaire

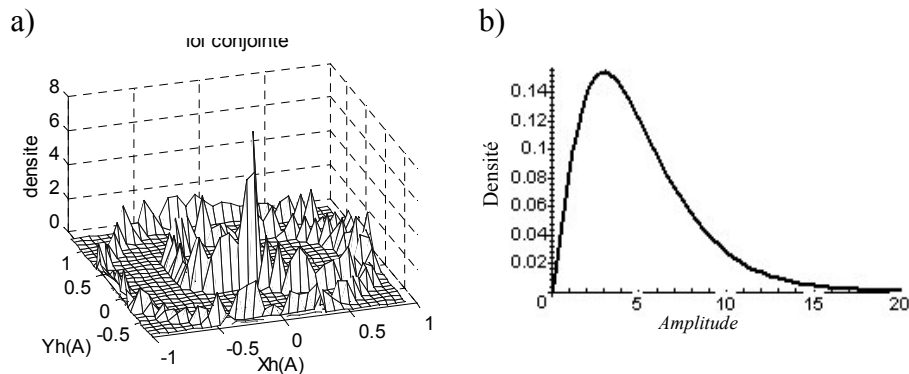


figure 24 : harmonique 5 du courant émis par un gradateur sur charge RL, fonction de densité de probabilité : a) conjointe sur X_h , Y_h , b) marginale sur l'amplitude I_h

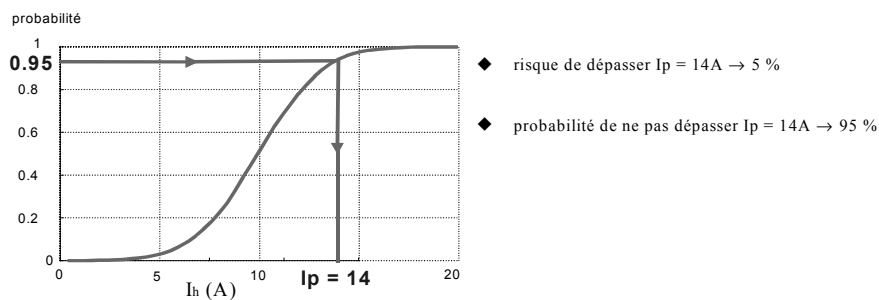


figure 25 : loi de répartition sur l'amplitude, évaluation du courant I_p selon une probabilité $P=0.95$

4.3.2 Réseau

La puissance de fonctionnement des charges non linéaires et surtout les courants absorbés par celles-ci sont considérées dans cette partie comme des variables aléatoires. Les harmoniques des tensions d'alimentation sont, elles aussi, assimilées à des grandeurs aléatoires puisqu'elles résultent généralement de la circulation de ces courants à travers les impédances du réseau.

En un point donné du réseau, l'impédance équivalente est modifiée par le raccordement ou non des charges dites linéaires et par leur régime de fonctionnement. De fait, l'impédance du réseau varie également et pourrait dans une certaine mesure être considérée comme une grandeur aléatoire. Etant donné le nombre de consommateurs alimentés par les réseaux de transport et de répartition (HTB – HTA), cette hypothèse serait fortement justifiée pour ce type de réseau [Deflandre_98]. Comme le propose certains auteurs, il est évident que l'approche stochastique pourrait également s'appliquer à la prise en compte des évolutions de l'impédance du réseau pour calculer les répercussions sur la propagation des courants et des tensions résultantes [Carpinelli_02].

Dans le contexte des réseaux à faible puissance de court circuit, l'impédance équivalente en un point donné, dépend des charges qui y sont raccordées et dans sa grande majorité de l'impédance de la ligne d'alimentation jusqu'à ce point (puissance de court-circuit du réseau de distribution, impédance des transformateurs, des câbles...). De même, pour des réseaux ilotés, comme dans l'exemple d'un navire, l'impédance de court-circuit est fortement liée à celles des alternateurs. Aussi, dans la suite de ce mémoire, les impédances des divers équipements dits linéaires qui constituent le réseau de distribution seront considérées comme des grandeurs déterministes, c'est-à-dire dont la valeur est supposée parfaitement connue pour une fréquence donnée.

4.4 Reproduction

La reproduction des perturbations conduites basses fréquences et en particulier celle des harmoniques s'effectue selon la même décomposition suivant deux étapes. La première s'applique à déterminer les lois de probabilité pouvant décrire le comportement des courants injectés sur le réseau par les charges non linéaires. La deuxième étape s'attache à étudier la propagation des courants à partir du calcul des tensions résultantes en tout point du réseau.

4.4.1 Détermination des lois de probabilité relatives aux charges non linéaires

4.4.1.1 Mesures

Lorsque les installations sont accessibles et disponibles, la réalisation d'une campagne de mesures fournit un nombre d'observations suffisant pour permettre la détermination des lois 'statistiques' représentant les variations aléatoires des courants émis. Ces lois sont identifiées par les techniques exposées dans le sous-chapitre identification et caractérisent ainsi les courants émis par les charges non linéaires.

4.4.1.2 Méthode analytique

Dans de nombreux cas il est possible d'écrire les expressions (11) reliant les composantes réelle X_h et imaginaire Y_h des courants harmoniques (ou l'amplitude I_h et la phase Φ_h) à la puissance absorbée ou à l'angle de commande d'un convertisseur, considérés comme le paramètre aléatoire ψ .

$$X_h = g_{xh}(\psi) \quad Y_h = g_{yh}(\psi) \quad (11)$$

Les variations aléatoires du paramètre ψ sont caractérisées par sa fonction de densité de probabilité $f_\psi(\psi)$, *a priori* connue. Dans le cas où g_{xh} et g_{yh} sont monotones, les fonctions de densité de probabilité de X_h , Y_h sont déterminées par les relations :

$$f_{xh}(xh) = f_\psi(g_{xh}^{-1}(xh)) \left| \frac{d}{dxh} g_{xh}^{-1}(xh) \right| \quad f_{yh}(yh) = f_\psi(g_{yh}^{-1}(yh)) \left| \frac{d}{dyh} g_{yh}^{-1}(yh) \right| \quad (12)$$

où g_{xh}^{-1} et g_{yh}^{-1} désignent respectivement les fonctions inverses de g_{xh} et g_{yh} .

Si les fonctions g_{xh} et g_{yh} ne sont pas monotones, les relations (12) s'appliquent sur les intervalles de ψ où elles sont strictement monotones. Les fonctions densité de probabilité calculées sur chaque intervalle sont sommées pour obtenir les fonctions de densité de probabilité de X_h et Y_h .

4.4.1.3 Méthode de Monte Carlo

Avec les outils de calcul actuels, il devient possible de reproduire plus ou moins précisément, le comportement des systèmes physiques. En associant une méthode de Monte Carlo à la simulation des charges perturbatrices, les résultats issus de ces simulations peuvent être

assimilés à des relevés expérimentaux. A ce moment, la démarche utilisée dans la première méthode s'applique directement pour déterminer les lois de répartition.

La simulation de Monte Carlo adaptée à notre problème de l'estimation des harmoniques est construite suivant l'algorithme de la figure 26. A titre d'illustration, prenons le cas d'un gradateur alimentant une résistance, dont la variation de l'angle de commande suivrait une loi uniforme entre 70° et 140° . A chaque itération, l'angle de commande est tiré aléatoirement selon sa loi $U[70^\circ-140^\circ]$. Les courants résultants sont alors calculés à l'aide des expressions (13) puis mémorisés.

$$X_h = \frac{V_s \max}{\pi \cdot R} \cdot \left(\frac{\sin(h+1)\Psi}{h+1} - \frac{\sin(h-1)\Psi}{h-1} \right) \quad (13)$$

$$Y_h = \frac{V_s \max}{\pi \cdot R} \cdot \left(\frac{\cos(h+1)\Psi - 1}{h+1} - \frac{\cos(h-1)\Psi - 1}{h-1} \right) \quad \text{pour } h = 2k+1 \quad (k=1,2,3\dots)$$

Lorsque le nombre total d'itérations est atteint, les histogrammes des effectifs et des effectifs cumulés sont déterminés. Si le nombre d'itérations est suffisamment élevé, ces courbes peuvent être assimilées à des lois de probabilité (fonction de densité de probabilité et loi de répartition) avec une précision satisfaisante.

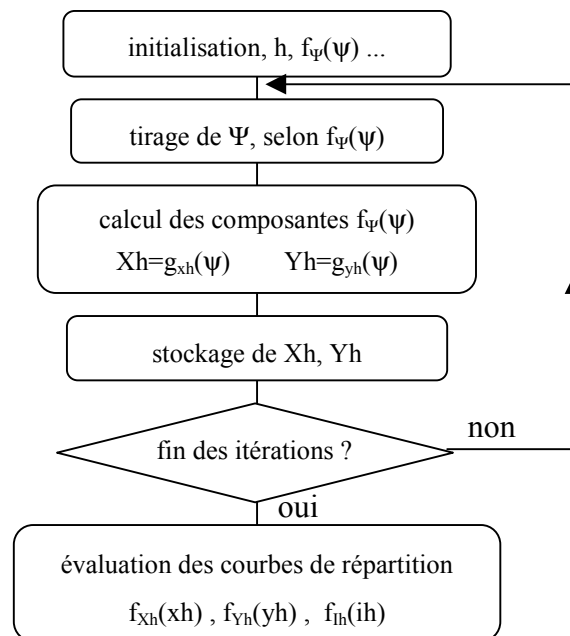


figure 26 : obtention des lois de probabilité des courants émis par la méthode de Monte Carlo

Le fait de disposer des expressions littérales (13) définissant les composantes réelles et imaginaires des courants harmoniques, permet de réduire les temps de calculs dans des proportions importantes, puisque les courants doivent être déterminés à chaque itération.

Une autre difficulté liée à cette méthode réside dans le tirage d'une variable aléatoire selon une loi prédéfinie, à partir d'un générateur pseudo-aléatoire élémentaire (loi uniforme $[0, 1]$). Le lecteur intéressé par ce sujet pourra utilement consulter de nombreux ouvrages [Knuth_81][Rubinstein_81][Press_94] où cette question est largement débattue.

4.4.2 Réseau

4.4.2.1 Méthode analytique

Les courants générés par les diverses charges raccordées sur un même réseau vont se propager à travers celui-ci en fonction des impédances rencontrées. A chaque noeud du réseau, ces courants vont s'ajouter selon les valeurs de leur amplitude et de leur phase. C'est pourquoi les travaux basés sur une approche probabiliste se sont tout particulièrement intéressés à la question de la sommation des courants harmoniques.

Les courants harmoniques étant assimilés à des 'vecteurs aléatoires', le problème se ramène à la détermination des lois de probabilité relatives à une somme de vecteurs aléatoires indépendants les uns des autres. Cette dernière hypothèse signifie alors qu'il n'existe aucune interaction entre les différentes charges non linéaires.

La somme des courants et a fortiori des 'vecteurs aléatoires', s'effectuent par la somme de leurs composantes réelle et imaginaire. L'indépendance entre ces composantes aléatoires X_h , Y_h (ou amplitude et phase) est loin d'être systématique et relèverait plutôt du cas particulier. Dans ces conditions, le calcul de la fonction densité de probabilité du couple de variables aléatoires doit tenir compte des lois conjointes.

Appliqué à la somme de deux vecteurs, le calcul [Guérin_96A] conduit à la relation (14), dans le cas général où la dépendance entre les composantes réelles et imaginaires doit être prise en considération. Cette relation correspond au produit de convolution à deux dimensions des fonctions de densité de probabilité conjointe, respectives à chaque vecteur.

$$f_{X_1 X_2 Y_1 Y_2}(x_1, x_2, y_1, y_2) = f_{X_1 Y_1}(x_1, y_1) f_{X_2 Y_2}(x_2, y_2)$$

$$f_{XY}(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f_{X_1 Y_1}(x_1, y_1) f_{X_2 Y_2}(x - x_1, y - y_1) dy_1 dx_1 \quad (14)$$

- avec :
- (X₁, Y₁) coordonnées du 1^{er} vecteur
 - (X₂, Y₂) coordonnées du 2^{ème} vecteur
 - (X, Y) coordonnées du vecteur résultant, avec X = X₁ + X₂ ; Y = Y₁ + Y₂
 - f_{X₁Y₁}(x₁, y₁) fonction densité de probabilité de X₁, Y₁ (supposée connue)
 - f_{X₂Y₂}(x₂, y₂) fonction densité de probabilité de X₂, Y₂ (supposée connue)
 - f_{X₁X₂Y₁Y₂}(x₁, x₂, y₁, y₂) fonction densité de probabilité du système X₁, Y₁, X₂, Y₂

Dans le cas particulier où les composantes réelles et imaginaires des vecteurs sont indépendantes (X₁ indépendant de Y₁ et X₂ indépendant de Y₂), la relation (14) s'écrit sous la forme du produit des deux fonctions densité de probabilité marginales (15), traduisant l'indépendance des composantes aléatoires X et Y du vecteur résultant.

$$f_{XY}(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_{X X_2}(x, x - x_1) dx_1 \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} f_{Y Y_2}(y, y - y_1) dy_1$$

$$= f_X(x) f_Y(y) \quad (15)$$

Ce cas particulier permet de conduire les calculs sur chaque composante prise séparément et de ne faire usage que des lois marginales.

$$f_X(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_{X_1}(x_1) \cdot f_{X_2}(x - x_1) dx_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} f_{X_1}(x - x_2) \cdot f_{X_2}(x_2) dx_2$$

$$f_Y(y) = \int_{-\infty}^{+\infty} f_{Y_1}(y_1) \cdot f_{Y_2}(y - y_1) dy_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} f_{Y_1}(y - y_2) \cdot f_{Y_2}(y_2) dy_2 \quad (16)$$

Dans le cas général où les lois sont quelconques, la détermination à l'aide des relations (14) de la loi de probabilité résultante, réclame souvent un calculateur pour la résolution des intégrales. Pour certaines lois particulières ou moyennant certaines hypothèses simplificatrices, il est possible de conduire les calculs d'une manière entièrement analytique [Pierrat_91A][Lethonen_93].

Généralement, l'objectif final d'une étude des harmoniques produits par une installation consiste à évaluer leur amplitude ou leur valeur efficace. Si seule la fonction de densité de probabilité conjointe f_{X_hY_h}(x_h, y_h) sur les composantes réelle et imaginaire est disponible, il devient nécessaire de poursuivre les calculs pour obtenir les lois de répartition f_h(i_h) relatives à l'amplitude des courants [Papoulis_91]. Des hypothèses restrictives sur les variables aléatoires permettent, dans quelques cas, d'écrire les expressions littérales de la loi de

répartition sur l'amplitude $f_{lh}(ih)$, sans avoir recours au calcul numérique. L'exemple où les composantes réelle X_h et imaginaire Y_h sont indépendantes est souvent proposé [Kazibwe_89][Ventsel_73].

Cette méthode analytique de détermination des lois de probabilité est intéressante car elle en fournit une expression littérale. L'influence des divers paramètres intervenant dans les relations peut ainsi être analysée précisément. Malheureusement, les expressions de X_h , Y_h sont souvent complexes et ne peuvent pas toujours être approximées par des lois normales. Par conséquent, la recherche des lois de probabilité passe fréquemment par l'emploi de calculateurs numériques où, à défaut d'un calcul formel, les expressions littérales ne sont plus accessibles.

4.4.2.2 Méthode de Monte Carlo

L'inconvénient majeur de l'exploitation statistique est de devoir disposer de l'installation à étudier pour la réalisation des mesures. Il n'est donc pas envisageable de l'utiliser directement pour effectuer des prévisions sur une nouvelle installation. Avec les outils de calcul actuels, il devient possible d'associer une méthode de Monte Carlo [Rubinstein_81] à la simulation des charges perturbatrices et de la propagation des harmoniques dans un réseau de distribution.

La démarche illustrée par la figure 27 consiste à déterminer les courants harmoniques émis par les convertisseurs et à calculer leur propagation dans le réseau un grand nombre de fois, tout en faisant varier de façon aléatoire, soit les puissances de fonctionnement de chaque perturbateur, soit les courants injectés, selon des lois prédéfinies. Les impédances des éléments 'linéaires' du réseau sont considérées comme des grandeurs déterministes, c'est-à-dire constantes pour une fréquence donnée. Pour chaque itération, les calculs sont semblables à ceux utilisés dans l'approche déterministe et les résultats, courants et tensions, sont mémorisés au même titre que des échantillons de mesure. Lorsque le nombre total d'itérations est atteint, les histogrammes des effectifs et des effectifs cumulés sont déterminés. Si le nombre d'itérations est suffisamment élevé (ex. plusieurs milliers), ces courbes peuvent être assimilées à des lois de probabilité, selon une précision satisfaisante.

Cependant, des problèmes liés au temps de calcul et à la taille mémoire réclamée pour le stockage des données peuvent apparaître. En effet, pour une bonne évaluation des lois de probabilité, cette méthode nécessite un nombre important d'itérations. En conséquence, cette méthode particulièrement simple à mettre en œuvre est parfois difficile à appliquer pour certaines installations, notamment lorsque le nombre de charges est élevé. En effet,

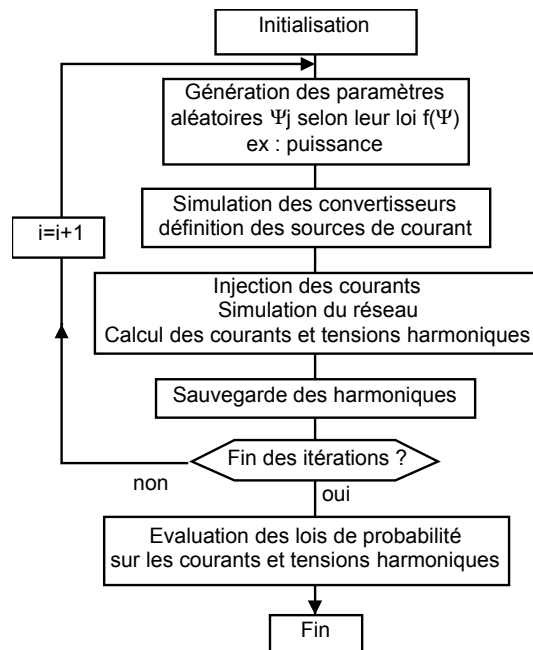


figure 27 : estimation des harmoniques – algorithme de Monte Carlo

l'obtention des grandeurs harmoniques par une simulation temporelle des charges non linéaires suivie d'une analyse spectrale des formes d'onde, nécessite bien souvent des temps de calcul prohibitifs. Il est alors préférable de disposer des expressions littérales définissant les composantes réelles et imaginaires des courants harmoniques, à partir des caractéristiques du perturbateur et en particulier le(s) paramètre(s) aléatoire(s) correspondant(s) (ex : puissance absorbée, angle de commande).

Un logiciel de simulation [Guérin_96B] des harmoniques sur les réseaux électriques (PHARE) a été spécifiquement développé afin d'intégrer cette approche stochastique des harmoniques. L'algorithme repose principalement sur la méthode de Monte Carlo et utilise des modèles analytiques des charges pour calculer rapidement les courants harmoniques injectés sur le réseau. Un des avantages de cette structure de programme est de pouvoir étudier une installation électrique non seulement selon une approche stochastique, mais également d'un point de vue déterministe, en fixant le régime de fonctionnement des charges.

4.5 Prévion

Plusieurs méthodes ont été exposées en vue de calculer les perturbations susceptibles d'apparaître sur un réseau de distribution. Il faut noter que si l'estimation des harmoniques par une approche stochastique fait toujours l'objet d'études et de publications, ces dernières proposent rarement des applications sur des installations réelles. Dans cette partie, deux

études [Guérin_00C][Guérin_02C] seront présentées afin d'illustrer la mise en oeuvre de l'approche stochastique sur des cas concrets. Ces applications permettront également d'apporter un regard critique sur cette vision probabiliste des perturbations des réseaux.

4.5.1 Hypermarché

L'objectif est d'estimer les amplitudes probables des harmoniques lorsque l'hypermarché est alimenté par son groupe autonome (diesel-alternateur). Ce mode de fonctionnement est utilisé en secours ou à l'occasion des 22 jours E.J.P. (Effacement Jour de Pointe) imposés par les conditions tarifaires du fournisseur d'énergie.

4.5.1.1 Identification des courants

Dans un premier temps, les courants sont identifiés à partir de mesures effectuées sur le tableau général basse tension (TGBT) lorsque l'hypermarché est raccordé au réseau public de distribution (voir figure 28). La puissance totale consommée est d'environ 900kW et les courants harmoniques sont principalement générés par l'éclairage fluorescent, les écrans, les ordinateurs et les caisses enregistreuses. La puissance unitaire de chaque appareil est faible (100 à 200VA) mais leur multitude (plusieurs milliers) induit des perturbations non négligeables dans le réseau électrique. Enfin, ces phénomènes peuvent être facilement amplifiés par la présence d'une batterie de compensation d'énergie réactive de 200 kvar.

Durant sept jours consécutifs (du jeudi 29.03.01 à 14h00 au jeudi 5.05.01 à 14h00) les tensions et courants d'alimentation ont été enregistrés selon une période d'échantillonnage de cinq minutes, l'hypermarché étant connecté au réseau 20kV. L'observation de l'évolution

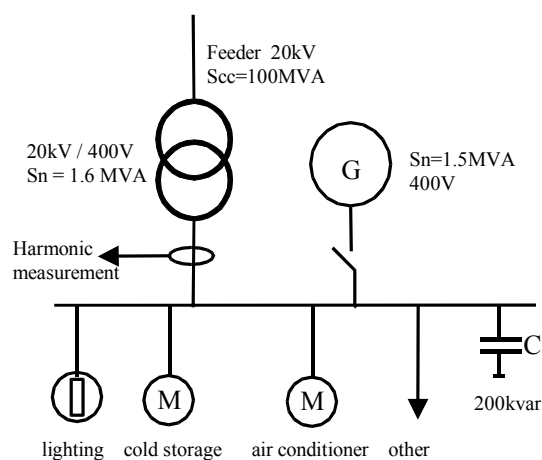


figure 28 : schéma simplifié de l'installation

temporelle des grandeurs électriques de la figure 29 montre l'apparition de plusieurs périodes d'activités distinctes :

- une période diurne de 8h45 à 21h00 correspondant aux heures d'ouverture du magasin,
- une période nocturne de 21h00 à 8h45 correspondant aux heures de fermeture,
- un jour férié, le dimanche, où la consommation électrique est réduite à son minimum.

Pour chacune de ces périodes, les fluctuations des courants harmoniques sont représentées sous la forme d'histogrammes des fréquences, à partir desquels, les fonctions de densité de probabilité les plus représentatives sont recherchées. Dans le cas présent, six lois de probabilité ont été testées : Normale, Rayleigh ; Weibull ; Gamma ; Logistic ; Polynomiale. L'identification par rapport à ces lois nécessite parfois un changement de variable afin d'effectuer une transformation d'échelle sur les valeurs positives à partir de zéro :

$$X = (I - I_{\min}) / \sigma_i$$

Le choix de la fonction la mieux adaptée s'effectue visuellement en les comparant à l'histogramme des fréquences (figure 30) et en se reportant à des tests de conformité (χ^2 , Kolmogorov) [Ventsel_73] fournissant alors des critères plus objectifs pour guider ce choix. Il faut néanmoins remarquer que plusieurs paramètres influencent notablement les tests de conformité, tel que le nombre de classes et la transformation d'échelle, en particulier la valeur minimale $I_{\min}$.

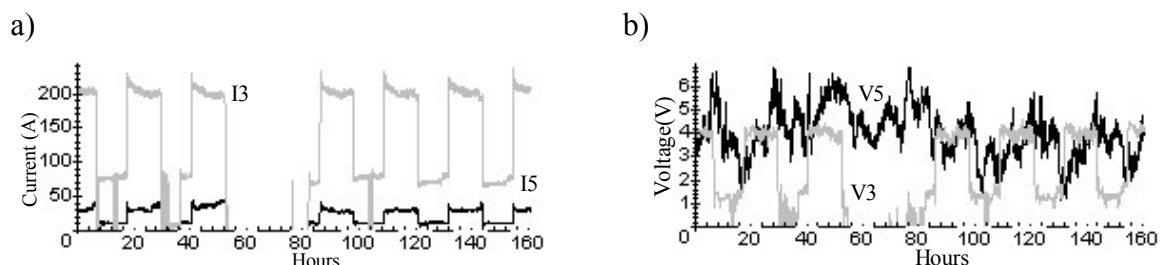


figure 29 : évolution temporelle des harmoniques 3 & 5 relevés sur 7 jours

a) courants ; b) tensions

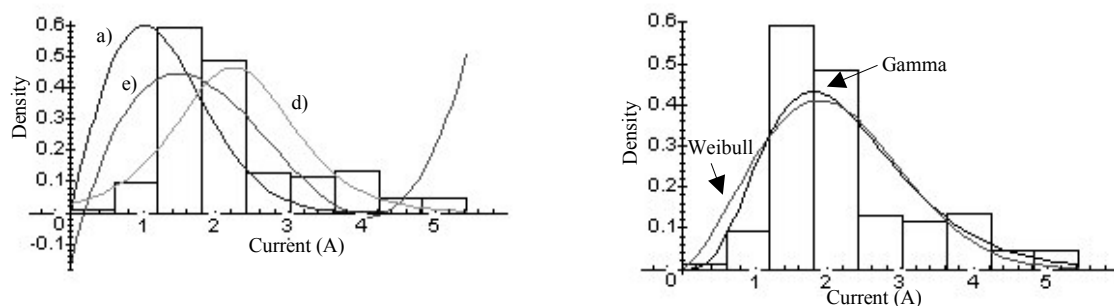


figure 30 : comparaison pour h=5 de l'histogramme des fréquences aux fonctions de : a) Rayleigh, b) Weibull, c) Gamma, d) Logistic, e) polynomial,

Le Tableau 9 résume les résultats de l'identification pour les autres périodes d'activité et pour l'harmonique 3 du courant. Même si ces lois ne donnent qu'une approximation relative des variations 'aléatoires' des courants, elles permettent néanmoins, compte tenu de nos objectifs, une description des perturbations et la prévision des tensions résultantes. Si des estimations plus précises sont exigées, il est toujours envisageable d'améliorer cette dernière phase d'identification.

periodes	heures d'ouverture		heures de fermeture	
	transformation	p.d.f.	transformation	p.d.f.
I ₃	I _{min} = 184A $\sigma_i=6.92$	$\Gamma[6.5 - 0.41]$	-	N[74.5; 5.47]
I ₅	I _{min} = 22.5A $\sigma_i= 4.13$	$\Gamma[4.9; 0.46]$	-	N[11.8; 1.41]

Tableau 9 : approximation par des lois de probabilité des courants harmoniques

4.5.1.2 Prévision des tensions harmoniques

Les tensions harmoniques du réseau en mode iloté pourraient se calculer à l'aide d'une simulation de Monte Carlo. Etant donné la simplicité de la structure étudiée, un calcul entièrement analytique est envisageable.

L'hypermarché est alimenté par un groupe alternateur, dont la tension délivrée est supposée parfaitement sinusoïdale. Avec I_h correspondant à l'injection totale de l'ensemble des charges non linéaires et Z_h l'impédance du réseau vue du TGBT, les tensions sont alors définies en ce point par la relation :

$$V_h = Z_h \cdot I_h \quad (17)$$

L'impédance étant supposée constante à la fréquence considérée, la fonction de densité de probabilité sur la tension se déduit de la fonction sur le courant à l'aide de l'expression :

$$f_U(u) = f_I\left(\frac{u}{Z_h}\right) \cdot \frac{1}{Z_h} \quad (18)$$

De même, la fonction de probabilité cumulée s'obtient par :

$$F_U(u) = P[U < u] = P[I_{min} < I < \frac{u}{Z_h}] = \int_{I_{min}}^{\frac{u}{Z_h}} f_I(\tau) \cdot d\tau \quad (19)$$

L'application des relations précédentes aux fonctions de densité de probabilité caractérisant les courants du Tableau 9 conduit aux lois de répartition sur la tension de la figure 31. De ces courbes sont ensuite extraites les valeurs d'amplitude non dépassées avec une probabilité de

95% (Tableau 10). Enfin, ces valeurs particulières sont à confronter aux recommandations des normes en vigueur, signalant dans le cas présent, un risque de dépassement fort probable durant les heures d'ouverture du magasin.

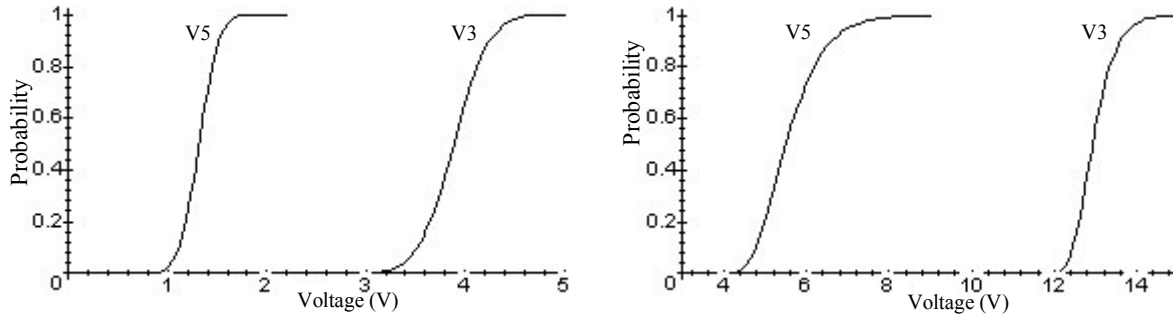


figure 31 : prévision des 3^{ème} & 5^{ème} harmoniques de tension en configuration ilotée,
a) heures de fermeture ; b) heures d'ouverture

harmonique	heures d'ouverture	heures de fermeture
V_{H3}	13.8V / 6%	4.4 V / 1.9%
V_{H5}	6.9 V / 3%	1.6 V / 0.7%

Tableau 10 : tensions harmoniques non dépassées pour une probabilité de 95%

4.5.2 Système de propulsion d'un navire de croisière

La prévision des tensions harmoniques résultantes sur un réseau de distribution est également possible avec la simulation de Monte Carlo. Il suffit pour cela, de renouveler les calculs déterministes présentés dans la première partie de ce mémoire, autant de fois que nécessaire, en déterminant la puissance ou les angles de commande des convertisseurs par un tirage aléatoire selon des lois de probabilité données.

Afin d'illustrer ces propos, l'exemple du réseau de navire présenté dans la partie déterministe des perturbations (§ 2.5), est repris. L'approche stochastique serait alors tout à fait adaptée pour la prévision des harmoniques générés par la multitude de charges non linéaires présentes à bord. Elle peut l'être également dans le cas d'un faible nombre de convertisseurs, comme ceux du système de propulsion, pour l'évaluation des harmoniques dans certaines configurations difficilement envisageables selon une approche déterministe.

L'exemple suivant étudie l'impact des variations de puissance du système de propulsion sur les tensions harmoniques. Selon l'état de la mer, la direction de la houle ou si le navire est en manœuvre, la répartition de la puissance entre les deux lignes d'arbre peut devenir très

différente. La fluctuation de puissance sur une ligne d'arbre est alors considérée comme aléatoire et indépendante de celle présente sur l'autre ligne d'arbre. Ces variations de puissance vont se répercuter sur les courants absorbés par les convertisseurs de propulsion et dans le même temps, sur les tensions résultantes, étant donnée la puissance de ces derniers.

Supposons que les deux lignes d'arbre aient la même puissance moyenne $P_{\text{moy}} = 9\text{MW}$, mais avec des variations indépendantes de $\pm 25\%$ selon une loi normale. A l'aide du logiciel PHARE, la simulation de ce réseau par la méthode de Monte Carlo permet de déterminer les lois de probabilité relatives à l'amplitude des courants harmoniques (figure 32) générés par chaque convertisseur ainsi que les lois correspondant aux tensions harmoniques résultantes sur le 6.6kV (figure 33). De ces courbes sont déduites les principales caractéristiques statistiques : valeurs minimales, moyennes, maximales et les valeurs non dépassées avec une probabilité de 95% (Tableau 11).

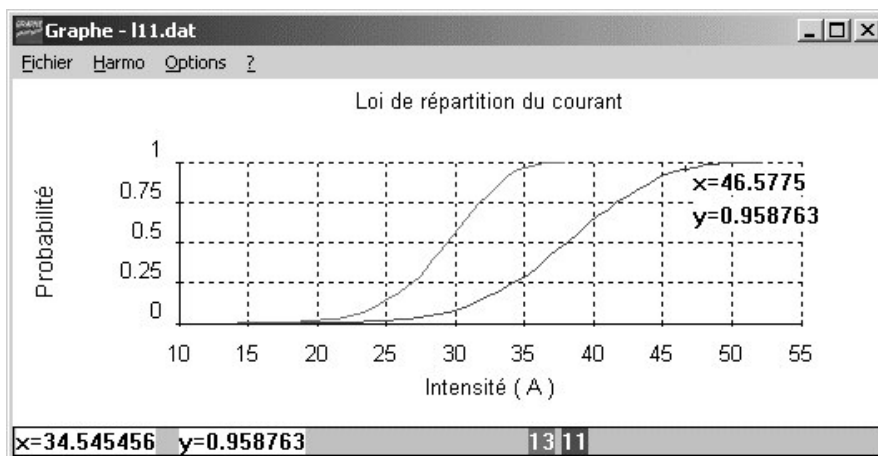


figure 32 : lois de répartition des courants harmoniques émis par un convertisseur

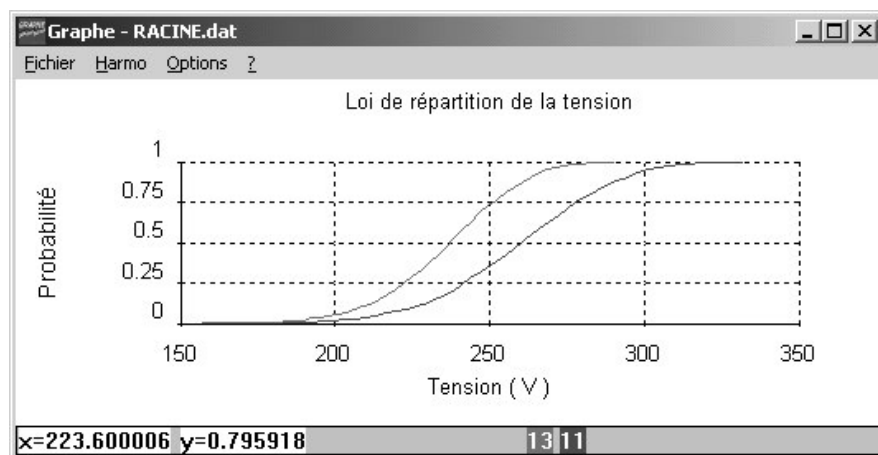


figure 33 : lois de répartition des tensions harmoniques sur le 6.6kV

	Minimum	Moyenne	Maximum	P = 95%
I ₁₁ (A)	17.4	38.1	52.3	46.9
I ₁₃ (A)	14.2	29.4	38	34.6
V ₁₁ (V)	165	261	332	301
V ₁₃ (V)	157	237	290	268

Tableau 11 : simulation de la propulsion - principales caractéristiques statistiques des courants émis par un convertisseur et des tensions harmoniques (simples) sur le 6.6kV

L'influence du déséquilibre de puissance sur les lignes d'arbre est alors mise en évidence. L'amplitude des courants harmoniques devient supérieure à celle que fournissaient les convertisseurs pour cette même puissance moyenne de 9MW. Sans filtrage, le niveau des tensions harmoniques augmente également pour atteindre 8.7% en valeur maximale et un peu moins de 8% dans 95% des cas. Cette augmentation des harmoniques 'probables' est donc à prendre en considération, notamment pour dimensionner d'éventuels filtres harmoniques. Cependant, si les équipements de l'installation l'autorisent, il n'est pas nécessaire de retenir les valeurs maximales, mais seulement les valeurs non dépassées dans 95% des cas.

A l'aide de l'algorithme de Monte Carlo, il est possible de prendre en compte et de simuler les variations de puissance des convertisseurs pour en prévoir l'impact sur les tensions harmoniques présentes dans chaque tableau de distribution du réseau de bord. Ces estimations réalisées suivant une approche stochastique des perturbations harmoniques fournissent non seulement des informations sur les amplitudes (min, max...), mais donnent également une évaluation, en terme de probabilité, du risque de dépasser ou non certaines valeurs particulières.

4.6 Conclusion

Etant donnée l'augmentation croissante des 'perturbateurs' et des appareils sensibles regroupés sur un même site et connectés sur le même réseau de distribution, les études des phénomènes harmoniques sont devenues nécessaires pour assurer une bonne compatibilité électromagnétique (CEM) entre tous ces équipements. Pour atteindre cet objectif, deux approches ont été envisagées. L'approche déterministe, déjà largement employée, est bien adaptée à l'analyse des harmoniques produits par des convertisseurs dont le régime de fonctionnement est fixe et parfaitement bien défini. L'étude harmonique d'un réseau de navire a permis d'en donner une illustration et de mettre en évidence le rôle perturbateur des convertisseurs de puissance sur un réseau à faible puissance de court-circuit. A cette

occasion, la démarche conduisant à une première solution de filtrage a été présentée, démontrant ainsi que les phénomènes harmoniques pouvaient être maîtrisés, à défaut d'être éliminés.

En revanche, l'analyse des harmoniques sur des réseaux comportant des charges non linéaires fortement variables et/ou en grand nombre, requiert des méthodes d'estimation plus sophistiquées. L'approche stochastique, basée sur la théorie des probabilités est alors en mesure de fournir des estimations plus proches de la réalité. Plusieurs études sur des exemples réels ont démontré l'intérêt de cette approche, tant pour caractériser les perturbations préexistantes sur une installation que pour les simuler dans le contexte d'analyses prévisionnelles.

Cette approche, encore originale dans le domaine des perturbations des réseaux, s'avère tout particulièrement adaptée aux installations constituées d'un grand nombre de convertisseurs statiques. Le régime de fonctionnement variable de chacun d'entre eux et les phénomènes de foisonnement des harmoniques qui en résultent peuvent être pris en compte dans les calculs, aboutissant à une description plus réaliste du comportement global des perturbations résultantes. Cependant, en l'appliquant au réseau de navire et en considérant les variations de puissance du système de propulsion, nous avons montré que ce type d'approche pouvait également être employé avec un petit nombre de convertisseurs. Des prévisions ont pu ainsi être fournies, là où une étude déterministe aurait été difficilement envisageable.

Pour toutes ces situations, l'approche stochastique des perturbations harmoniques ou des processus qui les génèrent, conduit, grâce aux simulations de Monte Carlo, à des estimations plus précises du comportement général des charges non-linéaires et du réseau de distribution. Ces estimations fournissent alors des lois de probabilité d'où sont extraites des valeurs caractéristiques (minimale, moyenne, maximale, à 90 ou 95%) pouvant servir de référence pour la confrontation aux normes ou le choix des équipements. Notamment, lorsque la valeur maximale du rang harmonique considéré reste élevée mais n'apparaît que très rarement, il devient plus économique de considérer le niveau estimé à 95%, pour dimensionner l'ensemble des matériels électriques de l'installation. De plus, en complément à ces valeurs estimées, la méthode de calcul proposée donne une évaluation, en terme de probabilité, des risques de les dépasser ou non. Ces informations supplémentaires sont susceptibles d'apporter une aide précieuse à l'ingénieur chargé de concevoir et de dimensionner les équipements électriques d'une installation, tout en répondant à des contraintes de coûts, de respect des normes, de sûreté et de fiabilité de fonctionnement.

5 CARACTERISATION DE L'EVOLUTION TEMPORELLE

5.1 Observation

Le relevé sur sept jours consécutifs du courant absorbé par un hypermarché a montré plusieurs périodes de fonctionnement très distinctes, selon des caractéristiques statistiques différentes (voir § 4.5.1.). Si nous observons l'allure générale sur la période complète, il apparaît une succession de périodes d'ouverture et de fermeture du magasin. Chacune de ces périodes possède un comportement similaire d'un jour à l'autre, sans pour autant être rigoureusement identique.

L'exemple de l'hypermarché n'est pas unique. Une campagne de mesures effectuée sur le tableau général basse tension (TGBT) d'un établissement d'enseignement universitaire fait également apparaître un phénomène semblable. Comme le montre la figure 34, l'allure du courant absorbé montre une périodicité de un jour en correspondance avec l'activité du site. Mais contrairement au cas de l'hypermarché, le passage des périodes diurnes aux périodes nocturnes est moins brutal. L'évolution du courant est continue tout au long de la journée. Le profil journalier ainsi obtenu se retrouve en grande partie sur tous les autres jours de la semaine, excepté le samedi et le dimanche où l'activité dans le bâtiment est réduite.

En examinant plus en détail l'évolution du courant de la figure 34, des fluctuations 'rapides' sont parfaitement visibles, celles-ci venant se superposer au profil journalier. L'évolution temporelle du courant semble alors être la résultante d'une variation journalière dépendant de l'activité ou du comportement de l'installation au cours de cette journée et de fluctuations très rapides sur de courtes périodes liées au fonctionnement même des charges.

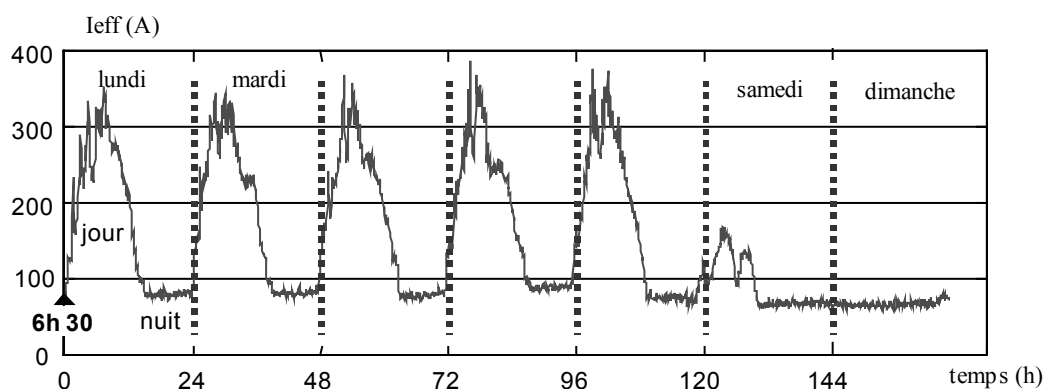


figure 34 : relevé du courant efficace au secondaire du transformateur HTA/BT d'un établissement d'enseignement universitaire

Ces remarques formulées sur le courant efficace absorbé par l'installation électrique sont aussi valables pour les premiers rangs harmoniques. Pour les harmoniques de rangs plus élevés, l'influence des variations journalières diminue fortement au profit des variations 'rapides'. Quelques auteurs [Emmanuel_91][Emanuel_93] sont arrivés aux mêmes conclusions à l'issue de campagnes de mesures sur des tableaux alimentant des charges des secteurs industriel, commercial et résidentiel.

Il apparaît alors évident qu'une analyse des perturbations conduites basses fréquences dans les réseaux de distribution doit tenir compte de ces évolutions temporelles des courants. L'approche stochastique présentée au chapitre précédent n'est alors plus adaptée à l'étude de ce type de signal ayant des variations répétitives et en partie prévisibles. D'un autre côté, une approche entièrement déterministe fournirait une estimation à un instant donné entachée d'une forte incertitude car ne prenant pas en considération les fluctuations rapides observées. Ces dernières étant prépondérantes lorsque le rang harmonique augmente, la marge d'erreur deviendrait très vite rédhibitoire pour toute étude prévisionnelle.

5.2 Identification

En considérant le signal stationnaire sur un intervalle de temps T_0 donné (ex : plusieurs périodes du fondamental), le courant absorbé par une charge est également identifiable par son spectre fréquentiel. Si le courant varie lentement par rapport à T_0 , une analyse fréquentielle est envisageable sur chaque intervalle T_0 où il peut être supposé stationnaire. Ainsi, chaque composante fréquentielle subit une évolution temporelle. Dans un souci de clarté pour l'exposé de la démarche proposée et des méthodes abordées, nous nous limiterons volontairement à l'étude des perturbations harmoniques.

Les grandeurs électriques et leurs harmoniques étant variables dans le temps, chacune d'entre elles pourrait être identifiée par une fonction mathématique dont le temps serait pris comme variable. Cependant, l'observation des résultats de plusieurs campagne de mesures a montré l'existence de deux à trois types de variations, correspondant à des échelles de temps différentes.

Sur une longue durée, le comportement journalier de l'installation se reproduit de manière semblable d'un jour à l'autre. Il est donc raisonnable de considérer une partie de ces variations comme périodique. Celle-ci étant fortement liée à l'activité du site ou au fonctionnement global de la charge, elle peut être quasiment prévisible et être donc supposée déterministe. Si sur cette longue durée d'observation le profil périodique présente de légères différences de

variation d'un jour à l'autre, ces changements pourraient caractériser une évolution lente du comportement général.

Sur une échelle de temps plus courte, c'est-à-dire sur une petite portion du comportement cyclique (ex : quelques minutes ou dizaine de minutes), il existe des fluctuations que nous qualifierons de 'rapides'. Celles-ci semblent liées au régime de fonctionnement des charges. L'argumentation proposé dans l'introduction de l'approche stochastique reste encore applicable pour justifier ces variations sans 'motif' ou profil apparent et pratiquement imprévisible. En reprenant l'hypothèse selon laquelle le fonctionnement des charges et en particulier celui des convertisseurs de puissance est sujet à des variations aléatoires, les fluctuations sur les grandeurs électriques peuvent alors être abordées selon une approche stochastique. Les techniques d'identification vues au précédent chapitre sont alors applicables sur ces variations 'rapides'.

En résumé, l'évolution temporelle du courant et de ses harmoniques absorbés par une charge non linéaire ou une installation complète est descriptible par :

- une fonction du temps déterministe représentant les variations périodiques,
- éventuellement une autre fonction du temps pour caractériser une tendance générale lente sur plusieurs cycles,
- une fonction de densité de probabilité ou une courbe de répartition décrivant les fluctuations 'rapides' et aléatoires.

Par exemple, pour un variateur de vitesse intégré dans une chaîne de production, il est facile d'imaginer que la consigne en vitesse ou en puissance évolue selon un cycle de fonctionnement prédéfini par le processus de fabrication, mais que des fluctuations plus ou moins importantes viennent se superposer à celle-ci par l'action des boucles de régulation ou de paramètres extérieurs.

5.3 Modélisation

Selon la façon d'appréhender les relevés des courants, deux modélisations ont été mises en œuvre au sein du laboratoire. La première est issue de l'étude des processus stochastiques non stationnaires et la seconde est une adaptation des outils destinés à l'analyse fréquentielle de signaux pseudo-périodiques.

5.3.1 Série temporelle

L'observation d'une évolution temporelle du courant et en particulier la présence d'une composante saisonnière, noyée dans des variations très rapides et aléatoires, suggère que ce courant soit issu d'un processus stochastique non-stationnaire. Dans ces conditions, les techniques de modélisation développées dans le précédent chapitre ne peuvent plus s'appliquer directement. Le recours à un modèle stochastique fondé sur le principe des séries temporelles semble alors mieux adapté.

Une série temporelle correspond à une suite de données x_t , observées à chaque instant t sur une période T_0 . En considérant chaque donnée comme la réalisation d'une variable aléatoire X_t , la série chronologique $\{x_t, t \in T_0\}$ devient la réalisation d'une famille de variables aléatoires $\{X_t, t \in T_0\}$ représentant le processus stochastique. La modélisation mathématique repose sur l'idée que chaque variable aléatoire X_t est la somme d'une composante déterministe définie par une fonction plus ou moins complexe et d'une composante aléatoire considérée comme un bruit blanc et retrouvant de fait des propriétés de stationnarité.

Le choix du modèle décrivant la composante déterministe est guidé par l'observation de la série chronologique $\{x_t, t \in T_0\}$. Cette première analyse doit permettre de dégager quelques caractéristiques simples : évolution temporelle lente, phénomène répétitif et périodique, etc... L'une des modélisations fréquemment employée se compose de trois termes et peut s'écrire :

$$X_t = M_t + S_t + \varepsilon_t \quad (20)$$

où M_t , S_t et ε_t désignent respectivement :

- la composante moyenne de la série, définie par une fonction temporelle à évolution lente,
- la composante saisonnière, définie par une fonction périodique de période T connue,
- la composante aléatoire, considérée comme un bruit blanc.

Selon le phénomène physique observé, toutes les composantes ne sont pas systématiquement présentes. Les techniques de décomposition du signal permettant d'identifier chaque composante sont nombreuses et largement détaillées dans les ouvrages spécialisés [Abadie_79] [Brockwell_96]. Ces techniques offrent la possibilité de modéliser la composante déterministe par des fonctions du temps et notamment à l'aide de polynômes. Compte tenu de notre exemple, l'application des méthodes de 'faible tendance' et de la moyenne glissante a permis de caractériser l'évolution du courant pendant les périodes diurnes (figure 35). Les variations du courant durant les nuits ont été supposées purement aléatoires et traitées selon une approche stochastique.

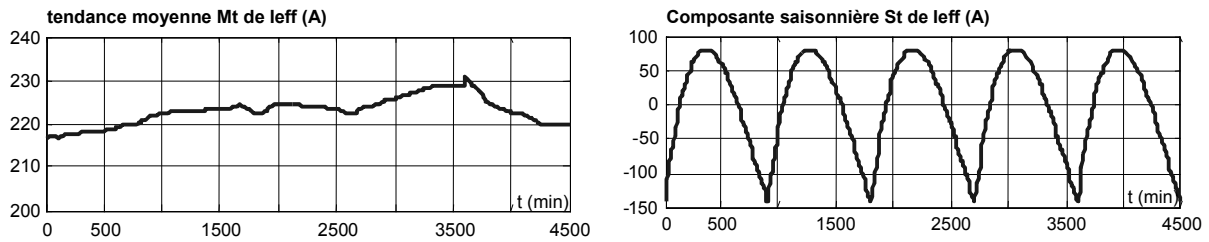


figure 35 : tendance moyenne et composante saisonnière de Irms en période diurne

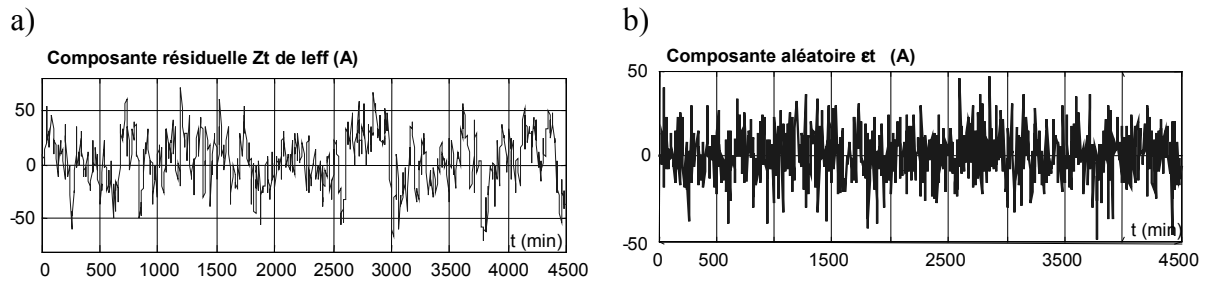


figure 36 : (a) composante résiduelle et (b) aléatoire de Ieff en période diurne

La composante déterministe ayant été identifiée, la composante résiduelle Z_t est alors supposée être un bruit blanc ($Z_t = \varepsilon_t$). Celle-ci se définit à l'aide d'une loi normale de moyenne nulle et de variance σ_{ε}^2 . Cependant, l'expérience a montré que la composante résultante Z_t pouvait ne pas correspondre à un bruit blanc et que les données étaient susceptibles de présenter encore une corrélation temporelle entre elles (figure 36a). Dans ce cas, la procédure d'identification doit être poursuivie jusqu'à l'extraction d'un bruit blanc (figure 36b).

Dans cet objectif, nous avons opté pour un modèle auto-régressif établi sur la grandeur résultante Z_t . Ce modèle, défini par la fonction récursive (21), permet de caractériser l'existence d'une dépendance temporelle liant les valeurs de la grandeur Z_t en différents instants, tout en tenant compte de variations stochastiques, par la sommation d'une variable aléatoire ε_t .

$$Z_t - \phi_{p,1} Z_{t-1} - \phi_{p,2} Z_{t-2} - \dots - \phi_{p,p} Z_{t-p} = \varepsilon_t \quad \text{où } \varepsilon_t \sim \text{WN}(0, \sigma_{\varepsilon}^2) \quad (21)$$

La construction de ce modèle auto-régressif d'ordre p et noté 'AR(p)' implique la réalisation de trois étapes fortement dépendantes les unes des autres :

- l'identification de l'ordre du modèle,
- l'estimation de ses paramètres $\phi_{p,j}$ ($j=1, \dots, p$),
- l'évaluation de la variance du bruit blanc σ_{ε}^2 .

Il faut noter que le choix de l'ordre du modèle est primordial. En effet, un ordre trop élevé conduirait à une sur-paramétrisation du modèle et à une adéquation presque parfaite de celui-ci aux données à partir desquelles il aurait été établi, ce qui minimiserait l'influence de l'aspect aléatoire du processus. Inversement, un ordre trop petit amènerait une surévaluation de la composante aléatoire et sous-estimerait la dépendance temporelle des données. Le calcul d'un facteur de pénalité, tel que le critère de Akaike [Brockwell_96] apporte dans ces conditions une aide précieuse dans le choix de l'ordre 'optimal' du modèle.

En utilisant ces modélisations, le courant absorbé par le bâtiment universitaire se décompose en trois termes :

- une composante moyenne M_t décrite par une fonction polynomiale,
- une composante cyclique S_t représentée également par un polynôme,
- un modèle auto-régressif d'ordre p $Z_t = \phi_{p,1} Z_{t-1} + \phi_{p,2} Z_{t-2} + \dots + \phi_{p,p} Z_{t-p} + \varepsilon_t$

Selon le rang harmonique considéré, les paramètres de chacune de ses composantes sont données dans le Tableau 12 et le Tableau 13. L'un des principaux avantages de cette modélisation est de pouvoir caractériser le comportement *a priori* complexe des harmoniques à l'aide d'un nombre restreint de paramètres. D'autre part, elle peut s'appliquer à des évolutions temporelles du courant (ou de la tension) qui ne présenteraient pas nécessairement un phénomène répétitif et cyclique.

	composante moyenne $M_t = a_0 + a_1.t + a_2.t^2 + \dots + a_k.t^k$					composante saisonnière $S_t = a_0 + a_1.t + a_2.t^2 + \dots + a_k.t^k$				
	a0	a1	a2	a3	a4	a0	a1	a2	a3	a4
I _{eff}	168.7	$2.89.10^{-5}$	$4.73.10^{-10}$	$-2.04.10^{-15}$		-122.83	0.025	$-7.19.10^{-7}$	$4.99.10^{-12}$	
I _{h3}	38.12	$-1.61.10^{-4}$	$-9.3.10^{-10}$	$-1.65.10^{-15}$		-32.13	0.006	$-1.49.10^{-7}$	$9.01.10^{-13}$	
I _{h5}	10.55	$4.07.10^{-5}$	$-2.70.10^{-10}$	$-4.34.10^{-16}$	$4.43.10^{-21}$	$-1.57.10^3$	0.064	$-9.77.10^{-7}$	$6.62.10^{-12}$	$-1.67.10^{-17}$

Tableau 12 : valeurs des coefficients d'interpolation des composantes moyenne et saisonnière

	ordre p	$\phi_{p,1}$	$\phi_{p,2}$	$\phi_{p,3}$	$\varepsilon_t : N(\quad , \sigma)$
I _{eff}	3	0.729	0.034	0.0512	$\mu = 0.73A ; \sigma = 14.24A$
I _{h3}	3	0.781	0.327	-0.209	$\mu = 0A ; \sigma = 2.62A$
I _{h5}	2	0.854	0.022		$\mu = 0A ; \sigma = 1.04A$

Tableau 13 : paramètres des modèles AR(p)

5.3.2 Décomposition fréquentielle

Dans notre exemple, l'observation des variations du courant absorbé par l'établissement universitaire (figure 34), montre clairement que celles-ci se reproduisent d'un jour à l'autre de manière relativement semblable, tout au moins du lundi au vendredi. En ne considérant que ces jours ouvrables de la semaine, le profil du courant laisse à penser que celui-ci pourrait se décrire par une composante journalière périodique ou pseudo-périodique associée à une composante aléatoire pour traduire les fluctuations rapides et non prévisibles dues au fonctionnement des charges.

La modélisation du comportement temporel de la grandeur électrique se décomposerait alors en deux parties. La première correspondant aux variations déterministes serait décrite par les composantes fréquentielles obtenues par une transformation de Fourier. La seconde qui traduirait le comportement aléatoire du courant consommé se caractériserait par une loi de probabilité. Cette décomposition suppose alors que la partie aléatoire soit stationnaire sur la période d'observation du signal.

Selon le signal étudié et sa durée d'observation, la question de sa périodicité et de sa stationnarité doit se discuter et guider la définition des périodes de fonctionnement pouvant être modélisées simultanément. Dans le cas présent, l'objectif est principalement d'exposer une nouvelle modélisation possible du comportement temporel d'une grandeur électrique et non d'étudier précisément les régimes de fonctionnement de cette installation.

Pour notre exemple, nous avons modélisé l'allure du courant [Miègeville_06] sur l'ensemble des jours ouvrables, en ne considérant que la période diurne afin de satisfaire aux hypothèses de stationnarité. Les variations de courant pendant la période nocturne ont été considérées comme purement aléatoire et traitées comme telles car leurs caractéristiques statistiques étaient très différentes de celles calculées sur les périodes diurnes. L'algorithme de FFT étant appliqué sur chaque composante harmonique du courant, nous obtenons ainsi un spectre fréquentiel pour chacune d'entre elles, comme l'illustre la figure 37.

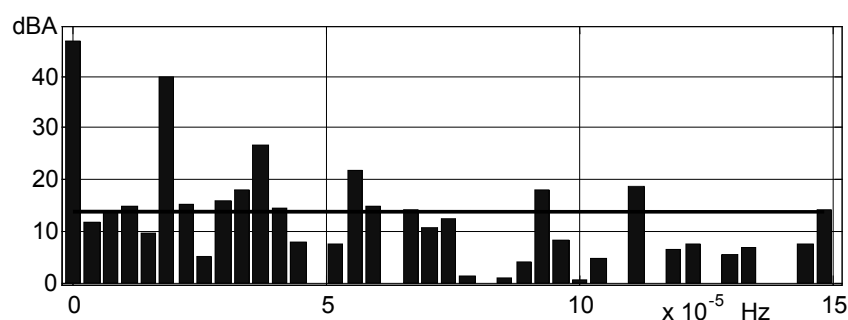


figure 37 : décomposition fréquentielle de I_{eff} sur les périodes diurnes

Trois types de composantes fréquentielles se distinguent de ces spectres :

- la valeur moyenne et les raies non multiples de la fréquence du comportement saisonnier qui, si elles existent, fournissent l'évolution 'lente' du signal sur toute sa durée d'observation,
- les raies d'amplitude élevées et multiples de la fréquence du comportement saisonnier (ici 1 jour), décrivent le comportement périodique des variations et caractérise la composante saisonnière de l'évolution temporelle du signal,
- les raies de plus faibles amplitudes ou inférieures à un seuil donné sont supposées ne pas être suffisamment représentatives des variations déterministes et par conséquent, seront assimilées à des variations aléatoires, au même titre que du bruit.

La composante déterministe du signal étant caractérisée par les principales raies fréquentielles des spectres, son expression temporelle est obtenue par transformation de Fourier inverse (figure 38a). La partie supposée aléatoire Z_t est calculée (figure 38b) après extraction de la composante déterministe (moyenne 'lente' + composante saisonnière) au signal mesuré. Ce résidu 'aléatoire' Z_t peut alors être décrit par une loi de probabilité. Dans le cas d'un courant absorbé par une multitude de charges, ce résidu peut s'assimiler aisément à un 'bruit blanc' et se représente alors par une loi normale.

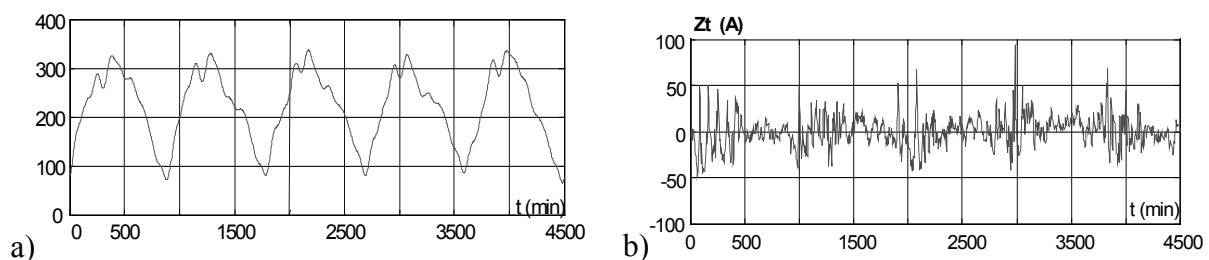


figure 38 : (a) composante déterministe et (b) résiduelle Z_t (supposée aléatoire)
I_{eff} en période diurne

5.4 Reproduction

Quel que soit le modèle adopté, l'évolution temporelle de la grandeur électrique est alors facilement reproduite par le calcul des fonctions temporelles et par le tirage d'une variable aléatoire selon la loi de probabilité établie. Dans le cas de l'emploi d'un modèle auto-régressif, une phase d'initialisation est nécessaire pour calculer les valeurs correspondant aux premiers instants.

A partir des modélisations précédemment définies, la figure 39 montre le résultat de la reproduction du comportement temporel du courant absorbé par l'établissement d'enseignement sur cinq jours ouvrables. Dans le cas présent, les deux modélisations conduisent à des évolutions du courant similaires et en bonne concordance avec les mesures effectuées (figure 34 – périodes diurnes). Ces résultats montrent ainsi la faisabilité de mettre en œuvre de telles modélisations et leur adaptation à la description des variations temporelles des grandeurs électriques.

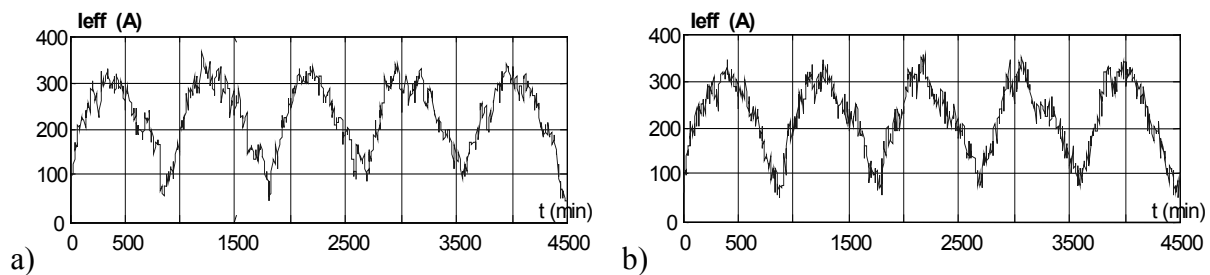


figure 39 : reproduction de I_{eff} diurne : a) série temporelle, b) décomposition fréquentielle

5.5 Prévision

La reproduction de l'évolution temporelle d'une grandeur électrique vient d'être démontrée précédemment. Dans le cadre d'une étude prévisionnelle, cette reproduction peut être mise à profit pour évaluer les perturbations susceptibles d'être générées dans le réseau de distribution pour d'autres configurations de celui-ci (exemple : alimentation par groupe autonome) ou en présence d'autres charges dont le fonctionnement temporel serait également connu et décrit de manière semblable [Miègeville_02B].

Faute de situation réelle à notre disposition, ce type d'étude n'a pas été mené. En revanche, à partir des modélisations déjà effectuées, nous avons pu comparer les prévisions sur le courant absorbé par l'établissement d'enseignement à une deuxième campagne de mesures, réalisée sur une semaine d'une autre période de l'année. Les simulations (figure 40) reproduisent alors assez fidèlement le comportement de l'installation, sans pour autant être identiques puisque la partie aléatoire est par définition imprévisible.

Dans le contexte d'une étude prévisionnelle, il peut être cependant plus opportun de compléter les simulations en définissant un intervalle de confiance pour une probabilité donnée, que de fournir le simple tracé de l'évolution temporelle, sujet à des variations d'une simulation à une autre en raison de l'influence de la composante aléatoire. La figure 41 donne une illustration de ce type de résultat. Les enregistrements ont montré un niveau harmonique anormalement

élevé lors du lundi de cette deuxième semaine de mesures, peut être en relation avec un jour 'EJP'. A l'exception de ce lundi, les mesures sont correctement encadrées par l'intervalle de confiance, démontrant ainsi les capacités 'prévisionnelles' de la modélisation.

Les prévisions sont d'autant plus réalistes que le comportement de l'installation est proche de celui ayant servi à la modélisation. Concernant l'établissement universitaire étudié, nous noterons cependant que son activité est susceptible de changer d'une semaine à l'autre, ce qui semble se voir sur la figure 41 par une légère augmentation globale du courant efficace et surtout de l'harmonique de rang trois. Les résultats pourraient être encore plus performants sur des unités de production par exemple, où les processus de fabrication sont moins sujets à modifications.

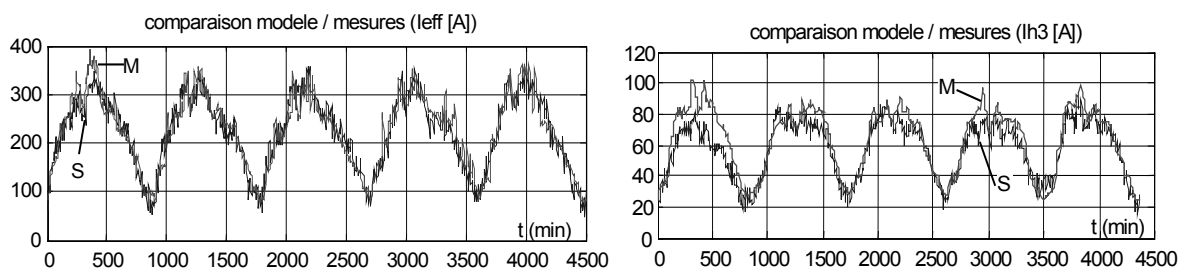


figure 40 : comparaison entre les mesures (M) de la 2^{ème} semaine et les simulations (S) prévisionnelles

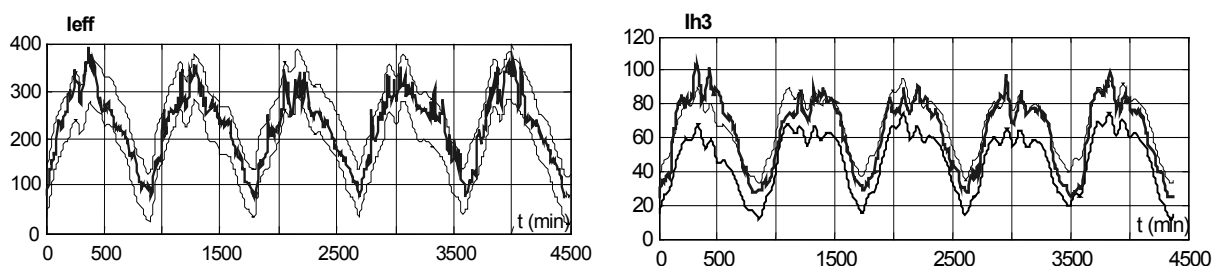


figure 41 : comparaison entre les mesures de la 2^{ème} semaine et les prévisions pour un intervalle de confiance à $\pm 95\%$

5.6 Conclusion

Deux techniques de modélisation des variations temporelles d'une grandeur électrique ont été proposées et appliquées à titre d'exemple au courant efficace et aux perturbations harmoniques de l'alimentation d'un bâtiment universitaire. A partir d'une composante déterministe fonction du temps et d'une composante aléatoire, soit au total un nombre réduit de paramètres, ces représentations permettent de reproduire et prévoir l'évolution temporelle de la grandeur électrique. Parmi les perspectives de ce travail, il est envisagé de regrouper les deux modélisations (série temporelle et analyse fréquentielle) en une seule.

Lorsque les prévisions portent sur les effets thermiques susceptibles d'être engendrés par la circulation de courants non sinusoïdaux, l'information temporelle sur l'évolution des courants fondamentaux et harmoniques est tout aussi importante que celle sur l'amplitude. En effet, c'est l'énergie dissipée sur une durée donnée qui conditionne les échauffements. A titre d'application, toujours au sujet du bâtiment d'enseignement déjà cité, la température moyenne du transformateur d'alimentation a pu être estimée à partir de la simulation des allures temporelles des courants fondamentaux et harmoniques [Miègeville_00A]. Cet exemple démontre alors la faisabilité de telles prévisions et la richesse des informations qu'il est possible d'en attendre.

De même, pour les études de vieillissement, c'est la durée d'application des contraintes qui intervient sur la durée de vie des matériels, comme les surtensions vis-à-vis des diélectriques. L'information temporelle contenue dans les modélisations proposées pourrait ainsi être utilement employée pour évaluer la durée de vie d'un équipement en tenant compte plus précisément des régimes de fonctionnement et des contraintes qui lui sont imposées.

6 CARACTERISATION EN AMPLITUDE ET EN DUREE

6.1 Introduction

Les travaux précédents ont montré la possibilité et l'intérêt de prendre en compte les variations des régimes de fonctionnement des convertisseurs et des perturbations qu'ils génèrent, lorsque ces derniers pouvaient être considérés comme purement aléatoires ou associés à un comportement déterministe notamment périodique. Dans ce dernier cas, la caractérisation temporelle des perturbations apporte des informations supplémentaires sur les contraintes électriques et thermiques susceptibles d'être engendrées sur les matériels.

Ce type d'informations devient également utile lorsque les variations des grandeurs électriques (puissance, courant, tension) peuvent être supposées entièrement aléatoires sans distinction possible d'une évolution temporelle déterministe. Les harmoniques de rangs élevés des cas d'études du chapitre précédent en sont un exemple. Par rapport au chapitre 4, nous allons tenter ici d'apporter une information sur le comportement temporel toujours en terme de probabilité, en complément des propriétés déjà fournies sur les amplitudes.

6.2 Observation

La figure 42 illustre l'évolution du courant absorbé par un convertisseur de propulsion d'un navire de croisière durant ses premiers essais à la mer. Les installations électriques, dont la propulsion, étant soumises à des séries de test, leur fonctionnement et les courants absorbés sont fortement variables et non prévisibles. L'observation du courant efficace (figure 42a) montre néanmoins des plages de fonctionnement plus ou moins stables sur certaines périodes entraînant tout de même de petites variations pour les courants harmoniques (figure 42b).

Contrairement au chapitre précédent, il ne se dégage pas ici de comportement cyclique ou saisonnier dans le fonctionnement de la propulsion. Une certaine corrélation temporelle existe entre les courants harmoniques et le courant efficace ; celui-ci pouvant être considéré comme une image de la puissance absorbée. Cependant, celle-ci s'estompe avec l'augmentation du rang harmonique considéré. D'après la figure 42, si l'évolution de l'amplitude des harmoniques est plus ou moins aléatoire, nous pouvons remarquer que la durée où cette amplitude est maintenue varie également de manière importante et *a priori* non prévisible.

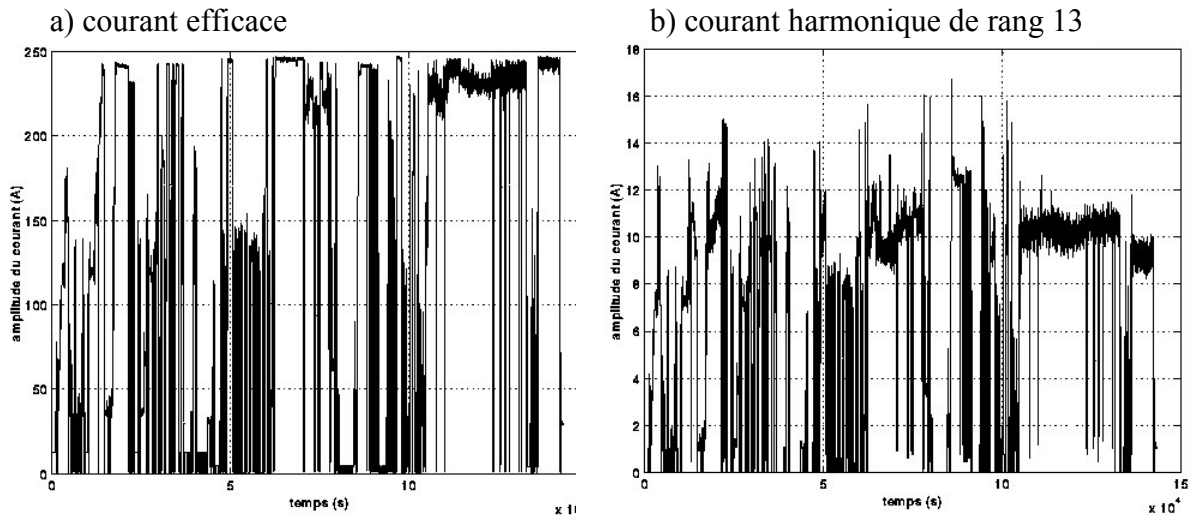


figure 42 : variations temporelles des courants de ligne d'un système de propulsion

L'enregistrement des grandeurs électriques doit respecter quelques précautions quant à la période d'échantillonnage des signaux afin que les observations et les analyses puissent être menées correctement. La campagne de mesure se déroulant généralement sur une longue durée, une fréquence d'échantillonnage élevée conduit à un volume de données à traiter inutilement important. Inversement, une fréquence trop faible risque d'entraîner une perte d'informations en omettant certaines fluctuations. Une connaissance *a priori* du fonctionnement des charges, de leurs constantes de temps électriques, mécaniques et thermiques doit guider au choix le plus approprié de cette période d'échantillonnage.

6.3 Identification

6.3.1 Détermination des durées

Compte tenu des précédentes observations, l'identification de la grandeur électrique étudiée doit porter sur les variations tant en amplitude qu'en durée. L'amplitude du signal est directement accessible à partir des mesures et son identification par une approche stochastique a déjà été traitée. L'information sur la durée d'application d'une amplitude donnée doit, quant à elle, se déduire du traitement de l'évolution temporelle.

Prenons pour illustration l'évolution du courant harmonique de la figure 42. Chaque valeur d'amplitude est affectée à une classe $[I_{hi}^- ; I_{hi}^+]$ de largeur $\Delta i = I_{hi}^+ - I_{hi}^-$. Toutes les valeurs attribuées à une même classe sont alors identifiées à une valeur unique, le plus souvent la demi somme des extrémités de la classe $J_{hi} = (I_{hi}^+ + I_{hi}^-)/2$. Selon la figure 43a, le nombre de valeurs consécutives appartenant à une même classe à $\pm \Delta i/2$ définit la durée de maintien dT de l'amplitude du signal au niveau moyen J_{hi} .

Cette technique initialement proposée par [Kaprielian_94] a été préférée à la recherche du temps correspondant à une amplitude constante. En effet, deux valeurs d'amplitudes sont rarement strictement égales, ne serait ce qu'en raison des incertitudes de mesure de la chaîne d'acquisition. Il faut cependant remarquer que le choix de la largeur des classes Δi influence la définition des durées dT correspondantes. Dans la pratique, nous avons adapté cette technique par l'introduction d'un 'hystérésis' afin de réduire l'effet de 'seuil' des extrémités des intervalles conduisant à des changements arbitraires de classe.

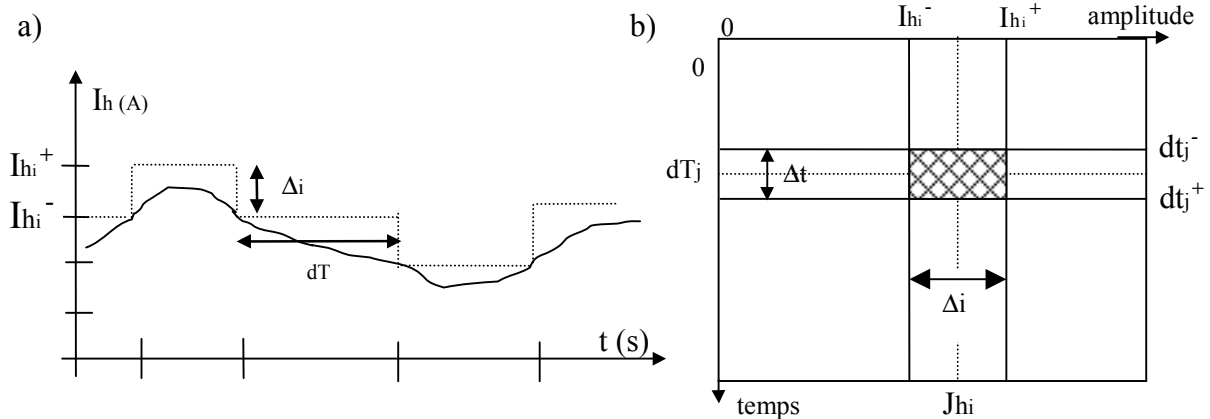


figure 43 : traitement des données

a) classe d'amplitude et détermination des durées ; b) classement en amplitude et durée

6.3.2 Histogramme des occurrences

La classification des amplitudes et la détermination des durées qui en découle sont réalisées sur toute la période d'observation du signal. Les valeurs de durée dT ainsi obtenues sont à leur tour ordonnées en classe $[dT_j^- ; dT_j^+]$ associée à une durée moyenne $dT_j = (dT_j^+ + dT_j^-)/2$. Ainsi l'évolution temporelle de la grandeur observée est identifiée par une série statistique bivariée $\{ (J_h, dT)_k, k=1, \dots, N \}$ correspondant au couple de variables aléatoires {amplitude-durée}.

Chaque couple de valeurs $(J_h, dT)_k$ de la série statistique peut alors être attribué à un intervalle (J_{hi}, dT_j) selon le découpage en classes du plan amplitude-durée de la figure 43b. Après comptage du nombre de données affectées à chaque classe, l'histogramme des occurrences définissant une 'surface de répartition' peut être construit, de manière similaire à la courbe de répartition sur l'amplitude présentée au chapitre 4. Le principe est semblable mais dans le cas présent, une dimension supplémentaire est requise pour décrire le comportement vis-à-vis du temps.

Appliqué à notre exemple de la propulsion d'un navire, le traitement du courant harmonique donne l'histogramme des occurrences de la figure 44a. Le choix de la largeur des classes est également important pour l'exploitation du graphique. Une échelle logarithmique a par exemple été choisie sur l'axe des durées de l'histogramme afin d'avoir un découpage relativement fin concernant les événements de courte durée, qui sont par ailleurs les plus nombreux. De plus, les intervalles sont de largeur croissante permettant d'affecter un nombre représentatif d'observations aux classes de durée longue, sans devoir créer de classes intermédiaires vides. Enfin, la question de la représentation graphique des données statistiques est importante car selon les choix effectués, certaines informations peuvent être mises en évidence ou au contraire masquées. Par exemple, les mêmes données présentées sous la forme d'une densité de probabilité conjointe (figure 44b) donne lieu à une allure générale très différente de la représentation 3D où certains événements (ex : intensité de 11A pendant 2100s) ne sont plus visibles du fait de leur faible nombre et d'une surface de classe plus importante.

Si une visualisation dans l'espace à trois dimensions n'est pas toujours aisée, le tracé des lignes de niveau correspondant à un nombre d'occurrences constant des couples {amplitude-durée} permet parfois d'interpréter plus facilement les données. D'après la figure 45, la présence de quelques situations particulières est identifiable :

- ① des courants d'amplitude élevée (13 à 14A) mais de courtes durées (<100s),
- ② des courants d'amplitude moins élevée (~10A) mais sur de plus longues durées (~1000s),
- ③ de faibles courants mais sur de longues durées.

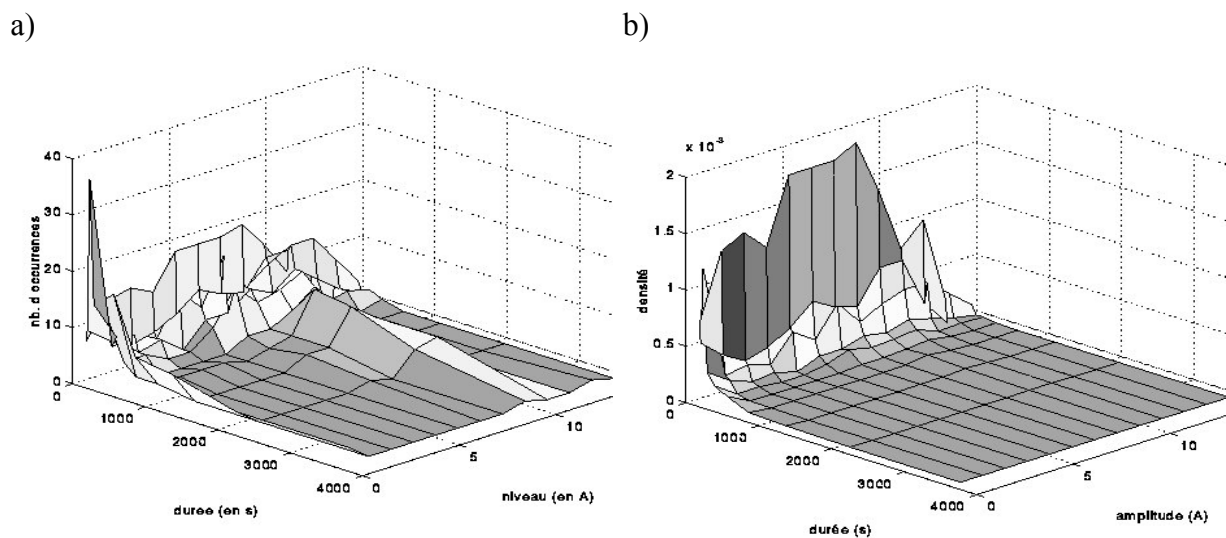


figure 44 : courant harmonique de rang 13

a) histogramme des occurrences ; b) densité de probabilité conjointe

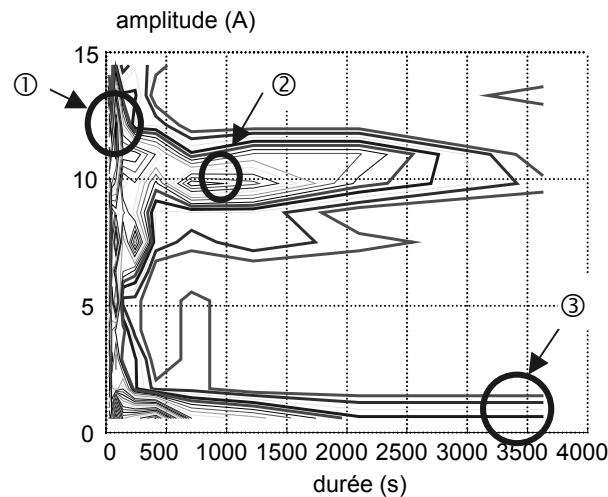


figure 45 : lignes de niveaux des occurrences du courant harmonique de rang 13

Ces informations relatives à l'amplitude et à la durée de maintien permettent de distinguer les surcharges lentes des surintensités et de mettre en évidence les régimes de fonctionnement les plus contraignants vis-à-vis des matériels électriques raccordés au réseau de distribution.

6.3.3 Lois marginales

A partir des histogrammes des occurrences ou des fonctions de densité de probabilité conjointe, il est possible d'estimer la probabilité pour qu'une amplitude J_{hi} soit maintenue pendant une durée dT_j . En intégrant par rapport à l'une ou l'autre des variables, nous obtenons les fonctions de répartition marginales de la figure 46. Ces courbes représentent la probabilité de ne pas dépasser une valeur donnée d'amplitude (J_{ho}) ou de durée (dTo).

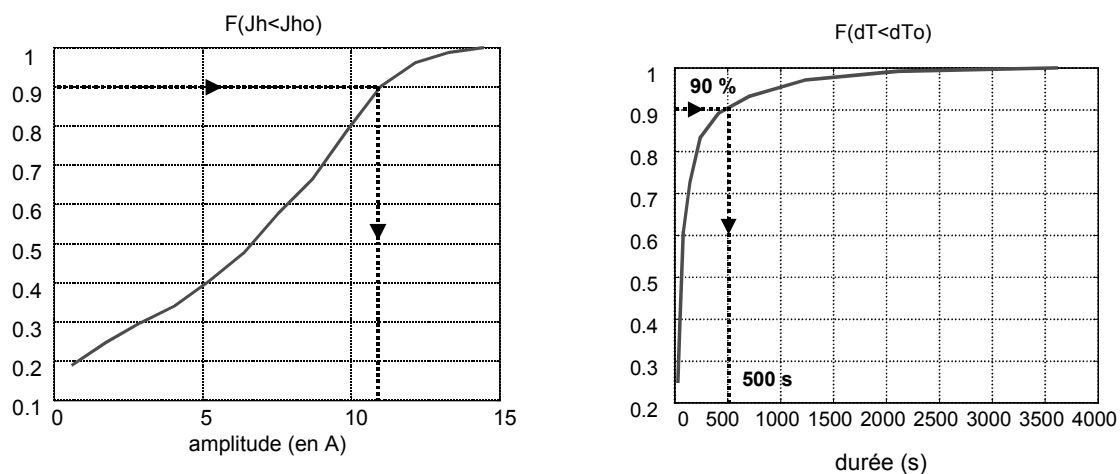


figure 46 : loi de probabilité marginale a) sur l'amplitude ; b) sur la durée

Si la courbe de répartition sur l'amplitude a déjà pu être étudiée, celle relative à la durée de maintien d'une amplitude est par contre nouvelle. Cependant, elle est d'un intérêt limité car si elle permet de quantifier la probabilité qu'un courant ne soit pas appliqué pendant plus d'une durée donnée, aucune information n'est fournie quant à l'amplitude de ce courant. Or, les conséquences sont alors très différentes si celui-ci est de faible ou de forte intensité.

6.3.4 Lois conditionnelles

Pour une interprétation optimale des données, les informations sur l'amplitude et la durée doivent être jumelées. Ceci est réalisé par la détermination des lois de probabilité conditionnelle, déduites de la fonction de densité de probabilité conjointe (figure 44). Pour une valeur de courant $J_h = J_{hi}$ imposée, la loi conditionnelle sur la durée $F(dT < dT_o \mid J_h = J_{hi})$, définit la probabilité de ne pas excéder une certaine durée dT_o . Par exemple, d'après la figure 47a, un courant de 11A aurait une probabilité de 90% de ne pas être appliqué au delà de 1000s.

De la même manière, la loi conditionnelle sur l'amplitude $F(J_h < J_{ho} \mid dT = dT_j)$ définit la probabilité de ne pas dépasser un certain courant J_{ho} sur une durée $dT = dT_j$ donnée. En considérant par exemple la figure 47b, il existe 90% de chance de ne pas excéder un courant de 11A pendant une durée de 500s. Cette information peut également s'interpréter par 10% de risque que le courant dépasse 11A sur une durée de 500s.

Ces lois conditionnelles expriment directement le risque des surcharges potentielles vis-à-vis d'un matériel et permettent d'apprécier les capacités de celui-ci à supporter ces contraintes, si ses constantes de temps, notamment thermiques, sont connues.

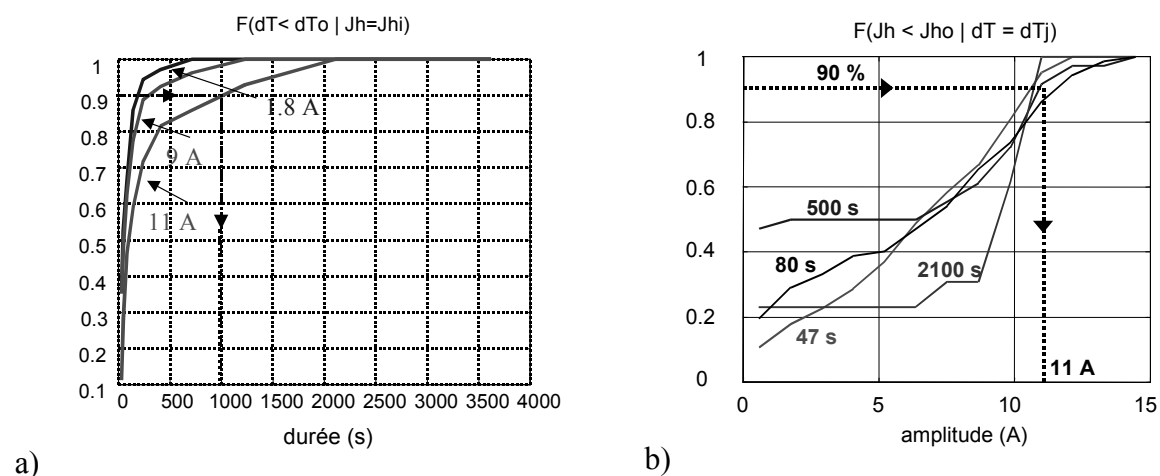


figure 47 : loi de probabilité conditionnelle a) sur la durée ; b) sur l'amplitude

6.4 Modélisation

Le fait de prendre en considération l'aspect temporel, soit des grandeurs électriques, soit du régime de fonctionnement des charges non linéaires, ne modifie pas fondamentalement les modélisations proposées au chapitre 2. Les convertisseurs de puissance sont toujours représentés par des sources de courant injectant des courants harmoniques dans le réseau de distribution. Les valeurs des courants générés par ces sources peuvent être définies par des lois de probabilité où le temps et l'amplitude apparaissent désormais comme des variables aléatoires.

Auparavant, les grandeurs électriques étaient caractérisées par des lois de probabilité à une variable pour l'amplitude ou à deux variables si la phase et l'amplitude étaient considérées simultanément. A présent, l'introduction de la durée de maintien comme nouvelle variable aléatoire oblige à employer des lois de probabilité conjointe à deux variables (amplitude-durée), voire même trois variables (amplitude-phase-durée), si l'information sur la phase doit être prise en compte. Avec cette dernière donnée, la fonction de densité de probabilité conjointe est décrite dans un espace de dimension quatre. Si le maniement de telles fonctions ne pose pas de difficultés à un mathématicien, il n'en est pas toujours de même à un électrotechnicien, plus habitué aux représentations visuelles dans un espace physique à trois dimensions.

Indépendamment de ces considérations, la modélisation du comportement des grandeurs électriques par des lois de probabilité multi-variables se heurte au problème de la définition de telles fonctions. Dans la littérature 'classique' traitant de la théorie des probabilités, les exemples concrets de fonctions multi-variables se résument à la loi normale à deux dimensions, lorsque les variables sont supposées dépendantes et corrélées. C'est sans doute pour cette raison que le traitement théorique de la phase des harmoniques selon une approche stochastique se limite à des cas très particuliers [Pierrat_91A] descriptibles par des lois normales. Compte tenu de nos principales préoccupations, les recherches sur les fonctions multi-variables dépendantes n'ont pas été poursuivies, mais il serait souhaitable d'approfondir notre bibliographie spécifiquement sur ce thème des probabilités ou encore d'établir une collaboration avec des personnes compétentes dans ce domaine.

Dans tous les autres cas où les variables aléatoires peuvent être considérées comme indépendantes, le problème se simplifie grandement puisque la fonction de densité de probabilité conjointe peut alors s'exprimer comme le produit des fonctions marginales relatives à chaque variable. Celles-ci étant mono-variables, les outils mathématiques sont

alors mieux connus et les techniques de modélisation et de génération de ces fonctions employées dans le chapitre 4 s'appliquent de nouveau.

Objectivement, les travaux que nous avons menés sur la description du comportement stochastique des charges non linéaires ou de leurs perturbations ne nous permettent pas de formuler une conclusion générale sur l'hypothèse d'une dépendance ou indépendance entre les variables amplitude et durée. Les quelques exemples à notre disposition ayant fait l'objet d'une telle analyse (un convertisseur de propulsion et un ventilateur d'alimentation en air d'une chaudière) semblent indiquer une dépendance relativement forte, liée à des histogrammes des occurrences d'allure très particulière (voir figure 44). Cependant, ces exemples correspondent au fonctionnement d'un équipement isolé. Dans le cas d'une multitude de charges, en vertu du théorème central limite, il serait envisageable d'obtenir une description du comportement global par une loi normale multi-variables corrélées ou non.

6.5 Reproduction

Les travaux n'ayant pas été poursuivis jusqu'à une modélisation mathématique selon des lois de probabilité conjointe multi-variables, la question de la reproduction des phénomènes à partir de ces modèles n'a pas été traitée. Cependant, la démarche et les difficultés probables peuvent être déjà formulées, sur la base de l'expérience acquise dans les études du chapitre 4.

Supposons que la modélisation du comportement aléatoire d'une grandeur électrique soit réalisable en amplitude et en durée, par une loi de probabilité conjointe. Dans le cadre de cette hypothèse, une simulation de type Monte Carlo permettrait, soit de générer des courants selon une loi appropriée, soit de reproduire le régime aléatoire d'un convertisseur en imposant une corrélation entre puissance et durée de fonctionnement. Le calcul de la propagation des courants et des tensions résultantes s'effectuerait de manière classique. La répétition de ces calculs un grand nombre de fois aboutirait à un ensemble de données statistiques qui serait alors traité selon la précédente procédure d'identification. L'obtention des lois conjointes ou conditionnelles fournirait dès lors les informations utiles à l'exploitation de ces simulations, telles que le risque de dépasser certains courants ou tensions pendant un temps donné, en référence aux valeurs tolérables par les matériels ou recommandées par les normes.

Cette démarche est en réalité une extension de la simulation de Monte Carlo proposée au § 4.4. Néanmoins, quelques difficultés apparaissent dès à présent :

- la création d'un générateur aléatoire de plusieurs variables dépendantes et décrites par une loi de probabilité multi-variables ne semble pas évidente et n'est pas traitée dans les ouvrages à notre disposition,
 - dans le cas de plusieurs charges, une gestion du temps doit être intégrée à l'algorithme de Monte Carlo afin de tenir compte de leurs durées de fonctionnement respectives,
 - enfin, compte tenu de la remarque précédente, le nombre de situations et donc de calculs doit être suffisamment important pour être statistiquement représentatif.
- Ces difficultés n'apparaissent pas techniquement insurmontables et cette démarche pourrait conduire au développement d'un outil spécifique de simulation.

6.6 Prédiction

La prédiction des perturbations harmoniques n'a pas été abordée selon le principe de reproduction proposé précédemment. Néanmoins, afin de montrer l'intérêt de l'analyse statistique en amplitude et en durée et l'exploitation qui pouvait en être faite, l'estimation de l'échauffement d'un transformateur soumis à des courants harmoniques a été étudiée [Miègeville_98A]. A partir de l'enregistrement temporel des courants harmoniques traversant le transformateur d'alimentation, les histogrammes des occurrences ainsi que les lois conditionnelles ont été établis et analysés. La figure 48 donne une illustration de ces résultats pour le fondamental. Trois régimes de fonctionnement ont été déduits de ces graphiques : ① surcharge pendant 3 minutes, ② surcharge pendant 15 minutes, ③ régime supposé permanent.

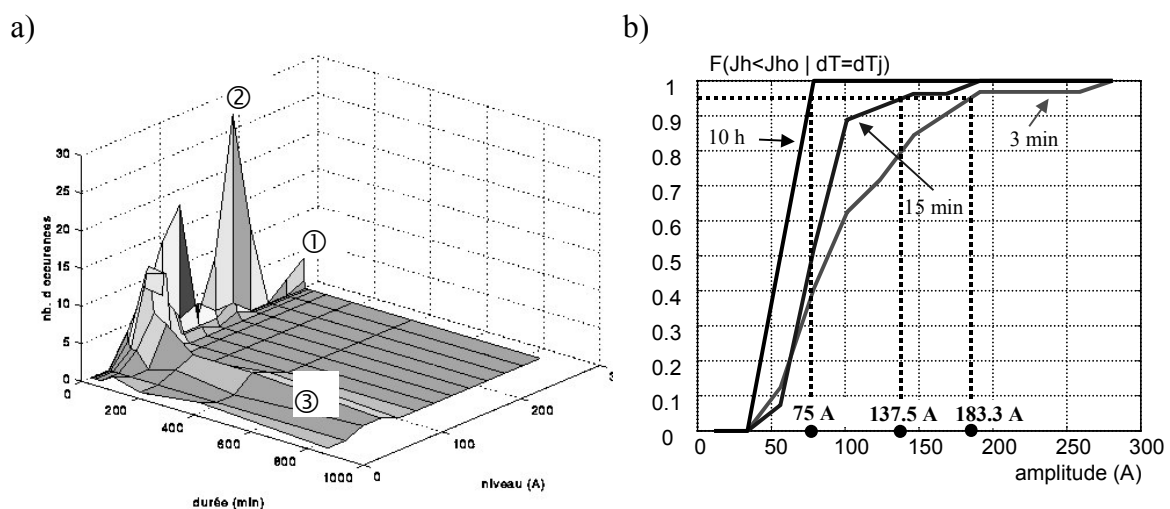


figure 48 : ventilateur / traitement statistique du courant fondamental

a) histogramme des occurrences ; b) lois conditionnelles

L'objectif de cette étude était d'estimer les capacités thermiques d'un transformateur d'une puissance de 112 kVA, définie à partir du régime de fonctionnement permanent ③, à accepter les surcharges ① et ②. Les intensités des courants harmoniques du Tableau 14, ont été extraites des lois conditionnelles en considérant une durée de 3 et 15 minutes pour une probabilité de 95% (figure 48b). Le transformateur étant supposé à l'équilibre thermique correspondant au courant permanent ③, l'application des surcharges électriques a fourni les élévations de la température moyenne du transformateur reportées au Tableau 15. La modélisation et la simulation thermique du transformateur n'étant pas l'objet de ce mémoire, nous renvoyons le lecteur intéressé par ce sujet, aux ouvrages de la bibliographie [Miègeville_99] [Olivier_98].

Le Tableau 15 montre que ce transformateur, dimensionné pour une puissance nominale de 112 kVA, serait capable d'accepter thermiquement ces deux surcharges électriques. Le fait de caractériser les surcharges probables en amplitude mais également en durée permet ainsi d'estimer précisément le comportement thermique d'un équipement et donc sa tolérance vis-à-vis des contraintes qui lui sont appliquées. Dans cet exemple, la puissance du transformateur devrait être de 300kVA pour supporter en permanence le régime de fonctionnement ①, alors que cette étude prévisionnelle plus fine démontre qu'une puissance de 112 kVA pourrait suffire, d'où un gain potentiel non négligeable.

	P	ΔT (min)	I_1 (A)	I_{11} (A)	I_{13} (A)	I_{eff} (A)
cas de fig. ①	95 %	3	183.3	18.3	7.75	184.4
cas de fig. ②	95 %	15	137.5	10.6	6	138

Tableau 14 : amplitudes des courants déduits des lois de probabilité pour les cas ① et ②

	Pertes Joule (kW)	Pertes suppl. (W)	θ_{fin} (°C)	$ \theta_{ ③} - \theta_{fin} $ (°C)
rég. permanent ③	1.59	79	112.5	
cas de fig. ①	9.73	407.3	122.4	9.9
cas de fig. ②	5.67	187	136.5	24

Tableau 15 : calcul de la température de fonctionnement du transformateur et de ses pertes, suite à l'application d'un courant non-sinusoïdal pour chacun des cas ① et ②

6.7 Conclusion

Les travaux présentés dans ce chapitre montrent qu'il est possible de caractériser en amplitude et surtout en durée, une grandeur électrique (puissance d'une charge non linéaire, courant ou tension), même si le comportement de celle-ci est totalement aléatoire. Cette approche peut également compléter celle présentée dans le précédent chapitre pour traiter les harmoniques de rangs élevés dont l'évolution temporelle n'est plus identifiable de manière déterministe.

La représentation du comportement temporel des grandeurs électriques sous la forme de séries statistiques bivariées $\{J_h, dT\}_k$ considérant l'amplitude et la durée permet de caractériser des régimes de fonctionnement particuliers, grâce à l'analyse d'histogrammes des occurrences. A partir de ceux-ci, les fonctions de probabilité conditionnelle quantifient le risque selon lequel :

- une amplitude J_{ho} serait dépassée sur une durée donnée dT_j ,
- une amplitude J_{hi} serait maintenue au-delà d'une durée dT_o .

Ces informations recueillies pour tous les rangs harmoniques, y compris le fondamental, caractérisent en terme de probabilité, le risque de surcharge électrique appliquée à un matériel raccordé au réseau. Une confrontation aux spécifications techniques des constructeurs devrait alors indiquer la capacité des équipements à tolérer de telles surcharges.

Nos travaux n'ont pas exploré toute cette problématique puisque les aspects 'modélisation mathématique' et 'reproduction' n'ont pas été complètement traités pour des raisons de temps et de préoccupations scientifiques. Ces études pourraient être envisagées mais avec l'aide de personnes compétentes, afin d'optimiser la recherche bibliographique et théorique sur le sujet des lois de probabilité multi-variables.

Il faut toutefois noter une difficulté dans l'exploitation des méthodes et résultats statistiques proposés ici. Nous sommes capables de fournir en terme de probabilité, les risques de surcharge électrique et leurs caractéristiques en amplitude et en durée. Par contre, ce type d'informations est rarement disponible et, de surcroît, de manière très succincte dans les spécifications techniques des équipements. Une exploitation plus complète serait alors envisageable si les contraintes thermiques des matériels étaient définies par des courbes $I = f(T)$, telles que les courbes de fusion des fusibles ou de déclenchement des disjoncteurs.

Actuellement, ce manque d'informations auprès des constructeurs limite quelque peu les applications concrètes de ces méthodes d'analyse et de prévision. Pourtant, à travers l'exemple de l'estimation de l'échauffement d'un transformateur soumis à des courants harmoniques, l'intérêt de ces travaux, l'aide et enfin les gains qu'ils sont en mesure d'apporter dans le dimensionnement des matériels électriques ont été clairement mis en évidence.

3^{eme} Partie :

Les Perspectives de Recherche

7 QUALITE ET FIABILITE DES RESEAUX ELECTRIQUES

7.1 Introduction

Depuis plus d'une centaine d'années, la part de l'énergie électrique n'a cessé de croître, soit en remplaçant une autre source dans une application déjà existante, soit en s'intégrant directement dans de nouveaux dispositifs. Le passage de l'éclairage au gaz à l'électricité ainsi que le remplacement des transmissions mécaniques et des machines à vapeur par des moteurs électriques sont les deux principaux domaines où l'usage de l'électricité a pu se développer à la fin du 19^{ème} siècle et au début du 20^{ème}. Soit lors de la conception d'une installation, soit lors de son exploitation, il semble important de pouvoir anticiper les éventuels défauts ou dysfonctionnements susceptibles d'apparaître ou du moins d'en évaluer les risques. Cette anticipation des phénomènes fait intervenir la notion de prévision où, comme nous avons pu le démontrer, une approche stochastique peut conduire à des résultats plus proches des situations réellement observées. De plus, la souplesse d'utilisation de cette énergie a bien souvent favorisé la diffusion des moyens techniques qui l'employaient, comme dans l'exemple de la force motrice. L'observation d'un passé plus récent ou même encore de la période actuelle, montre que cette évolution ne s'est toujours pas arrêtée. Le concept de navires tout électrique, l'apparition des commandes électriques et de leurs actionneurs dans l'automobile ou l'aéronautique, laissent supposer que la tendance à un accroissement du rôle de l'électricité dans nos activités va certainement se poursuivre dans les années à venir.

En effet, l'apparition de l'électronique de puissance a permis une souplesse encore plus grande à l'emploi de l'énergie électrique et à un élargissement de son champ d'application. Depuis quelques décennies, les convertisseurs de puissance sont de plus en plus présents dans les équipements et leur nombre ainsi que leur puissance unitaire ne cessent d'augmenter. A titre d'illustration, le Tableau 16 offre un récapitulatif des charges domestiques dans une habitation 'tout électrique' et indique clairement l'omniprésence de ces convertisseurs dans notre vie quotidienne. Le même constat pourrait être réalisé dans l'industrie. L'éclairage fluorescent déjà largement répandu, s'équipe de ballasts électroniques et les machines outils numériques ou les unités de productions intègrent de nombreux variateurs de vitesse autorisant une plus grande souplesse dans les processus et les cadences de fabrication. Les progrès technologiques sur les composants semi-conducteurs permettent une montée en puissance des convertisseurs et désormais leur raccordement aux réseaux HTA est envisageable, leur offrant alors de nouvelles opportunités d'applications (liaison HVDC, FACTS, filtrage actif...). De même, ces convertisseurs interviennent désormais en tant qu'interfaces afin de rendre les

caractéristiques tension-fréquence de l'énergie compatibles entre des unités de production (ex : éolienne) et un réseau de distribution.

Les convertisseurs de puissance se retrouvent donc dans tous les secteurs d'activités, domestique, industriel, tertiaire et dans des équipements très variés de quelques milliwatts à plusieurs mégawatts. Avec les avancées techniques attendues dans la fabrication des composants, il est quasiment certain que cette tendance s'accroîtra dans les années à venir. Avec leur développement, la question de la qualité de l'énergie et l'étude des interactions entre convertisseurs ou entre réseaux et convertisseurs vont sans aucun doute continuer à faire l'objet de nombreux sujets de recherche. La cohabitation de tous ces matériels devra se faire au mieux, en respectant des règles élémentaires de compatibilité électromagnétique. Déjà, le raccordement des variateurs de vitesse dans les industries ou la prolifération des appareils de bureautique dans les bâtiments tertiaires, conduisent à des dysfonctionnements d'équipements 'sensibles', des disjonctions intempestives de lignes d'alimentation, des échauffements supplémentaires ou un vieillissement accéléré des matériels. Même si chaque appareil respecte individuellement les normes, leur connexion via le réseau de distribution et l'effet de leur nombre peut engendrer de fortes perturbations, soit par des interactions non contrôlées entre les matériels, soit par une modification des caractéristiques nominales des grandeurs électriques du réseau de distribution.

Désignation	caractéristique	convertisseur
Radiateur chauffage	# L	Gradateur / train d'onde
Chauffe-eau	L	
Four	# L	Gradateur / train d'onde
Plaque de cuisson (induction)	NL	Redresseur + Générateur HF
Four micro onde	NL	Redresseur + Générateur HF
Réfrigérateur	# L	
Machine à laver	L & NL	Variateur de vitesse
Sèche linge	L	
Éclairage halogène	NL	Gradateur / angle de phase
Éclairage basse consommation	NL	Redresseur + Générateur HF
TV, PC, Hi-fi, DVD...	NL	Redresseur capacitif
Électroménager portable	NL	Variateur de vitesse

Tableau 16 : charges domestiques usuelles, L = Linéaire - NL = Non Linéaire

L'évolution des réseaux électriques, tant au niveau de leur structure, de leur gestion ou du type de charges plus ou moins perturbatrices qui y seront raccordées, doit s'effectuer en conservant un minimum de sûreté et de fiabilité de ceux-ci. Cette garantie ne pourra cependant s'obtenir que par une meilleure connaissance des phénomènes apparaissant sur les réseaux et par leur prise en considération dès les phases de conception.

7.2 Modélisation fréquentielle des constituants d'un réseau

Dans la première partie de ce mémoire, il a été montré que les interharmoniques au sens large du terme (sous-harmoniques, harmoniques non caractéristiques, interharmoniques) pouvaient être traités de manière similaire aux harmoniques. Cependant, ces perturbations étant souvent liées au fonctionnement d'un ensemble convertisseur-machine ou d'une association de convertisseurs (ex : HVDC), leurs origines sont variées et les processus de génération sont plus complexes à identifier. Quant au calcul de leur propagation dans les réseaux, la question a déjà fait l'objet d'une discussion au chapitre 3.

Les résultats de simulation ont pu être régulièrement confrontés à des relevés expérimentaux sur des installations électriques de navires ou des bâtiments du domaine tertiaire (université, hypermarché). Ces comparaisons ont mis en évidence quelques lacunes dans la modélisation des éléments dit linéaires du réseau : alternateur, machine asynchrone, transformateur... Avec l'apparition des structures de convertisseurs à 12 et 24 pulsations, les harmoniques de courant injectés sur le réseau se situent à des fréquences de plus en plus élevées. Il devient donc indispensable de disposer de modèles fréquentiels adaptés, en vue de prévoir la propagation de ces courants et d'estimer les tensions harmoniques résultantes sur le réseau.

Dans la deuxième partie de ce mémoire, l'analyse et la prévision des harmoniques ont été abordées selon une approche stochastique, afin de fournir une image plus réaliste de leurs amplitudes, en prenant en compte les différents phénomènes de foisonnement pouvant intervenir (déphasage des courants, régimes de fonctionnement variables...). Dans une grande majorité des cas, les lois de probabilité relatives aux harmoniques sont obtenues à l'aide de la simulation du réseau et des charges par une méthode de Monte Carlo. Il est alors indispensable de disposer des expressions analytiques des harmoniques émis par les charges non linéaires, sans quoi les temps de calcul deviennent rapidement prohibitifs. Actuellement les modèles harmoniques des principaux types de redresseur et de variateur de vitesse ont pu être développés. Leur usage avec la simulation de Monte Carlo a montré l'intérêt de disposer de modèles analytiques de convertisseurs, optimisant ainsi les temps de calcul.

Compte tenu de nos thématiques de recherche et de leurs spécificités, les modèles des éléments dits linéaires du réseau doivent offrir un compromis entre deux contraintes :

- une bonne représentativité du comportement fréquentiel de l'équipement,
- une certaine 'compacité' compatible avec les nombreux calculs nécessaires aux simulations de Monte Carlo (approche stochastique).

Sans pour autant être un thème prépondérant dans nos travaux futurs, ce point fera l'objet de recherches ponctuelles afin d'affiner nos outils de simulation numérique.

Dans le cadre de l'équipe projet DPEE, des travaux ont été initiés avec l'accueil au laboratoire de Mme Riu [Riu_01]. L'objectif était d'étudier plus précisément l'intérêt d'une modélisation fractionnaire d'un transformateur, constituant un des éléments de base de tout système électrique alternatif [Riu_03]. Ce modèle a pu être intégré au logiciel Oschar, mais sa validation doit encore faire l'objet d'étude avant de le déclarer opérationnel.

Depuis, d'autres recherches se poursuivent [Ballerin_04] sur la même problématique, afin de mettre en évidence l'apport des différentes modélisations fréquentielles proposées dans la littérature et de leurs éventuels points faibles. En particulier, ces représentations nécessitent le plus souvent, des essais à fréquences variables pour leur identification fréquentielle. Les niveaux de tensions et de courants à appliquer devant être significatifs, des expérimentations particulières doivent alors être mises en place avec du matériel adapté.

Dans un même contexte mais avec une application orientée plus directement vers le dimensionnement électrique d'un équipement, une cotutelle de thèse est aujourd'hui en cours entre l'IREENA et l'Ecole Polytechnique de Montréal. Celle-ci porte sur la modélisation d'un transformateur pour l'étude de ses échauffements en régime de fonctionnement non sinusoïdal. L'objectif des recherches ainsi engagées est de proposer un modèle entièrement analytique ou hybride (analytique-numérique) caractérisant le couplage entre phénomènes électrique, électromagnétique et thermique intervenant dans les surcharges appliquées au transformateur, en présence de fortes non linéarités de la charge (thèse de A. Lefèvre). Selon la compacité et la précision de ce modèle, son intégration pourrait être envisagée à terme dans l'un des outils de simulation des réseaux électriques développés au laboratoire.

De plus, les possibilités d'utilisation de cette modélisation 'electro-thermique' du transformateur pourraient s'étendre à la validation et à l'exploitation de travaux antérieurs [Miègeville_98A][Miègeville_00A] sur la caractérisation des contraintes thermiques des équipements selon une approche stochastique introduisant le profil temporel des harmoniques injectés. Ces études avaient abouti à l'identification des surcharges électriques probables, en amplitude et en durée, liées aux courants fondamental et harmoniques introduits sur le réseau.

L'objectif à plus long terme est bien une évaluation des échauffements des équipements sensibles et le calcul de la durée de vie du matériel électrique.

Les recherches dans ce domaine offrent donc encore de larges perspectives. C'est pourquoi, sans nécessairement être un acteur principal, je souhaite poursuivre mon implication dans la modélisation fréquentielle des éléments linéaires d'un réseau électrique (transformateur, câble, alternateur, moteur) au travers de collaborations avec mes collègues de l'IREENA ou d'autres laboratoires. Par ailleurs, nous verrons par la suite que cette problématique rejoint un axe de recherche à part entière autour de l'analyse de la propagation des perturbations conduites basses fréquences.

7.3 Analyse des perturbations d'un ensemble convertisseur-machine

L'observation des grandeurs électriques dans les équipements du réseau montre qu'il existe d'autres phénomènes venant perturber les installations, sans pour autant avoir un rôle sur la déformation de l'onde de tension. Par exemple, le relevé de la figure 49 indique la présence d'un courant non-négligeable dans les armures des câbles d'alimentation d'un système de variation de vitesse. En principe, cette partie des câbles n'est pas conçue pour véhiculer un quelconque courant et pourtant il en existe un. Celui-ci ne semble pas perturber la ligne d'alimentation mais il faut espérer que les liaisons à la masse soient correctement réalisées afin de limiter les tensions de contact et les risques pour les personnes.

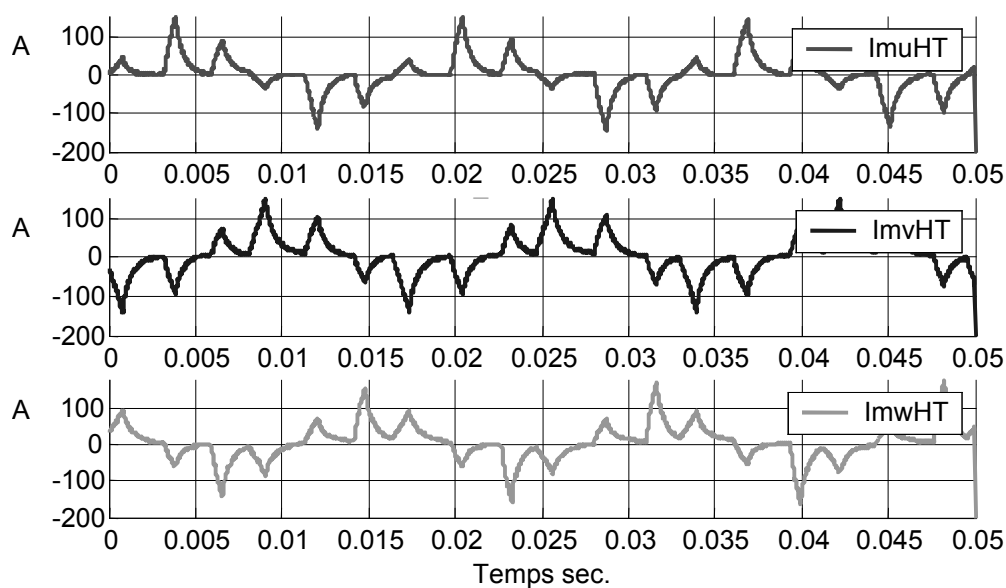


figure 49 : courants dans les armures de 3 câbles d'alimentation

Si dans cette installation la circulation de ce courant s'effectue sans dommage et dysfonctionnement visible, il est légitime de s'interroger sur sa provenance. Dans une autre installation, ce phénomène pourrait générer des échauffements dangereux, des tensions de contact prohibitives et des détériorations sur les équipements raccordés aux extrémités du câble. Ces courants peuvent avoir des origines diverses : courant de mode commun, courant induit par couplage inductif ou capacitif. Les chemins de propagation sont a priori mal identifiés et dépendent beaucoup du type et de la qualité de la liaison des masses. Théoriquement ces courants ne participent pas au transfert d'énergie. Cependant, ils sont sources potentielles de dysfonctionnement de l'installation électrique et à ce titre peuvent être inclus dans les perturbations conduites basses fréquences.

Avec l'introduction massive de l'électronique de puissance dans les équipements industriels, les courants dits de 'fuite' deviennent significatifs, allant parfois jusqu'à provoquer l'action des systèmes de protection. Ces derniers, comme les dispositifs différentiels résiduels (DDR), détectent tout courant ne circulant pas dans la ligne d'alimentation, qu'il s'agisse d'un courant normal au fonctionnement d'un convertisseur ou d'un courant de fuite suite à un défaut d'isolement. Ainsi, il arrive que des matériels ne puissent pas être raccordés sur certains réseaux car leur courant de fuite est supérieur au seuil de détection des DDR. Ces cas extrêmes démontrent les enjeux associés à ces perturbations, puisqu'elles peuvent remettre en cause la fiabilité d'une installation, voire l'installation elle-même.

Dans la très grande majorité des cas, un ensemble convertisseur-machine peut être considéré comme un perturbateur remarquable puisqu'il génère quasiment tous les types de perturbations conduites basses fréquences : harmoniques, interharmoniques, courants de fuite. C'est pourquoi dans le cadre de la thèse de M. Belhaj, nous avons choisi d'analyser un dispositif industriel classique de variation de vitesse, constitué d'un convertisseur de fréquences à MLI (redresseur à diodes + onduleur de tension) et d'un moteur asynchrone à cage. L'objectif de ces travaux est de mettre en évidence les divers types de perturbations ainsi que leurs origines et leurs chemins de propagation.

La démarche adoptée est pragmatique et repose dans un premier temps sur l'observation des tensions et courants de l'alimentation mais également au niveau des liaisons à la terre. La réalisation de ces relevés expérimentaux nécessite un banc de manipulation où les chemins de circulation des courants, y compris à travers les masses métalliques et les conducteurs de protection sont parfaitement maîtrisés (figure 50).

L'analyse de ces données devrait nous amener à une modélisation de type circuit puis à une reproduction des phénomènes observés par simulation numérique. Il est probable qu'un

processus itératif (mesure, modélisation, simulation, vérification) soit nécessaire avant d'obtenir une description complète des interactions entre le réseau, le convertisseur et la machine.

Dans le contexte de la fiabilité des réseaux de distribution, il apparaît nécessaire de s'intéresser également à ces grandeurs électriques communément dénommées courants ou tensions de fuite ou de défaut. Sans pour autant négliger les harmoniques et interharmoniques, c'est donc tout naturellement que je souhaite poursuivre mes travaux de recherche en considérant également ce type de perturbations conduites. Afin de restreindre le champ d'investigation, les études se concentreront sur les ensembles convertisseurs-machines et leurs interactions avec les réseaux de distribution.

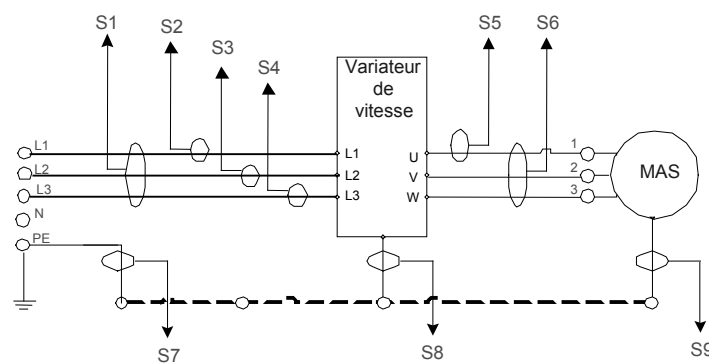


figure 50 : schéma du banc d'essai 'convertisseur MLI – machine asynchrone'

7.4 Analyse des perturbations du réseau d'un navire tout électrique

Depuis une vingtaine d'années, les installations électriques des navires à passagers ne cessent de se développer avec l'emploi systématique de la propulsion électrique et l'introduction massive de convertisseurs de puissance. Cette tendance apparaît aujourd'hui dans la marine militaire avec la mise en service de navires océanographiques ou de transport. Compte tenu des spécificités techniques (puissance, volume, vitesse) les premiers bâtiments de surface ayant une fonction de combat et possédant une propulsion électrique sont prévus à l'horizon 2008.

Une première étude menée en collaboration avec le GESMA et les Chantiers de l'Atlantique a mis en évidence la circulation de courants basses fréquences, dans le réseau de distribution de bâtiments à propulsion électrique [Bourguet_04C]. En particulier, les origines de certaines composantes harmoniques et interharmoniques ont pu être déterminées ainsi que leur mode

de propagation dans les réseaux moyenne tension. De plus, des mesures réalisées à bord dans des conducteurs de protection ont montré une possible circulation de ces courants vers la coque du navire (figure 51). La présence de ces courants nous conforte dans notre volonté d'analyser plus en détail les processus de génération et d'évacuation vers les masses de ces courants de 'fuite'.

Par ailleurs, le relevé de la signature électromagnétique d'un navire à passagers (figure 52) a clairement montré l'influence des équipements électriques de bord sur celle-ci. Des composantes fréquentielles directement liées au fonctionnement de la propulsion électrique et du réseau sont effectivement présentes dans le spectre électromagnétique.

Le lien entre les perturbations basses fréquences du système électrique et la signature du navire existe, mais il n'a pu être complètement explicité. Deux questions subsistent :

- quelles sont les origines précises des fréquences captées dans l'eau ?
- le champ électromagnétique mesuré provient-il d'une émission directe de la coque (courant de circulation) ou bien d'un rayonnement interne passant au travers de la coque ?

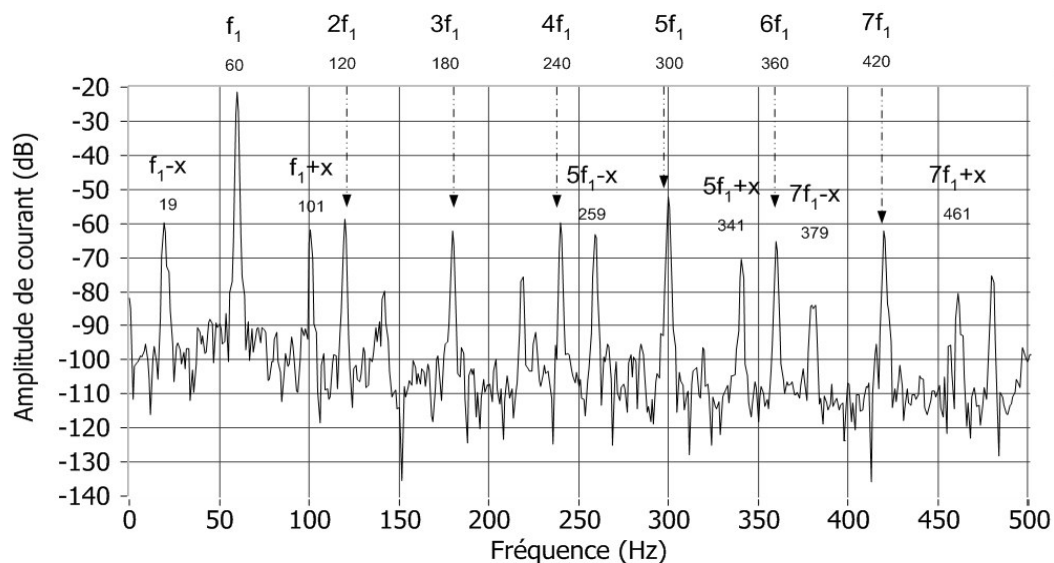


figure 51 : spectre du courant dans une liaison à la masse d'un transformateur 'machine' d'un navire, $x = 40$ Hz

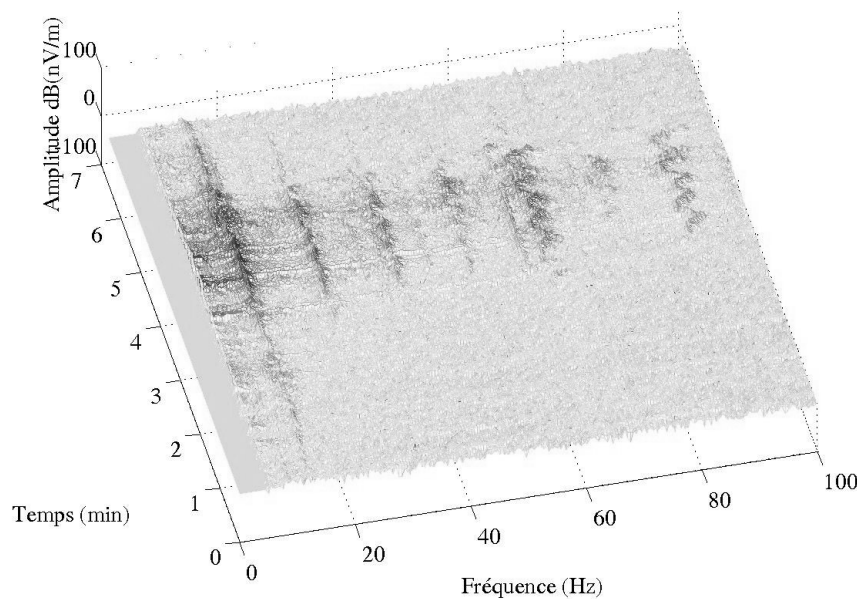


figure 52 : signature électromagnétique d'un navire de croisière, à ~100m de fond
évolution temporelle du champ électrique horizontal : 4^{ème} passage du navire

Pour répondre à ces interrogations, la collaboration avec le GESMA et les Chantiers de l'Atlantique devrait se poursuivre, si possible dans le cadre d'une nouvelle thèse DGA/CNRS. L'objectif des recherches serait d'évaluer l'influence des courants de fuite des équipements électriques de bord d'un navire sur sa signature électromagnétique. Cette étude comprendra alors l'analyse de ces courants et l'identification des sources du rayonnement électromagnétique B.F. sous-marin, notamment par une localisation des boucles de courant circulant à travers les structures et la coque du navire. A cette fin, une méthodologie expérimentale devra être définie dans le but de déterminer les chemins de propagation de ces courants dans un environnement complexe de type industriel (chemin de câble, liaison à la masse, circuit auxiliaire...). Ces phénomènes seront analysés à partir de manipulations sur des bancs d'essais au laboratoire, des installations réelles et éventuellement par le biais de simulations numériques pour les processus de génération.

Même si la finalité des applications diffère, les perspectives de recherches précédentes se rejoignent sur l'étude des courants de fuite et plus généralement autour des perturbations conduites basses fréquences (harmoniques, interharmoniques...) produites par des ensembles convertisseurs-machines. Les méthodes et outils ainsi développés et validés offriront un champ d'exploitation assez vaste dans le domaine de la compatibilité électromagnétique et de la qualité des réseaux de distribution, tant pour l'étude de la discrétion des plates-formes navales que pour les applications industrielles multi-convertisseurs.

La connaissance de ces perturbations, de leur processus de génération et de leur chemin de propagation devrait nous conduire à mieux appréhender ces phénomènes et ainsi faciliter la recherche de solutions afin de les réduire à la source ou d'en limiter leurs effets. Les campagnes de mesures 'sur le terrain' continueront cependant à apporter une expérience indispensable quant au comportement réel et à l'apparition de ces phénomènes. Néanmoins, leur modélisation et leur reproduction nécessitent une connaissance parfaite des installations, difficilement envisageable sur des sites industriels ou tertiaires. C'est une des raisons pour laquelle une plate-forme 'réseau' est aujourd'hui en projet afin de répondre à ce souci de caractérisation des matériels et de reproductibilité des expérimentations.

7.5 Plate-forme 'Réseau'

7.5.1 Contexte

Dans le domaine du génie électrique, comme dans de nombreux autres, la simulation numérique est devenue indispensable à l'étude des systèmes électriques ou d'électronique de puissance. Elle permet notamment de reproduire le fonctionnement de dispositifs dans des configurations particulières et difficilement réalisables ou dans un objectif de prévision du comportement avant leur réalisation. Les travaux de simulation présentés jusqu'ici s'inscrivent bien dans ce contexte d'étude prévisionnelle. Cependant, la modélisation des phénomènes et des dispositifs physiques réclame toujours une phase de validation, au moins partielle, afin de s'assurer de la véracité des résultats issus des simulations. Cette phase de validation est généralement effectuée sur la base de résultats issus de manipulations expérimentales.

Comme le montrent les nombreux exemples d'applications proposés précédemment, ce souci de validation et de confrontation à des situations réelles est permanent dans notre démarche scientifique. Ces actions nous semblent indispensables pour vérifier d'une part la cohérence des méthodes d'estimation ou de caractérisation des grandeurs électriques que nous pouvons développer et d'autre part, pour contrôler le réel intérêt de ces travaux de recherche.

Cependant, une des difficultés majeures de ces recherches sur les perturbations dans les réseaux électriques porte justement sur cette phase de validation expérimentale des modèles ou des méthodes développées sur un plan théorique. En effet, les navires comme les installations industrielles ou tertiaires, sont difficilement accessibles et jamais mis à l'entière disposition des chercheurs. Leur configuration à un instant donné est plus ou moins connue mais reste variable dans de nombreux cas, évoluant avec le temps (connexion-déconnexion de charges) selon les processus de fabrication ou les besoins des consommateurs.

De plus, les paramètres de ces installations sont souvent mal identifiés ou non disponibles : caractéristiques des matériels du réseau, puissances ou régimes de fonctionnement des charges, réglages des convertisseurs... Dans ces conditions, il est parfois bien difficile de corréler les estimations obtenues par calcul aux grandeurs mesurées, ne sachant pas exactement si les différences sont imputables aux calculs théoriques ou bien si les configurations d'études sont simplement distinctes.

Les perspectives de recherche sur l'ensemble des perturbations conduites, y compris les courants de 'fuite', nécessitent une parfaite connaissance et maîtrise des installations électriques, en particulier les chemins possibles de circulation et de propagation. Par ailleurs, ces travaux réclament de toute évidence de nombreuses manipulations, soit dans une même configuration, soit dans des configurations différentes mais parfaitement identifiées afin de pouvoir distinguer l'origine des divers phénomènes intervenant dans la création de ces perturbations. Toutes ces exigences paraissent cependant incompatibles avec les conditions de mesures offertes sur des sites industriels ou assimilés, car la reproductibilité des expériences est loin d'être assurée.

Pour remédier à ces aléas, j'ai élaboré un projet de plate-forme 'réseau' autour de la construction d'un mini-réseau de distribution électrique au sein du laboratoire. Cette plate-forme revêtant un caractère structurant pour le laboratoire, elle a pu s'insérer dans le cadre du contrat de plan Etat-Région 2001-2006. Après une présentation en mai 2003 devant le Conseil Scientifique et Technologique du programme de recherche 'génie électrique', un avis favorable a été émis à la réalisation de ce projet.

7.5.2 Description de la plate-forme réseau

Le développement et la maintenance d'un micro-réseau de puissance réduite, dédié à la seule analyse des perturbations des réseaux représenteraient un coût important et certainement rédhibitoire dans notre situation. Au sein de l'IREENA située au CRTT, plusieurs bancs d'essais de machines existent ou sont en projet dans le cadre des diverses thématiques du laboratoire. Ces bancs d'essais permettent soit de tester des algorithmes de commande, soit d'analyser les performances de machines particulières.

La plate-forme réseau envisagée dans les locaux du CRTT s'appuie alors sur les bancs d'essais existants et futurs, en offrant la possibilité de les raccorder ensemble sur un même réseau de distribution interne. Le réseau en tant que tel doit ainsi être constitué (figure 53) :

- d'une armoire principale (TPR) assurant l'alimentation, les protections et la configuration du réseau,
- de câbles d'alimentation,
- de coffrets divisionnaires situés dans les différentes salles de manipulation et permettant le raccordement des bancs d'essais à ce réseau interne.

Les divers bancs de manipulation auront ainsi deux sources d'alimentation possibles : le réseau actuel du bâtiment pour un fonctionnement 'normal' ou via la plate-forme réseau pour des études particulières.

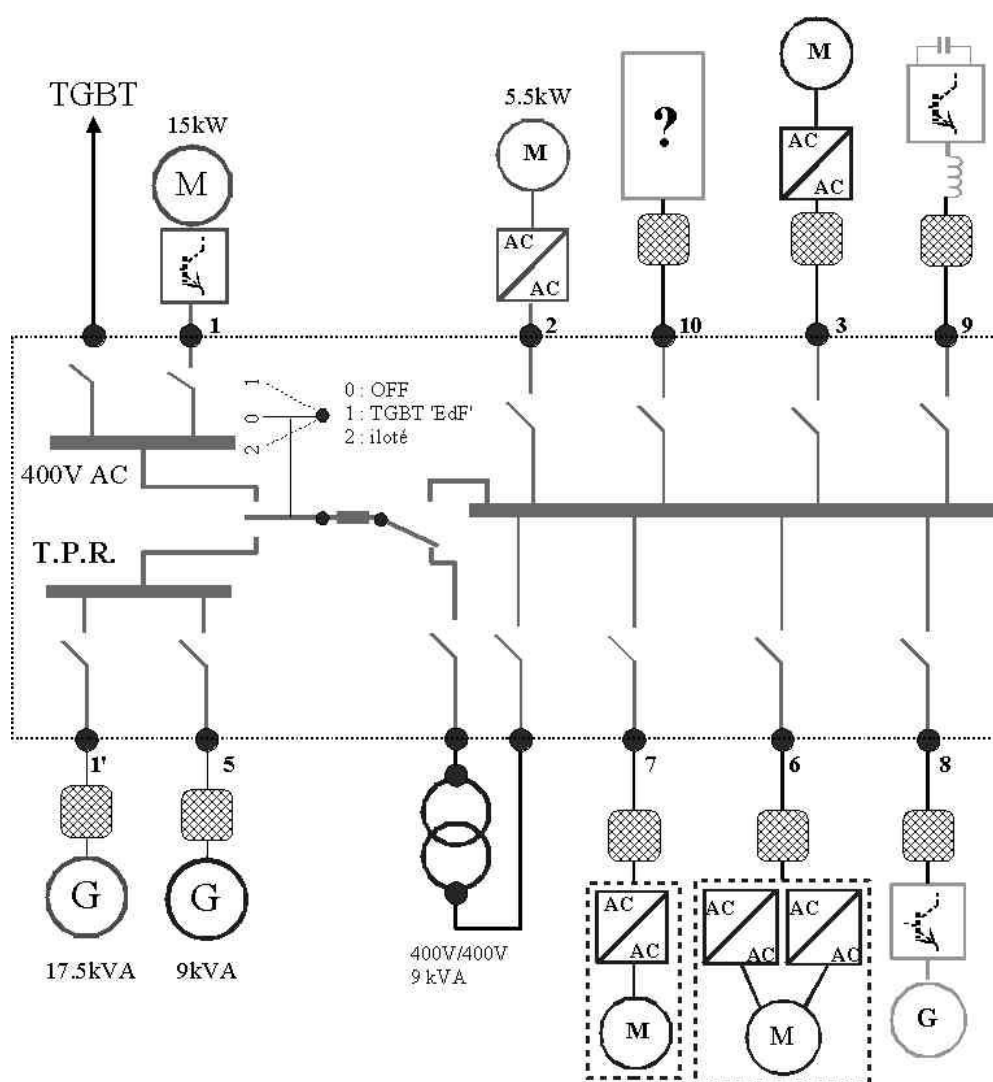


figure 53 : schéma unifilaire de la plate forme réseau

Comme le montre le schéma de la figure 53, la structure de ce mini-réseau de distribution permettra de maîtriser entièrement les caractéristiques de l'installation : les charges raccordées, les cheminements et l'impédance des câbles, les sources d'alimentation... De plus, il est prévu que l'armoire principale puisse être alimentée par le TGBT du bâtiment (réseau 'EdF') et par un ou plusieurs groupes de production 'autonomes', afin de reproduire un réseau îloté. Ce type de réseau et les recherches qui s'y rattachent prennent de plus en plus d'importance, non seulement sur les navires ou les avions, mais aussi sur les installations terrestres dans le contexte de la production décentralisée ou dispersée.

Il faut rappeler que cette plate-forme réseau ne prétend pas 'simuler' un réseau de transport ou un réseau de très forte puissance. Il n'est donc pas prévu d'études de stabilité dynamique ou de répartition de puissance telles que peut le faire un gestionnaire de réseau (RTE/EdF). Les machines ne seront pas des machines spéciales avec, par exemple, des constantes de temps particulières. L'objectif de cette plate-forme est bien de disposer d'un réseau de distribution de puissance limitée, où tous les matériels qui le constituent (moteurs, alternateurs, protections) sont adaptés à cette puissance.

7.5.3 Implantation dans les locaux du CRTT

Dès le lancement de ce projet, la structure de la plate-forme a tenu compte des possibilités offertes par l'architecture du CRTT. C'est la raison pour laquelle l'implantation de ce nouveau réseau de distribution ne nécessite pas ou peu de modifications des installations actuelles. Pour constituer la plate-forme, le réseau de distribution à réaliser (figure 54) viendra ainsi s'ajouter au réseau actuel du bâtiment, tout en restant parfaitement distinct de celui-ci, autant pour des raisons de sécurité que pour des contraintes liées aux thématiques de recherche.

Le 'Tableau Principal Réseau' (TPR) sera situé dans le hall 157 et pourra être raccordé au réseau 'EdF' par l'intermédiaire d'un coffret divisionnaire de 50kVA déjà présent dans ce hall. Depuis le TPR, des câbles seront tirés vers les différentes salles où des bancs de manipulation sont susceptibles d'être connectés à la plate-forme. Les câbles seront placés sous goulotte dans les salles et circuleront dans les chemins de câble existants situés dans les couloirs. Dans chaque salle, un coffret divisionnaire parfaitement identifiable par sa couleur et distinct de ceux déjà attribués à la distribution du bâtiment ('EdF'), permettront le raccordement des bancs d'essais au réseau de la plate-forme.

Les deux halls 124 et 157 seront tout particulièrement employés pour accueillir :

- le TPR (157),

masses permettra également l'observation des courants de mode commun et leur circulation dans les conducteurs de protection.

La possibilité de raccorder entre eux plusieurs ensembles convertisseurs-machines ou des alternateurs avec des charges linéaires ou non-linéaires, facilitera également l'étude des interactions entre ces équipements. En particulier, les phénomènes de génération et de propagation de certaines composantes fréquentielles pourront être mis en évidence de manière plus contrôlée que dans un réseau de distribution industriel. Par exemple, il sera envisageable de reproduire un réseau élémentaire de navire (alternateur, transformateur, variateur de vitesse) et d'y observer d'éventuelles boucles de circulation des courants. De plus, la structure et les caractéristiques du réseau étant parfaitement identifiées et à l'entière disposition des chercheurs, ces expériences devraient être reproductibles à volonté.

7.5.5 Autres axes de recherche et collaborations

Cette installation fournira ainsi un environnement réaliste de mesures et d'essais pour un grand nombre d'activités de recherche intégrées dans les principales thématiques développées sur le site de Saint-Nazaire de l'IREENA :

- analyse des perturbations conduites basses fréquences susceptibles d'apparaître sur un réseau en présence de multiples charges non linéaires (ex : convertisseurs), en fonctionnement îloté ou non,
- modélisation et identification de composants du réseau (ex : transformateurs),
- étude de conditionneurs de réseau (ex : compensateurs de réactif, filtres actifs, convertisseurs multifonctions...),
- contrôle ou gestion de plusieurs générateurs raccordés sur un même réseau de faible puissance de court-circuit (analogie avec la production décentralisée),
- commande d'ensembles convertisseurs-machines alimentés par un réseau de puissance finie (ex : propulsion électrique),
- transmission d'information par le réseau d'énergie,
- mise à disposition d'un réseau îloté pour d'autres laboratoires nationaux et partenaires industriels, dans le cadre d'études ou de tests de charges et de convertisseurs spécifiques.

Plusieurs chercheurs du laboratoire sont partie prenante dans le groupement de recherche SEEDS. Les collaborations ainsi mises en place devraient conduire à une mutualisation des connaissances, des moyens humains et des matériels autour des thèmes de l'énergie et de son transport. Dans ce cadre, la plate-forme réseau décrite précédemment viendrait compléter les simulateurs de réseaux du LEG (Arene) et du L2EP (Hypersim).

La plate-forme réseau se veut ouverte sur l'extérieur et dans ce but, un emplacement 'visiteur' est prévu dans un des halls de manipulation, offrant un raccordement possible à une charge ou un convertisseur de puissance qu'un laboratoire ou une entreprise souhaiterait tester dans les conditions réelles de fonctionnement d'un réseau îloté ou de faible puissance de court circuit.

7.6 Conclusion

Les actions de recherches précédentes sont exposées dans un ordre arbitraire. Du fait de leur nombre et de leur diversité, elles peuvent donner à première vue, une impression de dispersion des thèmes de recherche. En réalité, elles sont complémentaires les unes des autres pour aboutir à l'étude des perturbations conduites basses fréquences, conformément à la démarche que nous avons adoptée :

- observation – identification de toutes les grandeurs électriques circulant entre une charge et son réseau d'alimentation ou sur le réseau lui-même,
- modélisation des charges et des éléments du réseau,
- reproduction des phénomènes, par exemple à l'aide d'outils de simulation, soit pour leur analyse dans une installation existante, soit pour leur prévision lors de la conception ou la modification d'un nouveau système électrique.

Dans ce contexte, la plate-forme réseau nous offrira un support expérimental original à l'étude des perturbations conduites, autant dans les étapes d'observation et d'identification de manière reproductible que dans les phases de validation de modèles.

Ces travaux concernent essentiellement des charges ou des équipements individuels ; raison pour laquelle les études sont abordées sous un angle purement déterministe. Les connaissances acquises dans ces conditions particulières pourront être mises à profit pour le traitement d'une installation électrique où les charges seraient plus nombreuses et leurs modes de fonctionnement plus variés. Dans ce cas, il a été montré que l'approche stochastique fournissait des prévisions plus réalistes des harmoniques. Cette approche est également envisageable pour l'étude des autres perturbations basses fréquences (interharmoniques, sous harmoniques), et plus généralement des grandeurs électriques.

8 EXTENSION DE L'APPROCHE STOCHASTIQUE

8.1 Introduction

Les travaux présentés dans la deuxième partie de ce mémoire ont porté sur la prévision des grandeurs électriques, notamment les harmoniques, en considérant le comportement de celles-ci comme partiellement ou totalement aléatoire. Une réflexion sur les modes de fonctionnement des installations électriques et l'observation des tensions et des courants mesurés sur des sites industriels et tertiaires ont justifié l'intérêt de cette approche. De même, les applications proposées dans le contexte prévisionnel des perturbations harmoniques des réseaux ont montré la validité d'une telle approche ainsi que des méthodes probabilistes employées.

Nous noterons également que la notion d'aléatoire et les outils probabilistes qui l'accompagne s'introduisent dans des domaines très variés et de plus en plus nombreux :

- modèle économique de la bourse,
- évaluation des primes d'assurance,
- tri des pages web pour les moteurs de recherche,
- prévision météorologique,
- modélisation des vagues 'scélérates' fortement destructives pour les navires...

Nous pourrions dire que s'en remettre au hasard pour décrire le comportement d'une grandeur physique traduit simplement notre ignorance de l'ensemble des phénomènes intervenant ou interagissant sur cette grandeur. Cependant, dans l'état actuel de nos connaissances ou pour palier à notre incapacité à modéliser et reproduire tous les phénomènes, l'emploi d'une approche stochastique autorise une description globale et des évaluations réalistes, compatibles avec nos moyens de calculs. Dans le cadre des perturbations de réseaux, plusieurs applications des outils probabilistes ont déjà été exposées et je reste persuadé que leur usage peut encore se développer largement dans le domaine du génie électrique, en particulier pour la prévision des puissances consommées ou produites.

Depuis quelques années en France, la production d'énergie et les réseaux électriques subissent d'importantes transformations. D'une situation très centralisée où une entreprise gérait les moyens de production ainsi que les réseaux de transport et de distribution, nous sommes passés progressivement à une situation décentralisée. La 're-régulation' du marché de

l'électricité a conduit de nombreuses entreprises à s'intéresser et à investir dans ce domaine, notamment au niveau de la production et de la commercialisation. De fait, le nombre de producteurs et d'unités de production s'accroît avec une répartition géographique plus ou moins indépendante de la structure du réseau actuel. La cogénération et l'émergence des énergies renouvelables entraînent une diffusion plus importante de centres de production sur tout le territoire, avec des puissances installées variant de quelques centaines de kilowatts à plusieurs dizaines de mégawatts. Leur production peut être plus ou moins aléatoire selon des paramètres extérieurs comme l'ensoleillement ou la vitesse des vents pour l'éolien. Dans ce contexte de 're-régulation' du marché de l'électricité et d'une production décentralisée, la gestion du réseau sera plus difficile à effectuer, que ce soit pour des raisons techniques ou économiques. Déjà, des pannes générales sont intervenues dans certains pays et d'autres, s'inquiètent de la stabilité de leur réseau en raison de la part importante de leur approvisionnement par énergie éolienne.

Dans de nombreuses situations des informations plus réalistes sur les échanges de puissances susceptibles d'exister fourniraient une précieuse aide tant dans la conception d'une installation électrique que dans sa gestion, participant ainsi à l'accroissement de sa fiabilité. Sans négliger cependant l'importance des perturbations conduites, il faut bien avouer qu'elles interviennent dans un second temps dans le dimensionnement des équipements et dans les coûts d'investissement et d'exploitation d'une installation. Je souhaite donc logiquement poursuivre mes recherches en généralisant l'aspect prévisionnel à toutes les grandeurs électriques, en y incluant les puissances absorbées ou produites.

Afin de classer les travaux futurs, nous pouvons représenter les installations électriques et plus particulièrement celles à faible puissance de court-circuit par des modèles de comportement ou des modèles de 'connaissance'. Le choix de la modélisation dépendra du type d'étude envisagée et de la configuration de l'installation. Compte tenu de notre expérience et des préoccupations qui apparaissent dans le domaine de l'énergie électrique, il est d'ores et déjà possible de distinguer deux champs d'application de ces recherches : les réseaux embarqués et la production d'énergie localisée.

8.2 Modèle de comportement

La prévision des consommations électriques à plus ou moins long terme, a fait l'objet de nombreux travaux [Moghram_89][Alfares_02]. L'objectif est alors d'estimer la puissance absorbée par un grand nombre de consommateurs en fonction de divers paramètres externes comme la température, le vent, la saison... Les modèles comportementaux proposés sont

variés et reposent sur des approches déterministes (régression linéaire multiple, réseau de neurones) et/ou probabilistes (séries temporelles, logique floue...). Néanmoins, ils sont toujours construits à partir d'une base de données constituées d'un grand nombre de mesures s'étalant sur plusieurs semaines à plusieurs années. La précision des modèles étant souvent directement liée à la quantité de mesures disponibles au préalable.

Les deux modèles prévisionnels proposés au chapitre 5, rentrent également dans cette catégorie de modèles de comportement. Ils ont été employés pour caractériser l'évolution temporelle des harmoniques, mais leur application à d'autres grandeurs telles que la valeur efficace ou la puissance absorbée est également envisageable. L'intérêt de ces modèles est de caractériser le comportement d'une installation électrique (réseau d'usine, bâtiment tertiaire commercial) en un nombre réduit de paramètres. Les prévisions élaborées à partir de ces modélisations supposent :

- de disposer de l'installation électrique,
- d'une base de données correspondant à des mesures sur la grandeur analysée,
- que le comportement de l'installation évolue peu ou que le modèle ait le temps de s'adapter,
- que le comportement global soit lié à des paramètres externes identifiés.

Ces hypothèses et ces modélisations semblent répondre aux préoccupations des gestionnaires de réseau de transport qui doivent anticiper les consommations globales des consommateurs. Elles s'adaptent également au cas où une représentation générale d'une installation serait recherchée, sans s'intéresser au comportement de chacune des charges qui la compose. Il apparaît donc nécessaire de maîtriser ces modélisations et les outils mathématiques sur lesquels elles reposent, afin de choisir au mieux les représentations vis-à-vis des situations et des grandeurs étudiées.

Dans ce cadre, il peut s'avérer utile de développer de nouveaux modèles, comme par exemple la fusion des deux modèles prévisionnels proposés au chapitre 5. En effet, ceux-ci reposent sur la somme de deux parties : l'une déterministe décrite par des fonctions temporelles, l'autre aléatoire représentée par des lois de probabilité. Les deux modèles diffèrent principalement par les méthodes utilisées pour extraire et identifier chacune des parties et sous composantes.

La technique basée sur l'application d'une transformée de Fourier présente l'avantage d'être simple et rapide de mise en œuvre. Néanmoins, le choix des raies fréquentielles dites significatives de la composante déterministe s'effectue de manière quelque peu arbitraire au travers de la définition d'un seuil. Il est possible qu'une part d'information 'déterministe' soit affectée à tort à la composante aléatoire, venant par là même induire une erreur sur l'identification de celle-ci. L'application d'un modèle autorégressif après la transformée de

Fourier permettrait certainement d'améliorer significativement l'extraction des composantes déterministe et aléatoire, en introduisant un critère de discrimination plus objectif. D'autre part, le résidu aléatoire résultant de ce double traitement répondrait aux exigences requises pour une identification à l'aide de fonctions probabilistes. La figure 55 propose une structure possible de ce modèle, faisant apparaître trois étapes de décomposition et leurs fonctions mathématiques associées.

A coté de l'aspect caractérisation d'une installation électrique, ces modélisations pourraient s'employer dans un contexte de surveillance des grandeurs électriques d'un réseau à l'aide d'un dispositif temps réel. L'emploi d'un modèle autorégressif ou de ses variantes (ARMA, ARIMA...) présenterait l'avantage d'une adaptation possible du modèle face à une modification 'rapide' du comportement de l'installation. Les évolutions lentes de cette dernière seraient prises en considération par un calcul de la transformation de Fourier à des intervalles de temps plus espacés. Ce type de dispositif fournirait ainsi une prévision à court terme des grandeurs électriques comme les harmoniques ou la puissance absorbée et signalerait à l'avance d'éventuels risques de dépassement de certains seuils. Des mesures compensatoires pourraient alors être prises afin d'anticiper d'éventuels dysfonctionnements de l'installation.

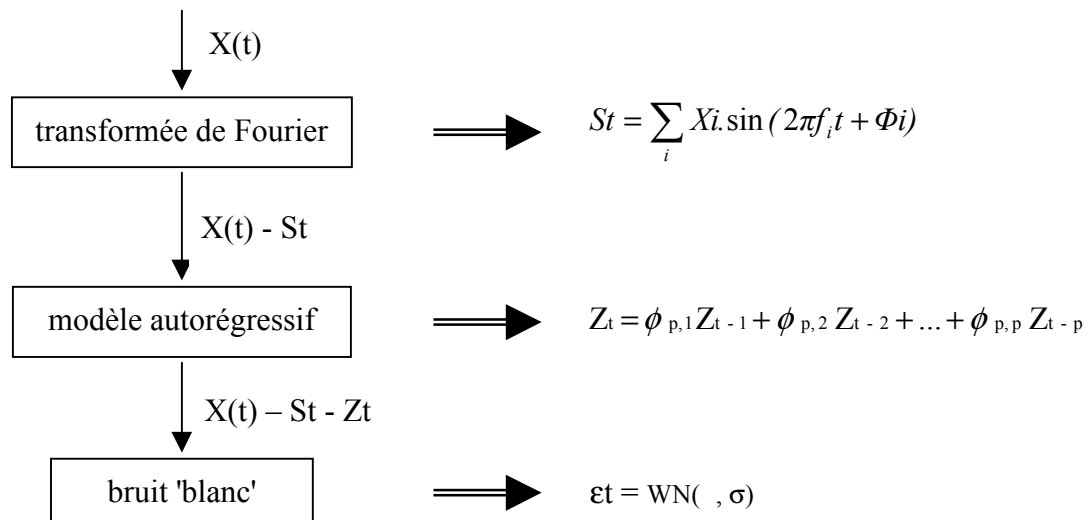


figure 55 : structure d'un nouveau modèle prévisionnel

8.3 Modèle de connaissance

Lorsque l'installation électrique est nouvelle ou que les évolutions de la grandeur étudiée sont liées plus directement au fonctionnement propre d'une ou de plusieurs charges, les modélisations précédentes ne peuvent plus s'appliquer. A titre d'illustration, une modification sur un réseau de transport ou de distribution aura relativement peu d'impact sur la

consommation globale prévisible. Dans le cas d'un réseau industriel, une évolution ou l'ajout de nouvelles charges (ex : nouvel atelier de production) peuvent avoir une grande influence sur la puissance totale absorbée. Les informations issues de mesures antérieures et les modèles obtenus à partir de celles-ci, ne sont alors plus représentatifs du comportement de l'installation future. De même que pour la création d'une nouvelle installation, il semble préférable de disposer d'un modèle de connaissance du réseau et des charges raccordées.

Dans la deuxième partie de ce mémoire, les travaux de recherche se sont attachés à caractériser et à reproduire les composantes harmoniques des courants générés par un ou plusieurs convertisseurs d'une installation électrique. Tous les travaux réalisés pour un rang harmonique quelconque peuvent aisément être reconduit pour un rang particulier comme le fondamental ou la valeur efficace du courant. En supposant la valeur efficace (ou le fondamental) de la tension distribuée comme une grandeur quasiment constante, le traitement du courant de ligne fournirait directement des informations sur la puissance absorbée ou susceptible de l'être par un convertisseur, un ensemble de charges ou une installation complète.

Les outils probabilistes doivent donc être adaptés au comportement de la grandeur physique étudiée. Dans le cas de la puissance, son comportement dépend du type de charges et de leurs modes de fonctionnement. Plusieurs catégories peuvent d'ores et déjà être définies selon la puissance, l'instant de démarrage, la durée de fonctionnement. Le Tableau 17 et la figure 56 envisagent de nombreuses situations, d'un comportement en 'tout ou rien' parfaitement déterminé à un fonctionnement continûment variable de manière aléatoire tant sur les puissances que sur les instants de démarrage et les durées de fonctionnement. Une même charge peut ainsi appartenir à plusieurs catégories selon son mode d'utilisation dans le temps. Dans l'exemple d'un processus industriel, une composante déterministe peut exister, car s'inscrivant dans un cycle de fabrication parfaitement identifié et une autre composante aléatoire peut s'y ajouter, car liée à des paramètres extérieurs non définis a priori.

La puissance absorbée par un ensemble de charges intermittentes a déjà été traitée [Miègeville_98B] en considérant des instants et des durées de fonctionnement aléatoires définis par des lois de probabilité données. Cette première étude a démontré l'intérêt apporté par l'approche stochastique par rapport à l'usage de coefficients de foisonnement déterminés de manière plus ou moins empirique. Cependant, ces travaux ont mis en évidence les difficultés d'appliquer la théorie des probabilités sur des exemples concrets. Le passage d'une description d'un système physique à une expression mathématique est parfois une étape délicate, notamment lorsqu'il est question de probabilités. Selon le point de vue adopté pour

aborder un problème, il est possible d'aboutir à des formulations différentes dont certaines sont finalement erronées.

Malgré ces quelques difficultés inhérentes à toutes recherches dans une thématique nouvelle, nous restons persuadés que l'approche probabiliste apporterait une précision supplémentaire dans l'évaluation des puissances consommées par des charges multiples. Ces estimations pourraient utilement intervenir dans la phase de définition des bilans de puissance. Ceux ci sont primordiaux dans la conception d'une installation puisqu'ils conditionnent le dimensionnement des matériels. Actuellement ces bilans de puissance sont le plus souvent obtenus à partir de coefficients de simultanéité et de diversité pour tenir compte des effets de foisonnement des charges. Ces coefficients sont choisis d'après des normes, de l'expérience de chaque entreprise ou de manière empirique. La théorie des probabilités fournirait alors une base plus scientifique à la détermination de ces coefficients et les estimations réalisées à l'aide de calculs probabilistes devraient en être plus réalistes.

type de charges	paramètres connus / aléatoires	exemples
a) intermittent - tout ou rien	P_o , t_o , t_f ou Δt_{on} , Δt_{off}	chauffage
b) intermittent – plusieurs niveaux	P_i , t_i	machine outil
c) intermittent - variable	$P(t)$, t_o , t_f	ascenseur
d) continûment variable	$P(t)$	climatisation chaîne de fabrication

Tableau 17 : différents modes de fonctionnement des charges

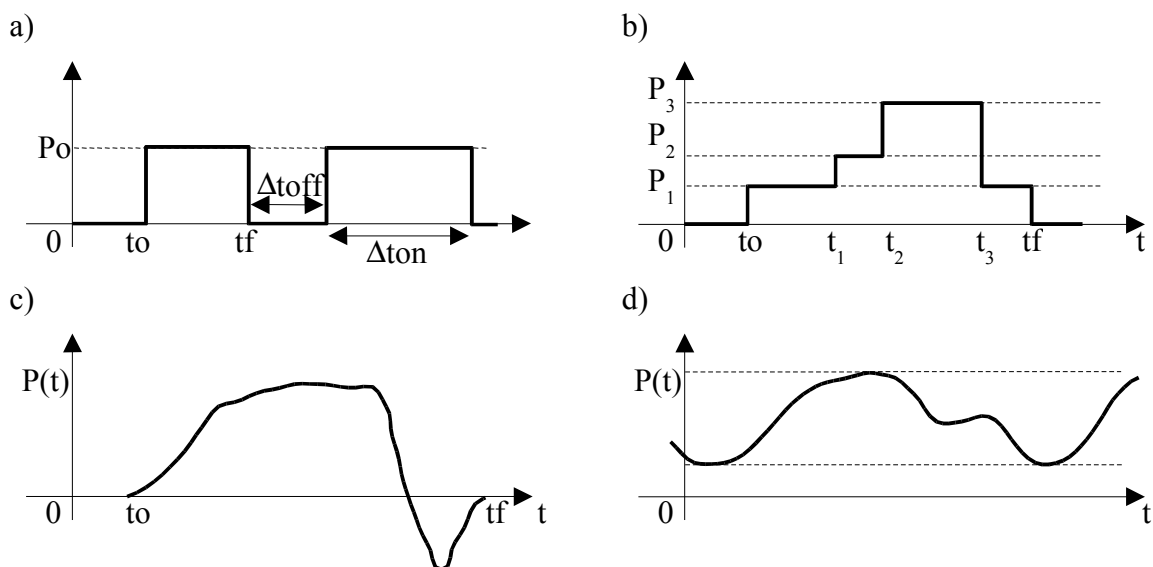


figure 56 : représentation simplifiée des modes de fonctionnement possibles d'une charge

8.4 Application à la conception des réseaux embarqués

Cette question des bilans de puissance est encore plus cruciale lorsqu'il s'agit d'installations électriques embarquées. Dans une installation terrestre, il est toujours possible de modifier ou de remplacer un équipement. Les difficultés sont plutôt d'ordre financier que technique. Dans une plate-forme mobile, regroupant tous les types de véhicules terrestres, navals ou aériens, le changement d'un matériel par un autre n'est pas toujours réalisable pour des raisons de taille ou de poids. L'intégration d'un grand nombre d'équipements dans un volume restreint ne laisse que peu de marges de manœuvre à des modifications ultérieures, sans évoquer les coûts résultants bien souvent prohibitifs.

De plus, le calcul des puissances et le dimensionnement des appareils électriques (câbles, transformateurs, générateurs, moteurs) ont des répercussions immédiates sur d'autres installations et même parfois sur les caractéristiques propres à la plate-forme. A titre d'illustration, une surévaluation des puissances consommées entraînerait un choix de transformateurs et d'alternateurs de plus forte puissance. Ces derniers nécessiteraient également des moteurs d'entraînement (diesel, turbine) plus importants. L'augmentation de puissance se traduisant en général par un accroissement des masses, la plate-forme deviendrait plus lourde et réclamerait plus d'énergie pour sa mobilité. Dans des cas extrêmes, les spécifications du cahier des charges relatives à la vitesse, au poids ou à l'autonomie pourraient rapidement ne plus être respectées.

Ces réflexions sont également partagées par des industriels concernés par les réseaux d'énergie embarqués. Depuis plusieurs années, une collaboration existe entre l'Etablissement Technique d'Angers (ETAS) et le laboratoire. En 2005, celle-ci s'est concrétisée par un stage de Master sur le calcul des puissances absorbées par des charges intermittentes. Actuellement, ces travaux se poursuivent dans le cadre d'une thèse de doctorat en convention Cifre avec Thalès, sur 'l'analyse prévisionnelle et stochastique des consommations électriques de charges multiples, appliquées aux véhicules de combat mobiles terrestres'.

L'entreprise Thalès et l'ETAS sont complémentaires dans la définition, la fabrication et la vérification de véhicules opérationnels (V.A.B., Shelter...) intégrés dans l'architecture de la défense nationale. Dans l'avenir, ces plates-formes mobiles devront offrir des fonctionnalités nouvelles (conduite sur écran, système d'information opérationnel, téléopération de robot...), tout en conservant leurs fonctions classiques, désormais pilotées électriquement. Tous ces systèmes constituent des consommateurs potentiels, pouvant s'avérer relativement 'gourmands'. De plus, l'énergie consommée à bord est susceptible de s'accroître dans de forte

proportion si elle est employée dans les fonctions 'mobilité' (propulsion électrique) et 'feu' (canon électrothermique, lanceur électrique, arme à énergie dirigée).

Pour les raisons exposées précédemment, l'électrification de ces véhicules doit s'accompagner d'une optimisation de leur réseau de bord afin de répondre aux contraintes de poids, de volume, d'habitabilité, d'autonomie et de coût. Cette optimisation ne peut être obtenue que par une meilleure prévision des besoins énergétiques du véhicule dans tous les modes opératoires qui lui sont assignés. A terme, avec l'accroissement des puissances et du nombre de charges, les méthodes usuelles employées dans les bilans de puissance risquent de ne plus pouvoir fournir d'estimations fiables. Compte tenu du mode de fonctionnement de ces charges et des profils d'utilisation, une approche stochastique incluant les aspects temporels devrait conduire à des évaluations plus réalistes des puissances consommées. A partir de ces dernières, les autres matériels connexes au réseau électrique devraient se définir de manière plus précise, au plus près des besoins réels.

La conception des réseaux d'avions est et sera de plus en plus soumise aux mêmes préoccupations et doit répondre à des objectifs similaires. Une collaboration avec l'entreprise Airbus a été signée au début de cette année afin de mettre en oeuvre une approche stochastique dans l'étude des flux de puissance dans leurs réseaux de bord. Le nombre et la diversité des charges deviennent alors des difficultés supplémentaires mais cette situation est justement mieux adaptée à l'approche envisagée.

Si les résultats de ces premiers travaux autour des plates-formes mobiles terrestres ou aériennes sont à la hauteur de nos espérances, les études pourront s'étendre à des installations plus importantes. Pour les réseaux embarqués, il est facile de penser aux navires à passagers, mais les réseaux de distribution industriels, de bâtiments tertiaires ou d'habitations pourraient également faire l'objet de traitements similaires, même si les enjeux dans ces derniers cas sont pour l'instant moins cruciaux.

8.5 Application à la production d'énergie localisée

La remise en cause du quasi-monopole de la production et de la commercialisation de l'énergie électrique en France a fait apparaître de nouveaux et de nombreux producteurs, dispersés sur le territoire. Cette 'décentralisation' s'accompagne d'une montée en puissance des énergies renouvelables notamment d'origine éolienne, contribuant au changement du paysage électrique français. D'autres pays connaissent cette situation depuis plus longtemps ; aussi s'avère-t-il intéressant d'observer les phénomènes qui les préoccupent.

A la fin de l'été 2003, de nombreux incidents majeurs ont eu lieu, privant d'électricité des régions, voire des pays entiers, pendant plusieurs heures et même parfois durant plusieurs jours :

- 14 Août, 23 centrales sont déconnectées en 3 minutes, plongeant dans le 'noir' la région allant de New York à Toronto (coût estimé de 6 milliards de \$),
- 28 Août, une partie de Londres se retrouve sans alimentation durant 40 minutes, suite au dysfonctionnement d'un relais automatique de protection,
- 23 Septembre, un problème de refroidissement provoque l'arrêt d'un réacteur nucléaire en Suède, entraînant à sa suite l'effondrement de la moitié des réseaux suédois et danois,
- 28 Septembre, la surcharge des lignes venant de Suisse et l'ouverture d'une ligne franco-italienne font écrouler le réseau italien.

Sans entrer dans un débat sur la libéralisation du marché de l'électricité et ses possibles conséquences sur les investissements et la maintenance des installations, il semble que tous ces événements aient pour origine un incident relativement mineur, mais ayant pour conséquence l'écroulement des réseaux de transport. Ceci montre que les centres de production et les réseaux électriques opèrent en limite de fonctionnement avec très peu de marges de manœuvre. Il est fort à parier que cette tendance se poursuivra dans l'avenir où les questions d'optimisation et de rentabilité des installations seront toujours à l'ordre du jour.

Dans certains pays comme le Danemark, l'introduction massive de fermes éoliennes amène cette source d'énergie à prendre une part prépondérante. Cependant, si cette source est renouvelable, elle est malheureusement tributaire de la présence et de la vitesse des vents. Ces derniers étant fortement variables, la fourniture d'énergie électrique d'origine éolienne ne peut être constante. Lorsque ces variations affectent une part importante de la production totale, l'usage de sources d'appoint 'classiques' devient plus délicat à mettre en œuvre. L'adéquation entre puissance produite et puissance consommée peut alors ne plus être satisfaite, compromettant la stabilité du réseau. Ces situations peuvent conduire finalement à une déconnexion partielle du réseau pour en sauvegarder une partie, ou pire encore, à son écroulement complet.

Ces quelques exemples illustrent la relative fragilité des systèmes de distribution. Pour des raisons différentes, leur fiabilité est d'ores et déjà remise en cause dans certaines régions. Compte tenu de nos centres d'intérêts, nous ne chercherons pas à remédier aux problèmes liés à des choix de gestion guidés par des contraintes économiques ou des profits à court terme. Sur un plan plus scientifique, une anticipation des situations critiques, telle que le non équilibre entre les possibilités de production et les demandes de consommation, permettrait

de prendre des mesures compensatoires adaptées et en temps utile (mise en service de centrales de réserve, réduction de la consommation / déconnexion de charges 'privilégiées'...).

La gestion des réseaux d'énergie repose déjà beaucoup sur des modèles de prévision des consommations à court, moyen et long termes. Jusqu'à présent dans une structure fortement centralisée et reposant sur des centrales thermiques (nucléaire, charbon...), l'équilibre était assuré par la disponibilité d'un nombre suffisant d'unités, chacune fournissant une puissance nominale parfaitement identifiée. Lorsque l'approvisionnement est réalisé pour une part non négligeable par des sources de production non constantes comme des éoliennes, il faut également estimer la puissance qui sera disponible. Si celle-ci dépend de paramètres extérieurs non contrôlables, comme la vitesse du vent ou l'ensoleillement, sa prévision devient plus complexe que dans le cas d'une centrale thermique ou un barrage hydraulique.

Dans ce contexte, les travaux actuels et futurs traitant de la prévision des grandeurs électriques et en particulier de la puissance seraient susceptibles de trouver un nouveau champ d'applications. Les méthodes et outils développés dans le cadre des bilans de puissance et de la consommation de charges intermittentes et variables plus ou moins aléatoirement apporteraient une précision supplémentaire dans les estimations des puissances produites par certaines sources. L'objectif serait de rendre ces dernières les plus réalistes possibles en intégrant certains facteurs aléatoires : variabilité de la vitesse du vent, de l'ensoleillement, répartition de la puissance résultante issue d'un grand nombre de sources (ex : ferme éolienne, panneaux solaires sur un territoire donné).

Ces outils prévisionnels paraissent mieux appropriés à des structures de distribution locales qu'à des évaluations sur un plan national. Il est entendu qu'une estimation plus réaliste des productions et consommations locales apportent nécessairement des résultats plus précis à des échelles géographiques plus grandes. Les quelques configurations suivantes s'adaptent à nos études prévisionnelles :

a) Producteur multi-sources

Un seul centre de production est constitué d'une multitude de générateurs, chacun d'eux présentant un fonctionnement indépendant et éventuellement aléatoire, comme dans l'exemple d'une ferme d'éoliennes. Le but serait alors de déterminer la puissance potentiellement disponible dans un futur plus ou moins proche (plusieurs minutes, quelques heures).

b) Centre industriel

Dans un souci de réduction de leur coût énergétique, les entreprises s'intéressent de plus en plus à la question de la production, notamment en développant la cogénération. Disposant de

surfaces libres souvent éloignées d'habitations, quelques-unes envisagent d'implanter des sources d'énergie renouvelables. Les raisons de ces investissements tendant à un accroissement d'une production localisée peuvent être diverses : image de l'entreprise, réduction de la facture énergétique, réduction de la dépendance vis-à-vis d'un réseau de distribution, surtout si la fiabilité de celui-ci se réduit... La gestion optimale de ces différentes sources réclame alors une capacité d'anticipation, possible uniquement par une prévision des puissances générées et consommées localement. De plus, ces prévisions fourniraient les informations indispensables pour contractualiser au mieux les échanges d'énergie avec un distributeur ou une société productrice.

c) Collectivité

En imaginant une généralisation de certaines expériences, comme dans la ville de Fribourg, des générateurs de faibles puissances (éoliens, solaires, géothermiques...) mais en grand nombre pourraient être implantés dans l'habitat auprès des particuliers ou au niveau d'une collectivité territoriale. L'objectif serait alors d'optimiser l'utilisation de l'énergie électrique sur un plan local, tout en anticipant les échanges avec le réseau de distribution ou de transport.

d) Réseau îloté

La problématique est similaire à celle des grands réseaux de transport et de distribution, mais les structures étant réduites, les phénomènes de foisonnement et la disponibilité de générateurs additionnels sont restreints. Les marges de manœuvre le sont également et dans ces conditions, le réalisme de la prévision des échanges d'énergie peut s'avérer crucial pour une bonne conduite du réseau et des équipements qui lui sont raccordés.

8.6 Conclusion

Soit au moment de la conception d'une installation, soit lors de son exploitation, il semble important de pouvoir anticiper les éventuels défauts ou dysfonctionnements susceptibles d'apparaître ou du moins d'en évaluer les risques. Cette anticipation des phénomènes fait intervenir la notion de prévision, où nos travaux antérieurs ont montré qu'une approche stochastique amenait à des estimations plus réalistes.

Le paysage électrique évoluant vers une production moins centralisée ainsi que vers des sources d'énergie variées et peut être moins contrôlables, l'emploi d'outils probabilistes permettrait d'estimer les puissances produites à des échéances temporelles plus ou moins longues selon les besoins. Compte tenu de notre expérience, nous limiterons nos investigations au cas général des réseaux à faible puissance de court circuit et plus spécifiquement à quelques situations correspondant à des réseaux 'localisés' (centres industriels, collectivités) ou îlotés.

Les conditions d'étude des réseaux électriques de plates-formes mobiles sont semblables à celles des réseaux îlotés avec toutes les contraintes supplémentaires liées à leur embarquement. Les possibilités de modifications ultérieures étant fortement réduites, leur conception doit être réaliste et rigoureuse. Les prévisions des puissances absorbées à bord, pour divers profils d'utilisation sont alors déterminantes pour établir les bilans de puissance et dimensionner les matériels de manière optimale. Les travaux futurs sur l'estimation des puissances consommées devraient permettre d'adapter les modèles prévisionnels déjà établis et certainement d'en proposer d'autres pour répondre au mieux à chaque situation rencontrée. Notre approche probabiliste de cette problématique est susceptible d'apporter des résultats prometteurs et les collaborations industrielles engagées sur ce sujet nous confortent à poursuivre nos travaux dans cette voie.

Conclusion

Conclusion générale

9 CONCLUSION GENERALE

Comme nous le rappelons dans l'introduction de ce mémoire, les perturbations basses fréquences sont apparues (harmoniques, sous-harmoniques...) dès l'origine des réseaux alternatifs, venant modifier l'allure des tensions distribuées. Malgré les progrès techniques et parfois en raison de ceux-ci, cette cohabitation a perduré jusqu'à aujourd'hui. Tant que les effets sont restés supportables sur un plan technique et financier, ces perturbations ont été tolérées. Pourtant depuis ces dernières décennies, avec la multiplicité des convertisseurs de puissance, les perturbations basses fréquences sont devenues de moins en moins marginales. Presque redécouverte, elles ont fait l'objet d'un plus grand nombre de recherches.

C'est dans ce contexte, qu'en 1993, nous nous sommes intéressés aux phénomènes harmoniques dans les réseaux à faible puissance de court-circuit et tout particulièrement les réseaux embarqués des navires. Ces études ont débuté dans un cadre peu concurrentiel en raison du faible nombre de laboratoires de génie électrique travaillant sur la thématique du couple réseau-perturbation.

Dès leur origine, nos études ont eu pour objectif l'identification et surtout la prévision des perturbations, afin d'en tenir compte au plus tôt dans la phase de conception d'une installation et par la même, de choisir les solutions optimales (dimensionnement des matériels, structure de convertisseurs, filtrage...), en termes technique et économique.

Les harmoniques et les interharmoniques ont été traités d'un point de vue déterministe, c'est-à-dire en supposant les grandeurs électriques parfaitement identifiables et définies à chaque instant. Toutefois, compte tenu de la spécificité des installations envisagées, présentant une multitude de charges non linéaires au fonctionnement plus ou moins variable, très tôt cette approche a montré ses limites. En adoptant un regard probabiliste et en considérant les courants électriques comme le résultat de processus partiellement ou totalement aléatoires, une approche stochastique a pu être mise en place. Celle-ci nécessite une nouvelle représentation des grandeurs électriques et l'emploi d'outils mathématiques basés sur la théorie des probabilités. Les nombreux exemples proposés dans ce mémoire auront, je l'espère, convaincus le lecteur de l'efficacité d'une telle approche et lui auront montré les possibilités d'étudier des situations particulièrement complexes et difficilement envisageables par une approche purement déterministe des problèmes.

En considérant l'évolution temporelle des perturbations harmoniques nous avons abordé la question de la prévision à court et moyen termes des perturbations conduites, autorisant une éventuelle réaction en temps réel, dans l'hypothèse d'un dépassement de seuils critiques. De plus la fourniture d'information sur la durée d'application de ces perturbations permet d'évaluer leur impact sur les contraintes thermiques supplémentaires imposées aux matériels ou sur la durée de vie des équipements.

Cette synthèse des travaux réalisés jusqu'à présent, conduit naturellement à des perspectives de recherche sur des échelles de temps différentes. A court terme, nous prévoyons la poursuite des études actuelles sur les perturbations basses fréquences, étendues aux courants de mode commun susceptibles de circuler dans les conducteurs de protection (PE) et les masses. Ce dernier point mérite d'être largement approfondi dans le cadre de la discrétion électromagnétique des navires tout électrique. Dans ce contexte, la plate-forme réseau en projet au laboratoire, devrait nous offrir un bon outil expérimental, avec la possibilité de reproduire à 'volonté' des observations et de valider les modélisations développées.

Les questions énergétiques vont sûrement se poser de manière de plus en plus cruciales dans l'avenir, avec une augmentation des coûts et des contraintes environnementales. L'usage de sources de production dispersées devrait alors se développer. D'un autre côté, la maîtrise des consommations ou encore une meilleure gestion de la puissance souscrite pour un site industriel ou à l'échelle d'une collectivité peut certainement apporter des gains substantiels. Dans ces deux situations, une prévision la plus réaliste possible de l'énergie générée ou absorbée fournirait une aide précieuse, que ce soit pour une conception optimale des installations électriques ou pour une exploitation rationnelle de celles-ci. A plus long terme, les modèles et outils développés dans le cadre de l'approche stochastique des perturbations harmoniques doivent trouver là un nouveau champ d'applications. De plus, leur développement, en particulier par une intégration plus poussée des aspects temporels (profils d'utilisation des charges, évolution des puissances...), permettrait de traiter des configurations plus complexes, susceptibles d'apparaître dans le futur : production multi-sources, sources et charges intermittentes ou au fonctionnement variable et plus ou moins aléatoire...

En tant qu'électrotechniciens, nous appliquons des outils probabilistes à des problématiques du génie électrique. Nos limites sont déjà apparus au sujet de la modélisation des harmoniques en amplitude et en durée par des lois multi-variables *dépendantes*. Cette difficulté se présenterait à nouveau si nous désirions étendre l'approche stochastiques aux perturbations interharmoniques où la fréquence deviendrait une variable aléatoire supplémentaire. Avant d'entamer de telles études, une collaboration serait à établir avec des

chercheurs plus spécialisés dans la théorie des probabilités et les outils mathématiques associés.

Jusqu'à présent, nos travaux se déroulent le plus souvent en liaison avec des entreprises. Du fait du caractère fortement appliqué de nos recherches, ces collaborations nous sont indispensables pour d'une part disposer d'installations dans les phases expérimentales et d'autre part, pour mieux cerner les difficultés à résoudre en étant confronté aux situations réelles. Dans ce contexte, certaines opérations de transfert de technologie peuvent ainsi s'avérer riche d'enseignement et conduire ultérieurement à de nouveaux axes de recherche ou tout simplement contribuer à parfaire notre connaissance des installations industrielles. Dans l'avenir, sans abandonner ce type de relation, il me semble également nécessaire d'établir des collaborations privilégiées avec quelques entreprises, sur des sujets plus ambitieux dont les résultats sont à attendre sur du moyen terme. Nos partenariats actuels GESMA-Chantiers de l'Atlantique, ETAS-Thalès, Seeds-Airbus sont sûrement des exemples à poursuivre. L'expérience de ces relations industrielles m'a cependant montré qu'il était parfois bien difficile d'impliquer une entreprise en raison, soit des délais incompatibles avec ses propres impératifs, soit de la problématique encore trop 'amont' pour être exploitable à court ou moyen terme. Dans ces situations, les aides institutionnelles sont alors nécessaires pour lancer néanmoins les études et rechercher par la suite des partenaires. Ces aides étant malheureusement limitées, leur affectation à un thème particulier de recherche relève alors d'un choix stratégique du laboratoire selon sa propre politique de développement.

Le nombre croissant d'équipes de recherche s'intéressant aux réseaux d'énergie électrique, la complexité accrue des problèmes de qualité et de fiabilité de ces derniers et enfin l'intérêt des entreprises porté à nos travaux, m'incite à penser que notre thématique et la manière dont nous l'abordons sont promises à un avenir certain.

Bibliographie

- [Abadie_79] J. Abadie & F. Meslier - "Etude de l'utilisation des modèles ARIMA pour la prévision à très court terme de l'énergie journalière produite par Electricité de France", R.A.I.R.O. - Recherche Opérationnelle / Operations Research, Vol. 13, No.1, pp. : 37-54, Février 1979.
- [Akagi_95] H.Akagi, 'New trends in active filters', European Conference on Power Electronics and Application (EPE), Seville, pp 0.017-0.026, 1995
- [Alfares_02] H.K. Alfares and M. Nazeeruddin, 'Electric load forecasting : literature survey and classification of methods', International Journal of Systems Science, vol. 33, n°1, pp : 23-34, 2002
- [Armagnat_02] H. Armagnat, 'Application des oscillographes à la méthode de résonance, Eclairage électrique, t. XXX, pp 373-385, mars 1902.
- [Ba_99] O.Ba, R.Bergeron , " Harmonic Cost on distribution Power System " 5th conference Electrical Power Quality and Utility, Krakow, Poland, vol n°2, 7p, Sept. 1999.
- [Baghzouz_87] Y.Baghzouz and O.Tan, "Probabilistic modelling of power system harmonics", IEEE Trans. on Ind. Appl. , vol.IA-23, N°1, Jan./Feb. 1987, pp 173-180.
- [Balerin_04] G. Balerin, 'modélisation fréquentielle du transformateur en régime non sinusoïdal : mise en oeuvre d'un modèle analytique pour études harmoniques des réseaux', mémoire de DEA Electronique de l'université de Nantes, 2004.
- [Barret_97] J.P. Barret, P. Bornard, B. Meyer, 'Simulation des réseaux électriques', collection de la D.E.R. d'E.d.F, Edition Eyrolles, Paris, 1997.
- [Belhaj_05] M. Belhaj, L. Abdeljalil, P. Guérin, R. Le Doeuff, 'Low frequency disturbances in PWM speed drive', Electrical Power Quality and Utilisations, Cracow, Poland, Sept 2005.
- [Bieth_92] J.Bieth, D.Ollivier, J.Lachaume et M.Meunier, «Perturbations harmoniques sur les réseaux français, état des lieux - analyses - tendances», Cigré, n° 36-205, session 1992.
- [Billinton_02] R.B.Billinton, 'Fundamentals on probabilistic methods applied to power system', 7th International conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, tutorial, Sept. 2002.
- [Blondel_05A] A. Blondel, 'Remarques à propos des expériences de M. David', Bulletin de la Société Internationale des Electriciens, pp 207-218, 1905.
- [Blondel_05B] A. Blondel, 'Remarques sur les phénomènes oscillatoires des réseaux ; influence des propriétés de l'arc électrique', Bulletin de la Société Internationale des Electriciens, pp 299-339 & pp 549-577, 1905.
- [Bourguet_03] S. Bourguet, P. Guérin, R. Le Doeuff «Non-characteristic harmonics generated by frequency converters», AES 2003, All Electric Ship, Edimbourg, pp 257-266, 13-14 février 2003.
- [Bourguet_04A] S. Bourguet, P. Guérin, R. Le Doeuff, «Current source inverter perturbations in an all electric ship network», EPE-PEMC 2004, Riga, Lettonie, cdrom, 2-4 septembre 2004.
- [Bourguet_04B] S. Bourguet, P. Guérin, R. Le Doeuff, «Analysis of the interharmonics generated by a ship propulsion system», ICHQP 2004, Lake Placid, United-States, cdrom, 12-15 septembre 2004.
- [Bourguet_04C] S. Bourguet, 'Contribution à l'étude de l'influence du réseau de distribution d'un navire tout électrique sur sa signature électromagnétique', Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, ED 366-186, soutenue le 15 décembre 2004.

- [Brockwell_96] P. J. Brockwell & R. A. Davis - "Time Series : Theory and Method" - Second Edition - Springer series in Statistics - 1996.
- [Bruyant_99] N. Bruyant, 'Etude et commande généralisées de filtres actifs parallèles, compensation globale ou sélective des harmoniques régime équilibré ou déséquilibré', Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes - ED 82-413, 25.11.1999.
- [Brylinski_05] M. Brylinski, ' Sur les réseaux alternatifs à haute tension', Bulletin de la Société Internationale des Electriciens, pp 149-206, 1905.
- [Cano_01] J.M. Cano, G.A. Orcajo, J.G. Mayordomo & al, 'New transfert functions for an accurate estimation of harmonic distortion in AC/DC converters working under unbalanced conditions', IEEE Trans. on Industy Applications, Vol 37, n°2, pp 642-649, March/April 2001.
- [Carpinelli_02] G. Carpinelli, A. Testa, 'Probabilistic power system harmonics', 7th International conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, tutorial, Sept. 2002.
- [Claude_00] G. Claude, 'Sur l'élimination des harmoniques des courants alternatifs industriels par l'emploi des condensateurs et sur l'intérêt de cette élimination au point de vue de la sécurité pour la vie humaine', L'Eclairage Electrique, tome XXV, n°46, pp 286-287, 17 Novembre 1900.
- [Cockrell_53] W.D. Cockrell, 'Les circuits de contrôle électronique dans l'industrie', Dunod, 1953.
- [Corbyn_72] D.B. Corbyn, »This business of harmonics«, Electronics & Power, pp 219-223, June 1972.
- [Crucq_89] J.M. Crucq and A. Robert, «Statistical approach for harmonics measurements and calculations», 10th Int. Conf. on Elec. Distribution, Brighton, pp 91-96, May 1989.
- [David_05A] Ch. David, 'Recherches oscillographiques effectuées par le laboratoire central d'électricité sur le réseau à haute tension de lacompagnie "l'énergie électrique du littoral méditerranéen" ', Bulletin de la Société Internationale des Electriciens, pp 51-93, 1905.
- [David_05B] Ch. David, 'Note sur la forme des courbes de tension avant et après transformation', Bulletin de la Société Internationale des Electriciens, pp 239-245, 1905.
- [Deflandre_98] T. Deflandre & P. Mauras - "Les harmoniques sur les réseaux électriques" - Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France - Editions Eyrolles - 1998.
- [Deprez_81] M. Deprez, 'Transport et distribution de l'énergie par l'électricité', La Lumière Electrique, n°71, pp 309-332, 3 Décembre 1881.
- [Dobinson_75] L.G. Dobinson, «Closer accord on harmonics», Electronics and Power, pp 567-572, May 1975.
- [Droesbeke_92] J.J. Droesbeke, «Eléments de statistique», Editions Ellipses - 2ème édition - 1992.
- [Emanuel_91] A.E. Emanuel, J.A. Orr, D. Cyganski and E.M. Gulachenski, «A survey of harmonic voltages and currents at distribution substations», IEEE Trans. on Pow. Del., vol.6, N°4, pp 1883-1890, October 1991.
- [Emanuel_93] A.E. Emanuel, J.A. Orr, D. Cyganski and E.M. Gulachenski, «A survey of harmonic voltages and currents at the customer's bus», IEEE Trans. on Pow. Del., vol.8, N°1, pp 411-421, January 1993.
- [Field_03] M. Field, 'Etude oscillographique des phénomènes de résonance dans les circuits électriques' Bulletin de la Société Internationale des Electriciens, pp 358-399, 1903.
- [Gorgette_00] F.A. Gorgette, J. Lachaume, W.M. Grady, 'Statistical summation of the harmonic currents produced by a large number of single phase variable speed air conditioners : a study of three specific designs', IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 15, n°3, pp 953-959, July 2000.
- [Graham_83] A. David Graham and Emil T. Schonholzer, «Line harmonics of converters with DC-motor

loads», IEEE Trans. on Ind. Appl. , vol.IA-19, N° 1, pp 84-93, Jan./Feb 1983.

- [Grötzbach_95] M.Grötzbach, «Simplified predetermination of line current harmonics», IEEE Ind. Appl. Magazine, pp 17-27, March/April 1995.
- [Guérin_00C] P. Guérin, L. Miègeville & K. Sahnouni, "Harmonic Analysis of a Cruise Ship Network", AES'00 (All Electrical Ship) - Paris, pp 177-182, October 2000,
- [Guérin_02A] P. Guérin, L. Miègeville, M. Fertre, "OSCHAR", logiciel, Juillet 2002
- [Guérin_02B] P. Guérin, D. Herbretreau & F. Auger, " Assessment of the harmonic contribution of the supplier and the consumer at the point of common coupling ", 7th International Conference ELECTRIMACS, Montréal, Québec, Canada , paper 243P_Guerin, 6p , August 2002.
- [Guérin_02C] P. Guérin & L. Miègeville, "Identification and Simulation of the Harmonics Generated by a Supermarket", PMAPS 2002, Naples, Italy, pp 419-424, 22-26 September, 2002.
- [Guérin_95A] P. Guérin, M. Machmoum et R. Le Doeuff, 'Probability distributions of harmonic currents in multiple phase-controlled loads', Power Electronics Specialists Conference (PESC), Atlanta, pp 1021-1027, 1995.
- [Guérin_96A] P. Guérin, 'Contribution à l'étude des perturbations harmoniques des réseaux de bord des navires : approches déterministe et stochastique', Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, n° ED.82-168, soutenue le 11.01.1996.
- [Guérin_96B] P. Guérin, P. Lemoine, F. Lopez, 'Prévision des Harmoniques dans les Réseaux Electriques : PHARE', Logiciel & guide utilisateur, Juillet 1996
- [Guérin_97A] P. Guérin et P. Lemoine, 'Analyse harmonique d'un pont redresseur en conduction discontinue', Perturbations Réciproques des Convertisseurs et des Réseaux, Nantes, pp 107-116, January 1997.
- [Guérin_97B] P. Guérin, L. Miègeville et R. Le Doeuff, 'Harmonic study of a gas carrier installation', Power Quality Application (PQA 97 Europe), Stockholm, session 1B, June 1997.
- [Guéry_06] M. Guéry, 'Sur l'utilité et les moyens d'éviter les harmoniques dans les appareils à courants alternatifs', Bulletin de la Société Internationale des Electriciens, pp 101-140, 1906.
- [Histoire_97] 'Histoire de l'électricité en France', tome I, Fayard, 1997.
- [Hu_92] L. Hu and R. Yacamini, 'Harmonic transfer through converters and HVDC links', IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 7, n° 3, , pages 514-525, Juillet 1992.
- [Hu_97] L. Hu and R.E. Morrison, 'The use of modulation theory to calculate the harmonic distortion in HVDC systems operating on an unbalanced supply', IEEE Transactions on Power Systems, vol. 12, n° 2, , pages 973-980, Mai 1997.
- [IEEE_519] IEEE std 519-1992, «IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems», 1992.
- [Kapielian_94] S.R. Kapielian & A.E. Emanuel - "An Improved Real-Time Data Acquisition Method for Estimation of the Thermal Effect of Harmonics" - IEEE Transactions on Power Delivery - Vol. 9 - No. 2 - April 1994 - pp. : 668-674.
- [Kazibwe_89] W.E.Kazibwe, T.H.Ortmeyer and M.S.A.A.Hamman, «Summation of probabilistic harmonic vectors», », IEEE Trans. on Pow. Del., vol.4, N°1, pp 621-628, January 1989.
- [Kniel_74] R. Kniel and P.A.Schnieper, «Summation of harmonics with random phase angles», IEE Proc, vol 121, N° 7, pp 708-709, July 1974.
- [Knuth_81] D.E.Knuth, «The art of computer programming», Addison Wesley, vol 2, second edition, ISBN 0-201-03822-6, 1981.

- [Lachaume_92] J.Lachaume, «Propagation et foisonnement des courants harmoniques sur les réseaux de distribution de l'énergie électrique», Thèse de Docteur de l'université de Paris XI, Juin 1992.
- [Lehtonen_93] M. Lehtonen, "A general solution to the harmonics summation problem", ETEP vol.3, n°3, July/August 1993, pp 293-297.
- [Lemoine_76] M. Lemoine, " Les perturbations réciproques des équipements électroniques de puissance et des réseaux ", RGE - tome 85 - n°3, Mars 1976, pp 247-255.
- [Lemoine_96] P. Lemoine, 'Etude des courants harmoniques produits par un ensemble de ponts redresseurs en conduction discontinue', mémoire de DEA Electronique de l'université de Nantes, 1996.
- [Letzelter_96] J. Letzelter - "Contribution à l'étude des perturbations harmoniques industrielles en France", Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, Février 1996.
- [Miègeville_00A] L. Miègeville & P. Guérin, "Identification of the Harmonic Currents Drawn by an Institutional Building : Application of a Stochastic Approach" , ICHQP 2000 - Orlando, United-States, pp 595-601, October 2000.
- [Miègeville_01A] L. Miègeville et P. Guérin, 'Analytical Model for Assessment of the Line Harmonic Currents Generated by a Variable Speed Drive', European Transactions on Electrical Power (ETEP), vol.11, n°1, pp 57-64, January/February 2001.
- [Miègeville_02B] L.Miègeville & P. Guérin - "A Stochastic Forecast Method to Characterise the Time-Varying Harmonics in Electrical Networks", PMAPS 2002, Naples, Italy, pp 267-272, 22-26 September, 2002.
- [Miègeville_06] L. Miègeville & P. Guérin, 'Identification of time-varying pattern of periodic harmonics', IEEE Transactions on Power Delivery, vol 21, n°2, à paraître en Avril 2006.
- [Miègeville_98A] L. Miègeville, P. Guérin et R. Le Doeuff, 'Statistical assessment of the harmonic contribution to overload effects', Power Electronics & Variable speed Drives (PEVD 98), Londre, pp 668-673, 21-23 September 1998.
- [Miègeville_98B] L. Miègeville, P. Guérin et R. Le Doeuff, 'Stochastic assessment of power supplied to intermittent loads', 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP 98), Athènes, pp 1029-1034, 14-16 October 1998.
- [Miègeville_99] L. Miègeville, 'Contribution à l'Analyse Prévisionnelle et Stochastique des Perturbations des Réseaux Electriques par des Charges Non Linéaires' - Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes - ED 82-384, soutenue le 23.09.1999.
- [Moghram_89] I. Moghram and S. Rahman, 'Analysis and evaluation of five short-term load forecasting techniques', IEEE Trans. on Power System, vol. 4, n°4, pp1484-1491, October 1989.
- [Mombauer_93] W.Mombauer and K.-H.Weck, «Load modelling for harmonic flow calculations», ETEP vol.3, N°6, pp 453-460, Nov-Dec 1993.
- [Ngandui_98] E. Ngandui, G. Olivier, G.E. April, A. Oury Ba, 'Comprehensive switching functions approach to calculate harmonics produced by multipulse thyristor converters operating under unbalanced supply', Harmonics And Quality of Power, 1998. Proceedings. 8th International Conference on, Volume 2, pp 837 – 843, vol.2, 14-16 Oct. 1998.
- [Olivier_98] G. Olivier & C. Paun - "Echauffement des transformateurs en régime non sinusoïdal" - Revue Internationale de Génie Electrique (RIGE) - Vol.1 - No.2 - 1998 - pp. : 203-224.
- [Papoulis_91] A. Papoulis, "Probability, random variables and stochastic processes ", 3rd edition, Mc Graw Hill - New York, ISBN 0-07-048477-5, 1991.
- [Pelly71] Thyristor Phase-Controlled Converters and Cycloconverters, B.R. Pelly, Wiley-Interscience, 1971

- [Peng_90A] F.Z.Peng, H.Akagi and A.Nabae, «A study of active power filters using quad-series voltage-source PWM converters for harmonic compensation», IEEE Trans. on pow. Elec., vol.5, N°1, pp 9-15, Janury 1990.
- [Perard_79] J.Perard, E.Toutain et M.Nougaret, «Modélisation des convertisseurs d'énergie par un schéma équivalent», L'Onde Electrique, vol.59, N°12, pp 81-88, 1979.
- [Picou_04] M. Picou, 'Oscillations électriques et surélévations de tension correspondantes', Bulletin de la Société Internationale des Electriciens, pp 267-323, 1904.
- [Pierrat_91A] L.Pierrat, «A unified statistical approach to vectorial summation of random harmonic components», EPE Firenze , vol. 3, pp 100-105, 1991.
- [Press_94] W.H.Press, S.A.Teukolsky, W.T.Vetterling and B.P.Flannery, «Numérical recipes in C», second edition, Cambridge university press, ISBN 0-521-43108-5, 1994.
- [Read_45] J.C.Read, 'The calculation of rectifier and inverter performance characteristics', JIEE, 92, Pt II, pp 497-509, 1945.
- [Riu_01] D. Riu, 'Modélisation des courants induits dans les machines électriques par des systèmes d'ordre un demi', Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 11.12.2001.
- [Riu_03] D. Riu, P. Guérin & N.Retière, "Transformer modelling by half-order system", EPE 2003, Toulouse, France, cdrom, 2003.
- [Rowe_74] N.B.Rowe, «The summation of randomly-varying phasors or vectors with particular reference to harmonic levels», IEE Conf. Pub. , N°110, pp 177-181, 1974.
- [Rubinstein_81] R.Y.Rubinstein, «Simulation and Monte Carlo method», John Wiley & Sons 1981.
- [Sakui_92] M.Sakui and H.Fujita, «Calculation of harmonic currents in a three-phase convertor with unbalanced power supply conditions», IEE Proc-B, vol.139, N°5, pp 478-484, 1992.
- [Sherman_72] W.G.Sherman, «Summation of harmonics with random phase angles», IEE Proc, vol 119, N°11, pp 1643-1648, November 1972.
- [Tou_92] M.Tou et al, «Analyse assistée par ordinateur des répercussions sur un réseau d'alimentation de système multi-convertisseurs de puissance», Perturbations Réciproques des Convertisseurs et des Réseaux, Nantes, pp 61-68, 1992.
- [Ventsel_73] H. Ventsel, " Théorie des probabilités ", MIR Moscou, 1973.
- [Wang_93] Y.J.Wang, 'Modélisation déterministe et probabiliste en régime harmonique d'un convertisseur triphasé à commutation naturelle', Thèse de docteur de l'INP de Grenoble, Mars 1993.
- [Yacamini_80] R.Yacamini and J.C.de Oliveira, «Harmonics in multiple convertor systems : a generalised approach», IEE proc, vol 127, Pt B, n° 2, pp 96-106, March 1980.

