

9<sup>e</sup> année

# La Revue 3E.I



Journées  
**3eI! 2003**  
-éclairage-induction-

*Centre Scientifique et  
technologique  
de l'ufm de Créteil  
- Saint-denis-*

**20 & 21 mars 2003**

un événement co-organisé par :

**IUFM  
de  
Créteil** 

parrainé par :

 **DGA** 

avec le soutien de :

La Revue **3E.I**   

Contact : *iufm-3ei creteil.iufm.fr*

La petite histoire  
des transports  
urbains



Crédit Photo : RATP

Mesures  
dans des  
systèmes  
électro  
techniques

Publication trimestrielle du Cercle Thématique 13.01 de la SEE

ENSEIGNER L'ELECTROTECHNIQUE ET L'ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE



Société de l'Electricité, de l'Electronique  
et des Technologies de l'Information  
et de la Communication

N° 31 - Décembre 2002



# JOURNEES 3EI'2003 Eclairage - Induction



## Programme prévisionnel

### Induction (jeudi 20 mars)

**Claude OBERLIN** EDF Présentation : principe et applications du chauffage par induction

**Jacques NUNS** – EDF R&D : Alimentations pour fours industriels (structures, perturbations électriques et CEM)

**Noël BURAI**S – CEGELY: Les plaques à induction (étude de l'inducteur)

**François FOREST** – LEM : Présentation d'une application domestique et des contraintes industrielles, exposé sur la partie convertisseur

**Pascal RIVAT** (CFEI) : traitement de surface

Présentation de maquettes pédagogiques

**Alain GUIGNABEL** – SCHNEIDER – Présentation de la maquette " HARMOCEM "

### Eclairage (21 mars)

**Jean-Jacques DAMELINCOURT**– CPAT: Lumière et environnement visuel.

**Jean BASTIE** – CNAM : Aspect mesure en éclairage

**Georges ZISSIS** – CPAT : Etat de l'art dans le domaine des sources de lumière de la lampe à incandescence aux LEDs et O-LEDs en passant par les lampes à décharge.

**M. SERGENT** – IUFM de Lille : Projet d'éclairage

Association Française de l'Éclairage - AFE :

1 – Ballasts électroniques : technologie et fonctionnement

2 – Lampes à induction

**Pierre ALBOU** – VALEO : Eclairage et automobile (contraintes industrielles et technologies)

Présentation de maquettes pédagogiques

## 20 et 21 mars 2003

IUFM de Créteil, site de Saint-Denis

Centre Scientifique et Technologique, place du 8 mai 1945

93 203 SAINT-DENIS

Renseignements sur le site WEB des journées 3EI

<http://etp.creteil.iufm.fr/evenements-internes/int-journées-3EI.htm>

Inscriptions : renvoyer, à la SEE, le bulletin page 1



La Revue  
**3E.I**



# JOURNEES

# 3EI'2003

Eclairage - Induction

20 et 21 mars 2003,

IUFM de Créteil, site de Saint-Denis, place du 8 mai 1945, 93 203 SAINT-DENIS

pour toute information : SITE IUFM : [www.etp.creteil.iufm.fr/evenements/](http://www.etp.creteil.iufm.fr/evenements/) ou site de la SEE : [www.see.asso.fr](http://www.see.asso.fr)

Nombre maximal de participants : 200

## FICHE D'INSCRIPTION A RETOURNER A LA SEE :

SEE - Journées 3EI'2003

17, rue Hamelin, PARIS CEDEX 16

(en cas de date limite, expédier le formulaire par fax ou par E.mail avant l'envoi postal)

fax : 01 56 90 37 08

E-mail : [congres@see.asso.fr](mailto:congres@see.asso.fr)

Mme,  Mlle,  M.

NOM : .....

Prénom : .....

Fonction/Titre : .....

Organisme ou Société : .....

Service : .....

Adresse : .....

Code Postal : .....

Ville : .....

Pays : .....

Télécopie : .....

Téléphone : .....

E-mail (écrire très lisiblement) : .....

.....

.....

(seule l'adresse électronique sera communiquée sur la liste des participants)

Les frais d'inscription comprennent :

la participation aux sessions, les actes de la conférence (recueil et CD-ROM, la liste des participants)

Cocher la case correspondante à votre situation

Inscription aux journées 3EI	Avant le 1 <sup>er</sup> mars 2003	Après le 1 <sup>er</sup> mars 2003
Enseignants du secondaire et professeurs Agrégés	<input type="checkbox"/> 30	<input type="checkbox"/> 30
Universitaires	<input type="checkbox"/> 230	<input type="checkbox"/> 250
Industriels	<input type="checkbox"/> 280	<input type="checkbox"/> 320
Déjeuner du 20 mars		<input type="checkbox"/> 10
Déjeuner du 21 mars		<input type="checkbox"/> 10

TOTAL DE L'INSCRIPTION: .....€

L'inscription sera définitive à réception de la fiche d'inscription et du bon de commande ou du chèque.

Mode de paiement :

Bon de commande de l'administration publique

Chèque en Euros, libellé à l'ordre de la SEE

**La Revue 3EI, départ de la neuvième année ...**

Le numéro de décembre marque le début de la nouvelle année d'abonnement ; celui-ci est réalisé et expédié avec quelque retard, mais pour proposer à nos lecteurs des articles, qui nous l'espérons, satisferont leur attente.

L'appel que nous avons formulé en septembre, concernant le manque d'articles proposés spontanément, semble avoir été entendu ; quelques textes nous ont été adressés, ils seront prochainement édités. Il est indispensable que ces propositions continuent et que leur nombre s'accroisse pour que La Revue 3EI conserve sa spécificité de publication essentiellement axée sur l'enseignement et la formation, dans le domaine de l'électrotechnique et de l'électronique industrielle, et soit **réalisée en étroite collaboration** avec ses lecteurs.

Expédier vos propositions d'articles à l'adresse courriel : [revue3ei.art@voilà.fr](mailto:revue3ei.art@voilà.fr) ou par courrier postal à  
**La Revue 3EI-SEE, 17, rue Hamelin, 75 783 PARIS CEDEX 16**

**Renouvellement des membres de l'Équipe de publication,**

L'Équipe d'animation de la revue est constituée de membres passionnés par l'enseignement et la formation : industriels, universitaires, enseignants, la composent. Pour conserver son dynamisme et sa productivité il faut penser au renouvellement de ses membres quand, pour diverses raisons ils ne peuvent ou ne souhaitent plus être un élément actif du groupe.

**Jean-Pierre CARON**, élément moteur du groupe 3EI de la SEE, participant activement à la réussite des diverses Journées 3EI et ce, dès leur création en 1993, et travaillant à la réalisation de La Revue 3EI dès le numéro "0" souhaite utiliser le temps d'une retraite bien méritée, à des occupations, nombreuses, mais quelque peu éloignées du domaine 3EI, ce que nous comprenons. Toute l'Équipe le remercie pour le travail accompli et l'encouragement pour ses nouvelles activités.

La rédaction renouvelle, à l'occasion du départ de Jean-Pierre CARON, son appel à volontaires partageant la même passion, prêts à rejoindre pour participer à continuer le travail engagé.

**Être Abonné à La Revue 3EI et bénéficier des privilèges offerts aux adhérents de la SEE, est désormais possible si vous êtes professeur en lycée ou PRAG !**

La SEE offre aux enseignants des lycées et PRAG, abonnés pour l'année 2002 / 2003 à la **Revue 3EI**, la possibilité de devenir adhérent à un **tarif d'adhésion préférentiel** : 25 € (en France) au lieu de 80 € (plein tarif). Cette adhésion leur donne des privilèges (bulletin d'adhésion disponible sur le site de la SEE: [see.asso.fr](http://see.asso.fr))

- un tarif d'abonnement à la **REE** à 86 € au lieu de 138 €

- une remise de 20% sur l'achat des recueils des conférences SEE des années 2000 / 2001 / 2002 ;

- des inscriptions aux Journées d'Études et Congrès SEE, concernant le domaine 3EI, à des tarifs réduits.

liste des manifestations disponible sur demande en contactant la **SEE/Service Congrès**  
 - tél 01 56 90 37 03 ou 04, par fax 01 56 90 37 08, par Courriel : [congres@see.asso.fr](mailto:congres@see.asso.fr)  
 - sur visite du site de la SEE : [see.asso.fr](http://see.asso.fr).

et leur permet des avantages particuliers tels que l'achat de

**quatre numéros de la REE** au tarif de 40 € (au lieu de 59,60 €) (1)

**ou cinq numéros** au tarif de 47 € (au lieu de 74,50 €) (2)

(1) et (2) à choisir d'après le programme rédactionnel de la publication.

**Programme rédactionnel 2003 de la REE**

D / Dossier – R / Repères (sous réserves de modifications)

Janvier N° 1/03	D. Les ondes terahertz R. L'histoire des radars en France et dans le monde	Juillet N° 7/03	D. Sélection d'articles de PSIP R. Fréquences : partager le spectre autrement
Février N° 2/03	D. La connectique R. UMTS : quelles avancées en traitement du signal ?	Septembre N° 8/03	D. Les nanotechnologies R. Les systèmes critiques face aux malveillances
Mars N° 3/03	D. L'aéronautique face à l'enjeu des fréquences radio R. Utilisation des techniques séparatives dans l'industrie	Octobre N° 9/03	D. Les matériaux en génie électrique R. Les systèmes hybrides
Avril N° 4/03	D. Électricité et électronique au service de l'eau	Novembre N° 10/03	D. Les matériels électriques de poste R. Imagerie pour les sciences du vivant
Mai N° 5/03	D. La cinématographie ultra rapide R. Ouverture des marchés de l'électricité et re-régulation R. Les communications optiques	Décembre N° 11/03	D. Principe de précaution dans l'aide à la décision dans l'industrie R. Internet et télévision R. Méthodes de diagnostic des machines électriques
Juin N° 6/03	D. Avancées techniques dans le domaine des câbles d'énergie R. Maîtrise de l'échelonnement des essais		

**Erratum :** " L'Aérotrain ", La Revue 3EI n°31. Monsieur BERTHELOT nous informe qu'une erreur s'est glissée lors de la rédaction de son article sur l'histoire de l'aérotrain. Page 92, fin du paragraphe 8.1 TGV, il faut lire : "...malgré l'implantation en France, **L'exportation** du procédé s'est avérée très réduite sinon impossible."

**Abonnement à la Revue 3EI, année 2002-2003 : Numéros : 31 (décembre 2002), 32 (mars), 33 (juin) et 34 (septembre 2003).**

<b>Abonnement individuel :</b>	<b>Abonnement collectif souscrit par bon de commande (bibliothèque, CDI, laboratoire, entreprise, etc.)</b>
France et Pays de la CEE : 30 €, TTC	France et Pays de la CEE : 45 €, TTC
Pays hors CEE : 40 €, TTC	Pays hors CEE : 60 €, TTC

Une seule adresse : **La Revue 3EI-SEE, 17, rue Hamelin, 75 783 PARIS Cedex 16**



**SOCIÉTÉ de l'ELECTRICITÉ, de l'ELECTRONIQUE et des TECHNOLOGIES de l'INFORMATION et de la COMMUNICATION.**

17, rue Hamelin, PARIS 75 783 CEDEX 16

Tel : 01 56 90 37 00 fax : 01 56 90 37 19

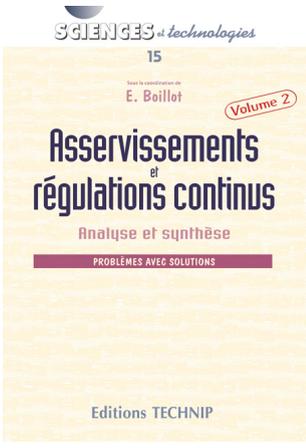
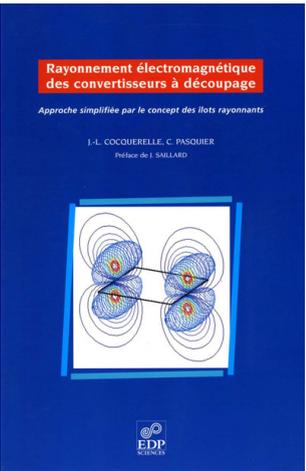
SEE, association reconnue d'utilité publique par le décret du 7 décembre 1886  
Siret 785 393 232 00026, APE 731 Z, n° d'identification FR 44 785 393 232

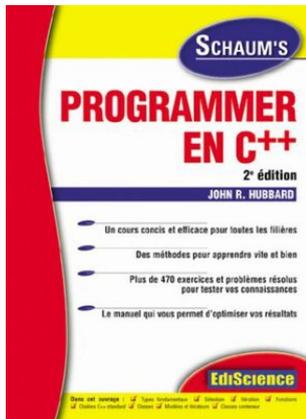
**La REVUE 3EI** publication trimestrielle du **Cercle Thématique 13-01 de la SEE :**  
**Enseignement de l'Electrotechnique et de l'Electronique Industrielle.**

<p><i>Edition SEE, 17 rue Hamelin 75 783 PARIS CEDEX 16</i></p> <p><b>Directeur de la publication</b> <b>François AILLERET</b> <i>Président de la SEE</i></p> <p><b>Rédacteur en Chef</b> <b>François BOUCHER</b></p> <p><b>Comité de publication</b> Jean BONAL Jean-Claude BOUDENOT Gérard DELAVIER Jean FAUCHER Gilles FELD François FOREST Brigitte GRELAUD Jean-Philippe ILARY Michel LAVABRE Marie-Michèle LE BIHAN Pascal LOOS Michel MEUNIER Bernard. MULTON Philippe NEVEU Oviglio SALA Michel THION</p> <p><b>Site WEB</b> (<i>lesite3EI.com</i>) <i>Responsable : Philippe LE BRUN</i></p> <p><i>Jean-Pierre TAREL Jean-Philippe ILARY</i></p> <p><b>Abonnement annuel</b> ( 4 numéros) <i>Année scolaire 2002/2003, tarifs TTC :</i></p> <p><b>Individuel :</b> France et CEE.....30 € Pays hors CEE.....40 €</p> <p><b>Collectivités</b> France et CEE.....45 € Pays hors CEE.....60 €</p> <p><b>Réalisation et impression</b> (1100 ex) <i>Repro-Systèmes 23, rue de Verdun 77 181 Le Pin</i></p> <p><b>Routage et Expédition</b> <i>Départ Presse ZI les Richardets 93 966 Noisy le Grand</i></p> <p><b>Dépôt Légal : décembre 2002</b> <b>Commission Paritaire 1202 G 78028</b> <b>ISSN 1252-770X</b></p>	<p style="text-align: right;"><b>Sommaire du n°31</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Thème : Mesures dans les systèmes électrotechniques</b></p> <p>p. 1 Bulletin d'inscription aux Journées 3EI'2003 p. 2 Éditorial, tarifs d'abonnement. p. 3 Sommaire. p. 4 Publications</p> <hr/> <p style="text-align: right;"><b>Thème</b></p> <p>p. 7. La qualité de l'énergie électrique : problématique et mesures associées. Michel MEUNIER, Supélec, 91 190 Gif sur Yvette.</p> <p>p. 13 Le flicker sur les réseaux d'énergie électrique. Patrick BASTARD, Supélec, 91 190 Gif sur Yvette.</p> <p>p. 20 Puissances : l'actif, le réactif et la complication des harmoniques. Michel MEUNIER, Supélec, 91 190 Gif sur Yvette.</p> <p>p. 24 Mise en évidence par la mesure, des risques d'erreur induits par le relais homopolaire, dans la détection des courants de défaut. François EDDI, Jean-François DING, Société EDUWATT, 75 019 Paris.</p> <p>p. 33 La méthode d'opposition : une vieille dame rajeunie par les besoins de caractérisation et d'étude des convertisseurs statiques. François FOREST, Jean-Jacques HUSELSTEIN, LEM Montpellier II, Frédéric RICHARDEAU, Christophe TURPIN, LEEI, ENSEEIHT, Toulouse.</p> <hr/> <p style="text-align: right;"><b>Recherche et développement</b></p> <p>p.41 Conversion d'énergie à partir d'une éolienne en vitesse variable. Gilles FELD, Michel LAVABRE, ENS-CACHAN.</p> <p>p.46 Aspect économique de la conception des matériels : évolution du concept et souvenirs personnels. Michel POLOUJADOFF, Membre émérite de la SEE, Université Pierre et Marie Curie, PARIS</p> <hr/> <p style="text-align: right;"><b>Application pédagogique</b></p> <p>p.49 Utilisation d'un tableur pour l'étude d'un convertisseur à pompe de charge. Pascal LOOS, Lycée Stanislas, 54 600 Villers les Nancy.</p> <hr/> <p style="text-align: right;"><b>Histoire des sciences et des techniques.</b></p> <p>p.54 Petite histoire des transports urbains. Jacques ROSSETTI, musée des transports Urbains, 92 700 Colombes ; Jean BONAL, ECRIN, 75 015 Paris</p> <p>p.63 L'évolution de l'électronique de puissance en traction ferroviaire : l'ère des thyristors, les principes de la commutation forcée, fonctions permises. Christian LECLERC, Ingénieur Honoraire de la SNCF.</p>
---	---

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans la présente édition, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées.

Toutefois des copies peuvent être utilisées avec l'autorisation de l'éditeur. Celle-ci pourra être obtenue auprès du Centre Français du Droit de Copie, 20, rue des Grands Augustins, 75006 Paris, auquel la Revue 3EI a donné mandat pour la représenter auprès des utilisateurs. (loi du 11 mars 1957, art.40 et 41 et Code Pénal art. 425).

	<p><b>ASSERVISSEMENTS ET REGULATIONS CONTINUS</b>  <b>Analyse et synthèse - Problèmes avec solutions</b></p> <p><i>Sous la coordination de Elisabeth BOILLOT – Ingénieur Supélec ( Service automatique de Supélec )</i>  <b>Éditions TECHNIP, 16x23, 240p , 73 figures, 34 € TTC</b></p> <p><i>Ce volume présente dix nouveaux problèmes d'automatique avec leurs corrigés complets donnés en examen à Supélec et dans d'autres écoles d'ingénieurs. Il aborde des systèmes réels rencontrés dans l'industrie: asservissement d'un oscillateur magnétique, commande d'un mélangeur, pilotage d'altitude d'un ballon d'air chaud, étude d'un échangeur de chaleur, analyse d'une suspension active de bus, régulation de l'épaisseur de tôles d'un laminoir, contrôle de la descente de tête de forage, maîtrise du débit d'une rivière, verrouillage d'une boucle de phase, positionnement d'une bande magnétique. Leur solution met en oeuvre des méthodes d'identification et de modélisation ainsi que des technologies de commande de systèmes asservis : analyse et synthèse par représentation d'état, approche fréquentielle classique pour des systèmes présentant éventuellement un retard pur. Le détail des corrigés permet aux étudiants une meilleure compréhension et assimilation des diverses méthodes développées en cours.</i></p> <p><u>Table des matières:</u>  <i>Etude d'un oscillateur électromagnétique; Etude d'un mélangeur. Régulation d'altitude d'un ballon d'air chaud. Etude d'un échangeur de chaleur. Etude d'une suspension active de bus. Régulation de l'épaisseur en sortie d'un laminoir. Régulation de la descente de tête de forage. Régulation de débit d'une rivière. Etude d'une boucle à verrouillage de phase. Etude du positionnement d'une bande magnétique. Bibliographie.</i></p>
	<p><b>RAYONNEMENT ELECTROMAGNETIQUE DES CONVERTISSEURS A DECOUPAGE</b>  <b>Approche simplifiée par le concept des îlots rayonnants</b></p> <p><b>J.L.Cocquerelle. C. Pasquier</b>  <b>Éditions EDP Sciences- 120 p+CD Rom, 29 € TTC</b></p> <p><i>L'évolution des technologies en électronique permet de réaliser des convertisseurs de puissance à fréquence de découpage de plus en plus élevée. L'étude des champs émis par de telles structures devient une obligation pour le concepteur soucieux d'éviter la pollution électromagnétique de l'environnement.</i></p> <p><i>Cet ouvrage s'inscrit dans les activités de compatibilité électromagnétique du génie électrique. Il résulte de travaux de recherche théorique et appliquée conduits en laboratoire de tests en CEM lors de la mise au point de diverses cartes électroniques embarquées dans des convertisseurs à découpage. Son but est double : proposer au lecteur une approche simple concernant l'analyse des phénomènes électromagnétiques et les calculs associés, et le sensibiliser aux implications industrielles pouvant en découler. Les auteurs proposent une démarche scientifique qui s'appuie sur le concept original des "îlots rayonnants".</i></p> <p><i>A partir de l'étude spécifique sur le rayonnement magnétique des boucles de puissance, on obtient un outil d'évaluation et de représentation des champs et des tensions qu'ils produisent.</i></p> <p><i>Le CD-rom joint permet de visualiser en couleur et en plein écran les indispensables représentations dans l'espace des champs électromagnétiques, ainsi que de nombreuses variantes inédites.</i></p>



## C++

**John R. HUBBARD**, professeur de mathématiques et d'informatique à l'université de Richmond (Virginie); traduction : Virginie MARECHAL.  
Éditions Ediscience,  
collection MINI SCHAUM'S, 178 p, 12 € TTC

*Si vous n'avez pas le temps de vous plonger dans de volumineuses bibles de programmation ce livre est fait pour vous. Il vous aidera à maîtriser en peu de temps l'essentiel de C++, qu'il s'agisse des fonctions, des chaînes, des classes ou des modèles.*

### Sommaire :

Bases de la programmation en C++ ;  
Instructions conditionnelles et conversion de types ;  
Itération ; fonctions ; tableaux ; pointeurs et références ; chaînes ; classes ;  
Opérateurs de surcharge ; classe String ; composition et héritage ;  
Flux d'entrée / de sortie

### Public :

Étudiants des premiers cycles universitaires et techniques  
Élèves des classes préparatoires  
Professionnels en formation continue.



## LES OUTILS DE L'ÉTUDIANT SOUS LINUX

### StarOffice et OpenOffice

**Pierre-Alain GOUPILLE**, professeur d'informatique en STS Informatique de Gestion et en IUT à Angers  
Édition DUNOD, collection "Sciences Sup", 386 p, 27,50 € TTC.

*L'emploi des outils bureautiques et d'Internet est indispensable à tout étudiant, quelle que soit la filière choisie. Cet ouvrage a pour objectif de familiariser les utilisateurs avec les principaux outils bureautiques, ainsi qu'avec le courrier électronique et Internet. Ils pourront ainsi rédiger un mémoire, utiliser des tableaux de calculs et en tirer des graphiques démonstratifs, échanger avec des correspondants du monde entier, consulter Internet pour y chercher des informations et des données, et enfin présenter leurs travaux.*

*Les logiciels développés sont ceux proposés dans les deux sites bureautiques « jumelles » StarOffice et OpenOffice (gratuite et téléchargeable) – alternatives à la suite Microsoft Office. L'utilisateur habituel de la suite Microsoft Office ne sera pas dépaysé puisqu'il va retrouver, dans des environnements très proches de ceux auxquels il est habitué, un traitement de textes (Writer), un tableur (Calc), un gestionnaire de base de données (StarBase-Adabas ou MySQL), un outil de présentation (Impress), un navigateur Web (Netscape) ainsi que quelques outils et notions complémentaires sur Internet.*

*Tous ces composants peuvent être exploités en environnement Linux comme en environnement Windows.*

*Ce livre s'adresse à tous, étudiants de 1<sup>er</sup> et 2<sup>e</sup> cycles, élèves des écoles d'ingénieur, mais également au simple particulier désireux d'exploiter une suite bureautique performante, conviviale et économique.*



**MÉCANIQUE APPLIQUÉE**

Résistance des matériaux  
Mécanique des fluides  
Thermodynamique

2<sup>e</sup> édition

Pierre Agati  
Frédéric Lerouge  
Nicolas Mattera



**MÉCANIQUE APPLIQUÉE**

**Résistance des matériaux, Mécanique des fluides, Thermodynamique. Cours et exercices**

**Pierre AGATI, Frédéric LEROUGE, Nicolas MATTERA**  
Édition **DUNOD**, collection "Sciences Sup", 305 p, 25 € TTC

Ce cours présente les fondements de la résistance des matériaux, depuis la modélisation des liaisons et des actions mécaniques jusqu'à la détermination des contraintes et des déformations principalement pour des pièces de type « poutre » soumises à des sollicitations simples ou composées (extension, compression, cisaillement simple, torsion, flexion simple ou déviée, flambement). L'approche de la résolution par les logiciels de calcul de structure est abordée à l'aide de RDM6-Le Mans. L'étude de notions essentielles de mécanique des fluides et de thermodynamique permet l'approche de la circulation des fluides dans les machines et des problèmes d'échange, de rendement... Cet ouvrage de mécanique appliquée complète ainsi le cours de mécanique du solide paru dans la même collection.

Cet ouvrage, par ces nombreux exemples, applications et exercices corrigés, est conçu pour développer les capacités de raisonnement et de déduction des étudiants de l'enseignement technique supérieur (BTS, IUT, classes préparatoires, écoles d'ingénieurs). Il s'adresse également aux auditeurs de la formation continue.



**THÉORIE ET TRAITEMENT DU SIGNAL**

1. Représentation des signaux et des systèmes

Messaoud Benidir



**THÉORIE ET TRAITEMENT DU SIGNAL**

**1. représentation des signaux et des systèmes**

**Messaoud BENIDIR**, enseigne le traitement du signal à l'université Paris-Sud d'Orsay et à Supélec.  
Édition **DUNOD**, collection "Sciences Sup", 206 p, 29 € TTC

Parce que l'évolution des technologies de l'électronique est permanente et leur maîtrise délicate et exigeante, il est devenu indispensable aujourd'hui de posséder toutes les connaissances théoriques et pratiques du traitement du signal. A la pointe dans ce domaine, cet ouvrage très complet rassemble en deux volumes les résultats majeurs du traitement du signal, analyse leurs fondements mathématiques et expose leur mise en oeuvre.

Dans le premier volume l'auteur présente les modèles et outils mathématiques de représentation des signaux : représentations temporelles, fréquentielle, énergétique et symbolique d'un signal déterministe ; échantillonnage et modulation ; représentations d'un signal aléatoire ; représentations, réalisations et synthèses d'un filtre.

Le deuxième volume expose les méthodes de base en traitement du signal.

Cet ouvrage est destiné aux élèves en écoles d'ingénieurs, ainsi qu'aux étudiants en IUT, IUP et 2<sup>me</sup> cycle EEA. Un site Web associé propose des exercices corrigés supplémentaires et des compléments des solutions.

*Journées 2003 de la section Électrotechnique du Club EEA avec la participation des sections Électronique et Automatique*

**" Génie Électrique : réduction d'échelle et intégration "**

*12 et 13 mars 2003 Université de Picardie Jules Verne – AMIENS*

*Lire les informations en page III de couverture.*

# LA QUALITE DE L'ENERGIE ELECTRIQUE : problématique et mesures associées.

**Michel MEUNIER**

professeur à Supélec, 91 192 GIF SUR Yvette.

**Résumé :** La qualité de l'énergie électrique est la qualité de la tension délivrée à l'utilisateur : fréquence, valeur efficace, forme d'onde. Cependant la problématique, au demeurant très simple, est souvent mal connue. Les protocoles de mesure associés sont également peu connus. Ils ne font pas appel à des concepts très élaborés mais nécessitent d'être menés avec rigueur.

**Mots clés :**

*Pédagogie, Qualité de la tension, creux de tension, microcoupures, déséquilibre, harmoniques*

## Introduction

Un réseau d'énergie est une source de tension : tous les utilisateurs sont connectés en parallèle et sont soumis à la tension du réseau. La qualité de la fourniture d'énergie électrique est donc strictement liée à la qualité de la tension délivrée par le réseau. Par quels paramètres peut-on caractériser la qualité de cette tension ?

Une autre façon d'aborder le problème est de se demander quels sont les problèmes auxquels peuvent être soumis les utilisateurs, problèmes qu'ils vont ressentir comme étant un manque de "qualité".

La liste n'est pas très longue.

Le premier paramètre est la présence de la tension ; la panne est évidemment vécue comme un manque de qualité mais l'usage veut que ce paramètre ne soit pas traité habituellement comme un problème de qualité. Nous ne l'aborderons donc pas.

La valeur de la fréquence est un faux problème sur un réseau comme le réseau ouest-européen ; la fréquence y est d'une stabilité diabolique. Par contre sur une île, ou sur un réseau de bord, c'est un paramètre important.

La valeur de la tension est un souci constant des utilisateurs, dans un réseau public comme sur un réseau de bord.

Le système triphasé de tension peut être déséquilibré. C'est évidemment sans conséquence pour un utilisateur domestique alimenté par une tension monophasée. C'est un souci pour un industriel, abonné triphasé et qui a, par exemple, un parc de moteurs asynchrones.

Les creux de tension sont des phénomènes peu dommageables pour les utilisateurs domestiques, mais ils posent de grands problèmes aux industriels. Le flicker est constitué de petits creux de tension, minuscules en amplitude, mais qui surviennent de façon répétitive et avec une fréquence voisine de dix hertz.

Les microcoupures gênent tout le monde (il est bien énervant de devoir remettre son réveil à l'heure alors qu'il n'y a même pas eu de "panne"), et les industriels ont des processus gravement perturbés par ces coupures.

Enfin, la forme d'onde de la tension doit être surveillée. Une présence d'harmoniques peut avoir des conséquences fâcheuses sur un certain nombre de matériels comme des bancs de capacités et il y a un risque important de résonances pouvant conduire à des dégradations de matériels.

Pour chacun de ces phénomènes existent des méthodologies de caractérisation, de mesure et des remèdes.

## Les mesures sur réseau

### Les capteurs

Comme souvent en électricité, les seules mesures effectuées sont des mesures de tension et de courant. Ce sont des mesures ordinaires mais elles sont effectuées sur un réseau capable de délivrer une énergie considérable. Il y a donc un risque. La tension est élevée : la tension minimale est 230 V. Chaque mesure doit être effectuée par l'intermédiaire d'un capteur et, dès qu'on dépasse le niveau de la basse tension (et même la plupart du temps en basse tension), le capteur assure un isolement galvanique.

### Les capteurs de courant :

Les capteurs de courant sont presque toujours des transformateurs de courant. Il y a deux types de transformateurs de courant : ceux qui sont utilisés pour fournir une information à un système de protection et ceux destinés à une mesure dans une situation normale du réseau. Dans le premier cas, la précision nécessaire n'est pas le paramètre principal, mais il ne faut pas qu'une surintensité (c'est une situation de fonctionnement des protections !) ne vienne saturer le circuit magnétique du transformateur de courant, même si cette surintensité a une composante aperiodique.

Dans le deuxième cas, le courant a une valeur entre zéro et la valeur maximale du courant normal ; il n'y a pas de composante aperiodique ; la précision demandée est généralement très grande, particulièrement quand la mesure est utilisée pour élaborer la puissance et compter l'énergie. S'il y a un défaut sur le réseau (court circuit ou autre), la

mesure ne sera pas juste et donc non pertinente pendant le temps de fonctionnement des protections.

Les transformateurs de courant sont potentiellement assez peu chers : ils comportent de la tôle magnétique, souvent enroulée pour faire un circuit magnétique torique et un enroulement de cuivre. Le coût de ces transformateurs augmente rapidement dès qu'on quitte la basse tension ; l'isolement nécessite des précautions de fabrication coûteuses. Il suffit de voir des transformateurs de courant dans un poste 400 kV : on ne voit que les isolateurs qui constituent la part majoritaire du coût.

Les transformateurs de courant permettent d'avoir une très bonne précision. L'erreur est due au courant magnétisant et la réalisation avec un circuit magnétique torique conduit très rapidement à une inductance de magnétisation de très forte valeur ; le courant magnétisant est très facilement négligeable devant le courant à mesurer. Ils ont aussi une bonne bande passante et permettent assez facilement d'avoir une information fiable sur les harmoniques de courant, tout au moins jusqu'à quelques kilohertz.

Les transformateurs de courant sont difficiles à placer. Ils sont disposés quand on construit les ouvrages. En ajouter nécessite d'ouvrir les circuits pour glisser le conducteur dans lequel on veut mesurer le courant à l'intérieur du circuit magnétique. Pour les systèmes à Haute Tension, des sorties isolées existent et il faut insérer le dispositif dans le tronçon où on souhaite faire la mesure. Bref insérer un transformateur de courant dans un circuit existant, surtout en Haute Tension, est une aventure coûteuse.

On peut réduire un peu ce coût en utilisant des capteurs de Rogowski. Ce sont des transformateurs de courant sans fer. Ils donnent la dérivée du courant qui est représentative en sinusoïdal à 50 Hz ou qu'une électronique sait traiter. L'absence de circuit magnétique en fer permet de les réaliser sur un support souple qui peut avoir une ouverture sans réduire les performances et on peut les glisser sans avoir à ouvrir les circuits dans lesquels on veut effectuer une mesure.

### Les capteurs de tension

Là encore on a toujours besoin d'une mesure avec un isolement galvanique. Le transformateur constitue évidemment la technologie la plus usuelle. Il est utilisé même en basse tension pour apporter un isolement entre le système de mesure et le réseau. Lui aussi, tout comme le transformateur de courant, ne comporte que des matériaux usuels : du fer et du cuivre. Le coût de ces transformateurs augmente très rapidement avec la valeur des tensions mesurées : c'est le coût de l'isolement.

Pour les réseaux à très haute tension, il est très usuel d'avoir un atténuateur capacitif qui précède le transformateur, selon le schéma de la figure 1.

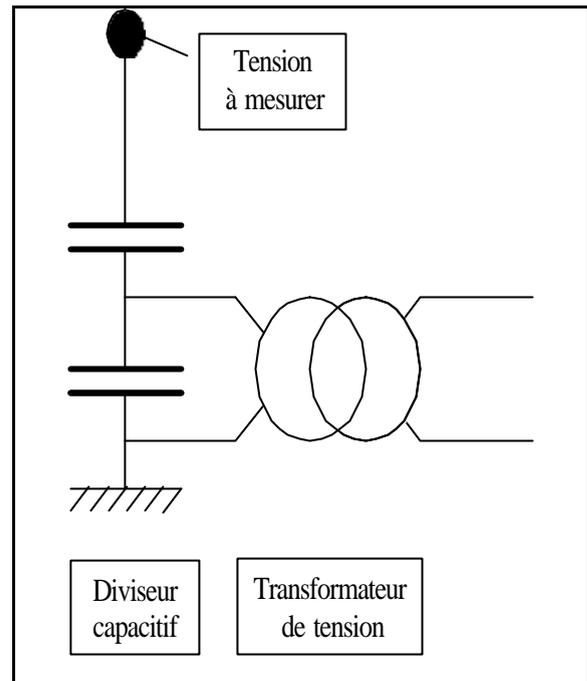


Figure 1 : Schéma de principe d'un transformateur de mesure de tension associé à un atténuateur capacitif

Un tel schéma (figure 1) est destiné à diminuer le coût de l'ensemble ; c'est surtout sur la réalisation du transformateur et de son isolement qu'on peut faire une économie.

La présence de capacités et d'inductances de magnétisation saturables avec la saturation du circuit magnétique fait toujours craindre une évolution vers une ferrorésonance dans ce type de matériels ; on peut supposer que de nombreuses études ont dû être menées sur ce point pour dimensionner sans risque un tel dispositif.

Le transformateur de tension a un comportement fréquentiel moins favorable qu'un transformateur de courant. Ceci est dû au fait qu'au primaire du transformateur, il y a une tension importante et que les capacités entre spires ne peuvent pas être complètement négligeables quand on monte en fréquence. Lorsque le transformateur est associé à un diviseur capacitif, on a un circuit LC complexe avec les inductances de magnétisation et de fuites du transformateur reliées au diviseur capacitif. Mais les valeurs des inductances et capacités sont bien connues ; elles sont données par le constructeur de l'appareil et on peut assez facilement prendre en compte des termes correctifs.

### Enregistrements et perturbographie

Sur un réseau d'énergie en exploitation, on n'est pas dans la même situation que dans un laboratoire. Le processus surveillé fonctionne, et il fonctionne 24 heures sur 24. Il n'est pas possible d'enregistrer tout, tout le temps. Le volume d'informations enregistrées serait ingérable et, surtout, les informations seraient, pour la plupart, sans aucun intérêt. Par exemple, pour surveiller la valeur de la

tension, il ne faut pas la relever à chaque période ; on construirait un fichier sans intérêt. On préfère donner une valeur moyennée sur 10 secondes, mémoriser les valeurs extrêmes, et déclencher une alarme sur certains seuils.

La même problématique se retrouve quand on surveille les harmoniques : les valeurs fluctuent tout le temps au gré des appareils pollueurs connectés et de leur point de fonctionnement. Seule une vision moyennée sur, le plus souvent, 10 secondes est pertinente.

Pour les événements comme les creux de tension ou les microcoupures (mais c'est la même problématique lorsqu'un court circuit survient) on est intéressé par ce qui s'est passé juste avant le phénomène puis par le phénomène lui-même. Les systèmes numériques apportent une telle fonctionnalité.

Il suffit d'une mémoire tournante. Dans cette mémoire, les grandeurs mesurées sont stockées en permanence, mais la capacité mémoire est réduite et chaque valeur mémorisée remplace une valeur plus ancienne. Par exemple, si cette mémoire stocke une seconde, chaque valeur stockée remplace la valeur enregistrée une seconde avant.

Lorsqu'un événement déclenche une alarme, les grandeurs observées sont enregistrées dans une autre mémoire et on a finalement gardé une seconde avant l'événement déclenchant, plus l'événement déclenchant et une durée donnée après cet événement. En effet les informations intéressantes sont souvent celles qui précèdent juste l'événement qui motive la mémorisation.

### Creux de tension, microcoupures et flicker

Ce sont des événements qui affectent peu le spectre de la tension observée.

#### Creux de tension

Un creux de tension est dû à un défaut, en général un court-circuit, qui se situe quelque part dans le réseau et qui affecte la tension dans une partie du réseau. Si le défaut a lieu dans un réseau maillé, l'élément en court-circuit, par exemple une ligne, est coupé à ses deux extrémités par les disjoncteurs, le transit de puissance correspondant est reporté sur les autres lignes. Le critère du "N-1" étant respecté, le réseau est dans une situation saine, la tension revient dans la fourchette normale.

La figure 2 montre un creux de tension de 80 ms.

Dans cette figure la tension valait 230 V environ. Elle est tombée à 100 V pendant quatre périodes, pour revenir au voisinage de la valeur normale. L'amplitude de la tension a été modifiée mais pas sa fréquence. L'information intéressante est la valeur efficace de la tension, mesurée période par période. On a dans ce cas un système de mesure conceptuellement très simple : un seuil de tension déclenche l'enregistrement.

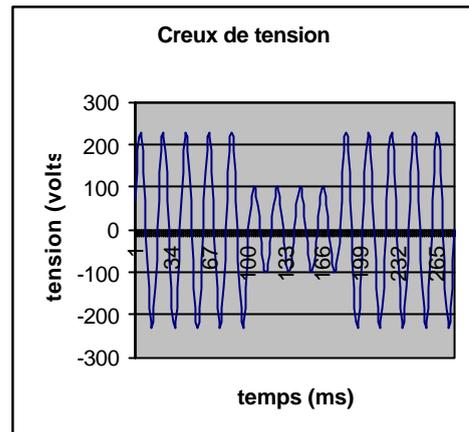


Figure 2 : creux de tension sur le réseau basse Tension

Grâce à la mémoire tournante, on peut mémoriser quelques périodes avant le déclenchement ; il y a souvent, dans les périodes précédentes, beaucoup d'information.

Le creux représenté figure 2 est très simple. Il dure le temps de fonctionnement d'une protection ; la valeur de la tension pendant le creux est restée stable ; c'est probablement un défaut sur un réseau arborescent où le défaut est éliminé par l'ouverture d'un seul disjoncteur.

Lorsque le défaut est survenu dans un réseau maillé, il faut deux ouvertures de disjoncteurs pour éliminer le défaut ; les deux ouvertures ne sont pas synchrones, on voit souvent l'ouverture du premier disjoncteur, pendant le creux ; l'ouverture du second met fin au creux de tension.

Les creux de tension peuvent avoir des formes assez complexes avec, par exemple, une chute de tension sur une phase et une augmentation sur les autres.

Au cours du creux de tension, les courants absorbés par une installation peuvent diminuer et la puissance tombe à des valeurs très basses. On peut au contraire avoir une augmentation du courant avec un système qui tend à maintenir la puissance constante. On est souvent dans ce cas avec des systèmes régulés qui maintiennent, jusqu'au bout de leurs possibilités, leur fonctionnement. On est aussi dans ce cas avec des moteurs asynchrones dont le glissement augmente quand la tension tombe et qui absorbent un courant beaucoup plus important.

#### Microcoupures

Là encore, le spectre reste localisé vers la fréquence fondamentale.

Cependant la problématique est sensiblement différente de celle des creux de tension. Il y a une coupure. La figure 3 illustre ce point.

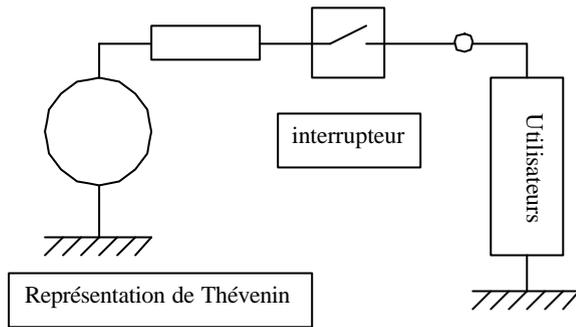


Figure 3 : La représentation de Thévenin du réseau vu par un utilisateur peut être complétée par un interrupteur.

Il suffit de compléter la représentation de Thévenin par un interrupteur. Un creux de tension est une "maladie" de la tension de Thévenin. La microcoupure, c'est l'ouverture de l'interrupteur pendant un temps estimé comme très bref (d'où le nom de microcoupure). La différence fondamentale entre les deux est que, dans un creux de tension, la tension vue par l'utilisateur est imposée par le dysfonctionnement du réseau. Dans une microcoupure, la tension vue par l'utilisateur ne dépend que de l'utilisateur, il y a déconnexion. Si l'essentiel des charges de l'utilisateur sont des résistances, la tension tombe à zéro ; c'est un cas très usuel ; par contre si la charge est constituée de machines asynchrones, la tension vue par l'utilisateur ne tombe à zéro que lorsque les courants rotoriques des machines sont éteints. La reconnexion, à la fin de la microcoupure peut donner lieu à des transitoires dangereux.

### Le flicker

Le flicker, lui aussi, affecte peu le spectre et se mesure avec des appareils dont la bande passante reste autour de 50 Hz.

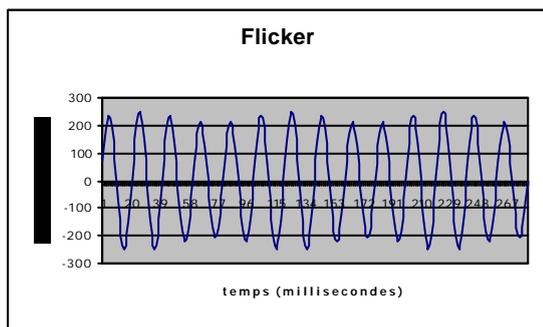


Figure 4 : exemple de flicker

La figure 4 montre une situation caricaturale. Le flicker a été très augmenté pour qu'on puisse voir aisément le phénomène. La fréquence de la tension reste à 50 Hz. Mais l'amplitude de la tension est modulée, ici à 10 Hz. Cette modulation de la tension est due à des charges rapidement fluctuantes. Ce phénomène est très gênant car il induit un papillotement des lumières qui est rapidement insupportable. Il suffit d'une variation

de l'amplitude de la tension inférieure à 1% pour que tout le monde se plaigne (dans l'exemple de la figure 4, la fluctuation est de 10%). La mesure de ce phénomène ne pose pas de problème particulier en terme de capteurs. Par contre, l'évaluation de la gêne est très délicate car elle correspond plus à un phénomène physiologique qu'à un phénomène électrique. Nous avons un trouble du traitement par le cerveau de l'information visuelle lorsque les fluctuations de luminosité sont dans une zone de fréquence un peu inférieure à 10 Hz.

L'observation du flicker ne se fait pas par des techniques de perturbographie. Il faut enregistrer en continu et il existe des critères forfaitaires normalisés pour évaluer la gêne.

### Le déséquilibre du réseau

Là encore, la mesure se fait à la fréquence fondamentale. Tout fonctionne à 50 Hz.

### La définition

Le déséquilibre du réseau est étudié à travers la transformation de Fortescue qui permet d'obtenir les composantes directe, inverse et homopolaire de la tension. Rappelons les formules usuellement utilisées :

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_0 \\ V_d \\ V_i \end{pmatrix}$$

Dans cette formule,  $a$  est la racine cubique de l'unité.  $V_1, V_2, V_3$  sont les tensions directement mesurées sur le réseau.  $V_0, V_d, V_i$  sont les composantes homopolaire, directe et inverse des tensions mesurées.

Cette formule est très utilisée en pratique et permet de bien comprendre et d'identifier les phénomènes de déséquilibre.

La formule inverse est :

$$\begin{pmatrix} V_0 \\ V_d \\ V_i \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{pmatrix}$$

### La mesure

On mesure très aisément la composante homopolaire, puisque c'est un tiers de la somme des trois tensions mesurées. Cette opération est encore plus simple sur les courants : la somme peut se faire avec un transformateur de courant ayant un secondaire et trois circuits primaires.

Il est beaucoup plus difficile d'obtenir les composantes directe et inverse puisqu'il faut effectuer une somme avec des nombres complexes. L'avènement des techniques numériques simplifie considérablement cette tâche. Avec un échantillonnage très raisonnable et sachant que le déphasage introduit par un nombre complexe

correspond simplement à un décalage dans les échantillons, l'application des formules de Fortescue se fait très simplement et avec des temps de calcul tout à fait négligeables.

La composante homopolaire correspond à un "déplacement du point neutre". J'ai mis cette expression entre guillemets car elle est très souvent utilisée, mais tout aussi souvent de façon très ésotérique. Pour la préciser il est nécessaire de définir exactement le point de référence du potentiel et ce qui est appelé le neutre. Confronté à un exemple pratique, ce n'est pas toujours simple.

Les composantes directe et inverse sont entièrement déterminées par le triangle des tensions. Mesurer les tensions entre phases permet de connaître ce triangle et de calculer sans ambiguïté les composantes directe et inverse.

### **Les problèmes associés**

Le réseau "normal", parfaitement équilibré, est un réseau purement direct. Il suffit de permuter deux phases pour passer à un système inverse. Cela est connu de tous et permet de changer le sens de rotation d'un moteur asynchrone triphasé. Il y a très peu de différence entre un système direct et un système inverse.

C'est la présence des deux composantes simultanément qui pose un problème. Si un système de tensions direct alimente un moteur triphasé, celui-ci tourne dans le sens direct.

Déséquilibrons un peu ce système de tension ; une composante inverse apparaît. Il y a alors dans le moteur une composante inverse au champ tournant. Comme le rotor tourne dans le sens direct exactement à la vitesse du champ direct pour un moteur synchrone, à une vitesse très voisine du champ direct pour un moteur asynchrone, le rotor voit le champ inverse tourner par rapport à lui à une vitesse proche (ou égale) à deux fois la vitesse de synchronisme. Cela induit des pertes au rotor.

C'est très important, en particulier pour les moteurs asynchrones dont le dimensionnement thermique dépend directement de la valeur de la composante inverse des tensions d'alimentation.

La composante homopolaire pose problème dans les situations de court-circuit sur le réseau. On trouve très souvent cette notion dans l'étude des systèmes de protection. Sachant que la composante homopolaire est arrêtée par les transformateurs grâce à un couplage étoile – triangle par exemple, elle a peu d'influence dans les problèmes de qualité.

### **Les harmoniques**

#### **La problématique**

Si la tension du réseau est distordue, on peut sortir des valeurs contractuelles et des dysfonctionnements apparaissent.

Heureusement beaucoup d'appareils supportent très bien une distorsion importante de la tension. Un

chauffage par résistance est d'une robustesse sans faille devant une telle perturbation. Mais une capacité voit le module de son impédance diminuer avec la fréquence et donc les harmoniques de courant y sont importants au point de créer des échauffements qui réduisent la durée de vie des condensateurs.

Enfin, la présence d'inductance et de capacités crée une impédance de Thévenin, quand on regarde le réseau vu d'un endroit, variant avec la fréquence et comportant des fréquences de résonance et d'antirésonance. Là où l'impédance est grande, la présence de courant conduit à des tensions importantes. Comme se sont des phénomènes de résonance, il se peut qu'on se trouve dans une situation peu amortie et la tension monte à des valeurs excessives, il y a alors des dégâts.

### **Les mécanismes**

Ce sont les courants harmoniques qui créent des tensions harmoniques. Le réseau n'a pas de raisons internes d'être distordu. Ce sont des appareils non linéaires qui absorbent un courant distordu. Les harmoniques de courant correspondant à ces appareils cheminent dans le réseau et créent des tensions harmoniques. La place manque ici (et ce n'est pas l'objectif de ce texte) pour expliquer en détail ces phénomènes. Mais il faut bien garder en mémoire que ce sont les appareils branchés sur le réseau qui induisent des distorsions de celui-ci. Ces appareils perturbateurs sont nombreux; le plus nocif est le téléviseur. Un téléviseur ne fait pas grand-chose, mais il y en a un nombre considérable; de plus tout le monde regarde la télévision au même moment...

### **Les mesures**

Mesurer les tensions ou courants harmoniques ne pose pas de problème très particulier. Il faut un système numérique, sinon la décomposition en série de Fourier n'est pas pratiquement possible. Les techniques numériques qui permettent de mettre en œuvre une "FFT" (Fast Fourier Transform) sont très usuelles et décrites dans de nombreux ouvrages. La fréquence d'échantillonnage fixe la valeur maximale de la fréquence prise en compte, à travers le théorème de Shannon. Tout ceci est bien connu.

Ce qui est plus spécifique aux réseaux d'énergie, c'est la fluctuation des harmoniques. Comme ils sont dus aux appareils branchés, s'il y a un nombre important d'utilisateurs connectés sur le réseau – et c'est usuellement le cas – les harmoniques varient au rythme de la connexion et de la déconnexion des appareils, en fonction des fluctuations de leur point de fonctionnement. Une approche statistique est nécessaire et les harmoniques mesurés voient leur amplitude moyennée sur 10 secondes ou sur des temps plus longs.

### Les remèdes

Il y a deux remèdes aux problèmes d'harmoniques. Le premier consiste à augmenter la puissance de court-circuit : un réseau infiniment puissant n'est pas perturbé par les charges connectées. Malheureusement, cette solution nécessite un investissement considérable et est donc pratiquement inutilisable en fait. Cependant cela conduit par exemple à alimenter des fours à arc de forte puissance directement à partir du réseau à Très Haute Tension.

Le deuxième remède est le filtrage. Malheureusement, filtrer sans empêcher la puissance de transiter normalement et d'alimenter correctement les appareils est beaucoup plus compliqué que de filtrer un signal à faible énergie. Autant le filtrage est usuel et souvent peu coûteux en télécommunications, autant il est difficile et correspond à un investissement élevé dans les réseaux d'énergie. La solution usuelle consiste à placer un circuit résonnant en parallèle sur le réseau afin de créer un point d'impédance nulle (à la fréquence de résonance du circuit de filtrage). Pour le rang d'harmonique ainsi traité, la tension sera nulle.

Malheureusement, ceci se fait avec un circuit LC et, combiné avec les inductances et capacités déjà présentes dans le réseau, on obtient un ensemble compliqué de résonance et d'antirésonances. C'est d'autant plus difficile à maîtriser que les valeurs des éléments du réseau sont susceptibles de se modifier quand on fait des travaux d'extension du réseau par exemple, ou bien quand, à la suite d'un défaut, on est amené à passer sur un schéma de secours.

Le filtrage actif est beaucoup plus confortable. Il permet de "gommer" toutes les résonances et antirésonances et de régler, de façon très élégante et efficace, tous les problèmes. Le revers de la médaille est le coût d'investissement d'un tel système. C'est extrêmement dissuasif...

### Conclusion

Ce texte a pour ambition de décrire les problèmes de qualité de la tension et les particularités de la métrologie correspondante.

Pour un enseignant, une difficulté des problèmes de qualité de l'énergie est la simplicité des concepts mis en œuvre. La métrologie correspondante est à la même mesure. On a ainsi l'impression de ne dire que des banalités.

Pourtant, lorsqu'on a contact avec les situations industrielles, on s'aperçoit que ces concepts très simples sont souvent méconnus. Soit les enseignants se sont intéressés à des problèmes plus nobles ou plus scientifiques et ils ont omis, dans leur enseignement, ces notions très simples, soit, ce qui est plus probable, ils y ont passé un temps minimal, cela n'a pas intéressé les élèves, et le rendement de l'enseignement correspondant a été voisin de zéro.

Pourtant on retrouve là tous les paramètres d'un problème de mesure intéressant. Tout ceci est facile à mettre en œuvre. Surveiller la qualité du réseau est à la portée de tous les laboratoires, dans tous les établissements d'enseignement. Trouver un transformateur de courant et un transformateur de tension ne Basse Tension, ce n'est pas un problème. Observer la tension avec un oscilloscope, c'est très simple.

Installer un ordinateur avec une carte d'acquisition cela existe un peu partout. Ecrire alors un programme qui permette de surveiller l'amplitude de la tension, c'est facile (encore que les Dieux de l'informatique réservent souvent quelques surprises désagréables) et on verra l'évolution des charges connectées localement, on peut illustrer la notion d'heure de pointe, etc....

On peut faire un perturbographe très simplement, avec un P.C. et une carte d'acquisition. Et on observera des creux de tension car la probabilité d'occurrence est grande.

On peut aussi essayer de mesurer la composante inverse du système triphasé. Là, les élèves buttent sur beaucoup de notions : qu'est ce que cela représente, pourquoi on la mesure, pourquoi est ce qu'il suffit de connaître les tensions entre phases ?

De même les cours sur la série de Fourier peuvent être illustrés en mesurant la distorsion du réseau. La surprise est grande chez les élèves de voir que la tension qu'on a dite sinusoïdale dans tous les cours est, en fait, confortablement distordue.

Bref, il ne faut pas chercher très loin des exemples d'application de notions qui sont simples et permettent d'illustrer des concepts que les élèves parviennent aisément à comprendre et à assimiler.

Espérons que ce petit texte, trop rapide, incomplet, mais qui veut rester simple aura donné quelques idées d'illustrations et mis en lumière le fait que de disposer d'un réseau d'énergie fiable, d'utilisation aisée, n'est pas une affaire aussi simple qu'on le croit et qu'il se passe dans le réseau beaucoup de choses.

# LE FLICKER SUR LES RESEAUX D'ENERGIE ELECTRIQUE

**Patrick BASTARD,**

professeur à Supélec

Service Électrotechnique et Électronique Industrielle  
91 190 Gif-sur-Yvette

patrick.bastard@supelec.fr

**Résumé** – *Le flicker est un phénomène qui est lié à des variations rapides de tension susceptibles de provoquer un papillotement de certains systèmes d'éclairage. Les causes possibles de flicker, mais aussi la façon dont il se propage sur les réseaux électriques, les principes de mesure et finalement les remèdes envisageables sont décrits dans ce papier afin d'aborder les principaux aspects de ce phénomène qui fait partie des critères d'évaluation de la « qualité de l'énergie électrique ».*

**Mots clés :**

*Flicker – Qualité de l'énergie électrique – Fluctuations de tension – Papillotement – Éclairage*

## Introduction

Produite, transportée, distribuée et finalement vendue à des utilisateurs domestiques ou industriels, l'énergie électrique est attachée à une réelle notion de « qualité », comme le sont naturellement tous les produits manufacturés. Pour appréhender cette notion de qualité dans le cas du très immatériel « produit » électricité, il ne faut pas oublier que concrètement, c'est sous la forme d'une tension que celui-ci est disponible chez les consommateurs. Exception faite des rares réseaux à courant continu associés à des applications bien particulières telles que certains réseaux de traction ferroviaire, cette tension est idéalement sinusoïdale, associée à une valeur efficace et une fréquence nominales. Elle peut encore être monophasée ou triphasée selon le niveau de puissance contractuel de l'installation alimentée.

Dès lors, tout écart entre la forme de tension réellement disponible et la forme idéale pourra être considéré comme une dégradation de la qualité du produit « électricité ». Cette dégradation peut prendre plusieurs aspects. Elle peut porter sur la fréquence, sur la valeur efficace, sur le contenu harmonique ou même sur la disparition plus ou moins prolongée de la tension. Certains appareils électriques peuvent alors être sensibles à certaines perturbations et ne plus fonctionner correctement. Les mécanismes qui conduisent à une déformation de la tension, par rapport à la sinusoïde nominale, font intervenir à la fois les installations de production, les réseaux de transport et de distribution et les charges. La qualité est donc l'affaire de tous ces différents acteurs ; les normes internationales et autres textes réglementaires contribuent ainsi souvent à définir les engagements et obligations de chacun afin que les écarts entre la sinusoïde idéale et les formes de tension réellement disponibles restent compatibles avec le bon

fonctionnement du système électrique dans son ensemble.

Parmi les perturbations permettant de caractériser le niveau de qualité de l'énergie électrique – ou, plus concrètement, de la tension électrique – certaines sont assez bien connues : le contenu harmonique, les coupures brèves ou longues, les creux de tension sont par exemple assez simples à définir et même à quantifier (donc, à mesurer).

Pouvant avoir des effets perceptibles sur certains systèmes d'éclairage, le « flicker » fait partie des phénomènes qui contribuent à dégrader le niveau de qualité de la tension. Bien que défini assez rigoureusement par les normes internationales (CEI), ce phénomène reste délicat à appréhender, et sa mesure est elle-même assez complexe. Sans rentrer dans des détails disponibles dans les normes en question, nous proposons ici de décrire qualitativement ce phénomène, d'en expliquer les principales causes possibles et de donner aussi quelques solutions classiques pour limiter ses effets.

## Description du phénomène

### **Tenue de tension dans un réseau électrique**

Pour des raisons à la fois économiques et techniques, un vaste réseau de transport et de distribution d'énergie électrique ne peut être exploité au même niveau de tension des centrales de production aux clients finals. Il est nécessaire de transporter en très haute tension et de distribuer en basse tension. Il est donc possible de découper l'ensemble du réseau électrique, selon les niveaux de tension, et par-là même selon la fonction des différents sous-réseaux. On distingue habituellement trois grands types de réseaux, reliés entre eux par des postes de transformation :

- le réseau de transport (400 kV et 225 kV en France) qui forme un vaste filet sur l'ensemble du territoire et dont le rôle est double : d'une part transporter de grandes quantités d'énergie des régions productrices (par exemple : la vallée du Rhône) vers les régions consommatrices (par exemple : la région parisienne ou la Bretagne), et d'autre part interconnecter entre elles les différentes régions du pays ;
- les réseaux de répartition (90 kV et 63 kV en France) qui assurent eux aussi un rôle de transport de l'énergie, mais sur une zone géographique plus restreinte ; ces réseaux sont eux-mêmes majoritairement alimentés par le réseau de transport ;
- les réseaux de distribution (20 kV à 400 V en France) qui assurent la liaison entre les réseaux de répartition et la plupart des clients finals, industriels ou domestiques.

En réalité, chacun de ces niveaux de tension (par exemple : 20 kV) constitue la valeur efficace nominale autour de laquelle une plage de variation est contractuellement acceptable, typiquement de  $\pm 5\%$  à  $10\%$ . En effet, aucun gestionnaire de réseau ne saurait garantir en chaque point de fourniture une tension rigoureusement égale à la tension nominale, dans la mesure où les charges elles-mêmes, en absorbant du courant, créent des chutes de tension en réseau.

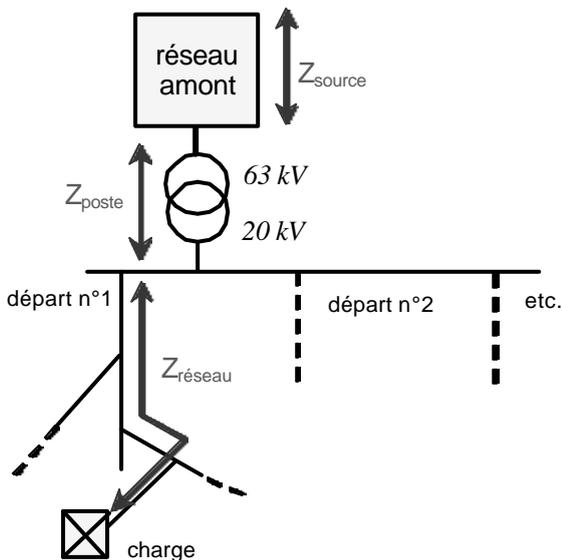


Figure 1 : Structure typique d'un réseau de distribution HTA (20 kV)

Par exemple, pour le réseau de distribution typique de la figure 1, où la charge peut représenter une installation industrielle directement raccordée en

20 kV ou un poste de transformation 20 kV/ 400 V alimentant un réseau basse tension, un schéma de Thévenin monophasé équivalent établi aux bornes de la charge permet de mettre en évidence la chute de tension due au transit de courant : voir figure 2.

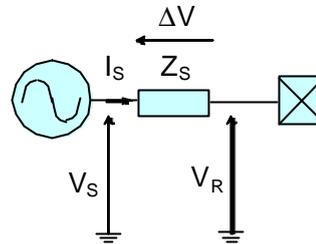


Figure 2 : schéma de Thévenin équivalent à l'ensemble du réseau alimentant une charge donnée

Sur la figure 2, il est clair que la tension aux bornes de la charge, en un point donné du réseau, dépend non seulement de la tension du générateur de Thévenin équivalent, mais aussi de la chute de tension en réseau, liée au courant absorbé par la charge et à l'impédance de Thévenin équivalente. Physiquement, la source de tension dans le Schéma de Thévenin dépend essentiellement de la tension imposée par les réseaux amont ou par les alternateurs eux-mêmes s'ils sont proches de la charge considérée. L'impédance équivalente dépend, elle, des impédances des éléments de réseau (essentiellement des lignes et des transformateurs) séparant la charge considérée des sources amont. Concrètement, cette impédance de Thévenin équivalente est généralement exprimée par l'intermédiaire de la puissance de court-circuit, par la relation suivante :

$$Z_s = \frac{U_n^2}{S_{cc}} \quad (1)$$

où  $U_n$  représente la tension efficace entre phases (en Volts) et  $S_{cc}$  la puissance de court-circuit (en VA).

Il faut noter que la puissance de court-circuit est plus facile à déterminer pour un réseau de distribution en antennes que pour un réseau de transport maillé. Par ailleurs, cette grandeur n'est pas constante et dépend de la configuration du réseau.

Cette première analyse qualitative permet de constater que la tension sera d'autant plus stable aux bornes d'une installation que la puissance de court-circuit du réseau d'alimentation sera élevée, donc l'impédance interne du schéma de Thévenin équivalent faible. Cette propriété est d'ailleurs générale : plus la puissance de court-circuit est grande, moins les perturbations dégradant la qualité de la tension électrique seront perceptibles.

Précisons cette première approche dans le cas particulier d'un régime sinusoïdal.

### Cas du régime sinusoïdal

Pour simplifier, supposons que toutes les grandeurs (tensions et courants) soient sinusoïdales, et que l'impédance de Thévenin puisse être représentée par un circuit RL série, ce qui constitue une approximation radicale, mais encore réaliste pour des transformateurs en régime linéaire et des lignes aériennes.

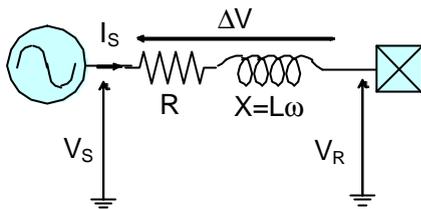


Figure 3 : La puissance de court-circuit du réseau est représentée par une impédance  $R+jL\omega$  en régime sinusoïdal à la fréquence  $f$  ( $\omega = 2\pi f$ )

Les grandeurs sinusoïdales  $V_S$ ,  $V_R$  et  $I_S$  peuvent être représentées par un diagramme vectoriel :

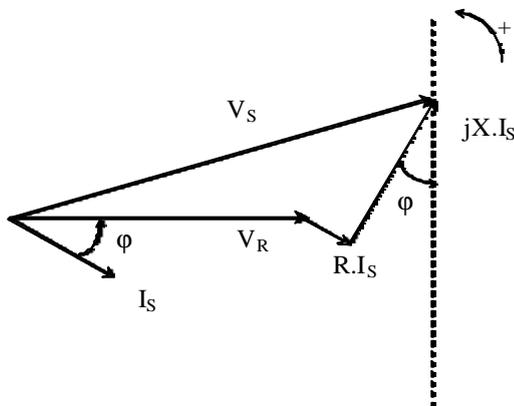


Figure 4 : Diagramme de Fresnel faisant apparaître la chute de tension sur le réseau (entre  $V_R$  et  $V_S$ )

Sur le schéma de la figure 4, la charge est supposée de nature inductive : elle absorbe de la puissance réactive, le courant est en retard sur la tension.

La chute de tension efficace  $\Delta V$  peut être calculée rigoureusement en déterminant la différence entre les longueurs des deux vecteurs  $V_S$  et  $V_R$ . Elle peut aussi être approchée par la différence entre la longueur de  $V_R$  et la projection du vecteur  $V_S$  sur la droite portée par  $V_R$ . Ce calcul approché conduit à la relation suivante :

$$\Delta V \approx RI \cos \mathbf{j} + XI \sin \mathbf{j} \quad (2)$$

ou encore :

$$\Delta V \approx \frac{RP + XQ}{V_R} \quad (3)$$

expression dans laquelle  $P$  représente la puissance active consommée par la charge et  $Q$  la puissance réactive consommée (si  $>0$ ) ou fournie (si  $<0$ ) par la charge. Rappelons que conventionnellement, une charge consomme de la puissance réactive si elle est inductive alors qu'elle en fournit si elle est capacitive.

La relation ci-dessus montre que la tension en chaque point d'un réseau d'énergie électrique dépend bien-sûr des flux de puissance active qui transitent sur ce réseau, mais aussi des flux de puissance réactive. C'est d'ailleurs en jouant sur ces flux de puissance réactive que les producteurs, les gestionnaires de réseau et, dans une certaine mesure, les consommateurs, peuvent maintenir un plan de tension dans une plage de quelques % autour de la tension nominale. Ainsi, pour relever la tension, il convient de fournir de la puissance réactive (donc de diminuer  $Q$  et par conséquent  $\Delta V$ ) ; classiquement, cette fourniture est réalisée en connectant des bancs de condensateurs ou en sollicitant des alternateurs. *A contrario*, connecter des bancs d'inductances permet de diminuer la tension ; c'est parfois nécessaire sur les réseaux de grand transport aux heures de faible charge. Le réglage de la tension sur un réseau électrique est donc bien l'affaire de tous les acteurs, puisque chacun d'entre eux (producteurs, gestionnaires de réseau et consommateurs) est susceptible de pouvoir produire ou consommer de la puissance réactive. Dans un environnement ouvert à la concurrence, tel qu'il se met en place en Europe depuis quelques années, la répartition des rôles et, finalement, la contribution de chacun à ce réglage ainsi que la façon de « valoriser » ce service rendu au système électrique global font l'objet d'études technico-économiques délicates.

### Le flicker

#### Description du phénomène

Nous venons de montrer que les variations de tension sur un réseau d'énergie électrique dépendaient des flux de puissances actives et réactives imposés par la structure du réseau lui-même, mais surtout par l'évolution de la charge au cours du temps. Maintenir la tension dans une fourchette étroite est possible, au fur et à mesure qu'évolue la charge, en jouant essentiellement sur des injections ou consommations de puissance réactive, chez les producteurs, sur le réseau lui-même ou chez les consommateurs. Notons que d'autres dispositifs existent également, tels que les régulateurs en charge des transformateurs. Nous ne les évoquerons pas ici.

De façon générale, l'évolution de la charge en fonction du temps est un phénomène qui dépend du parc de consommateurs considéré. Sur les réseaux de transport, le foisonnement des charges conduit à des courbes de charge globale, à l'échelle d'un pays, qui présentent des variations lentes (constantes de temps s'exprimant en minutes). A titre d'exemple, la figure 5 donne l'allure de la courbe de charge nationale telle que produite par RTE, le gestionnaire français du réseau de transport.

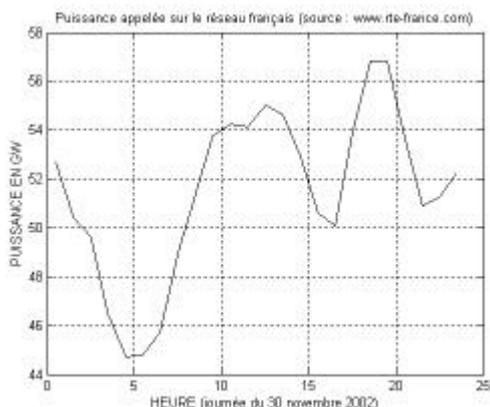


Figure 5 : exemple de courbe de charge sur le réseau français (journée du 30 novembre 2002 – source : RTE)

En revanche, localement, à l'échelle d'un réseau de répartition, et plus encore d'un départ 20 kV sur un réseau de distribution, la courbe de charge peut présenter des variations rapides beaucoup plus marquées, se superposant aux variations lentes, particulièrement si des charges industrielles sont raccordées. Pour certains types de charges, la puissance appelée peut varier de façon importante plusieurs fois par seconde.

Supposons par exemple qu'une charge absorbe une puissance active  $P$  selon le profil caricatural de la figure 6.

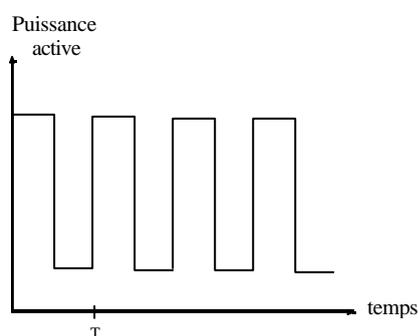


Figure 6 : exemple de puissance appelée présentant des à-coups répétitifs de période  $T$

L'application de la relation simplifiée (3) permet de conclure que la tension sur le réseau, dans le voisinage de la charge en question, aura la forme suivante :

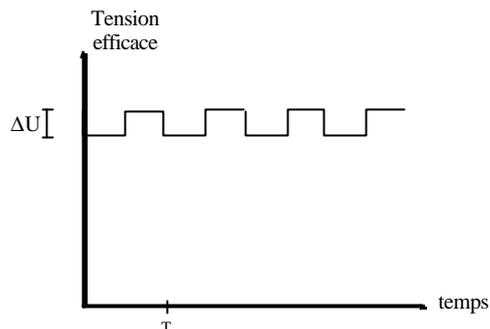


Figure 7 : exemple de tension (valeur efficace) résultant d'un appel de charge par à-coups périodiques

Bien sûr, cette approche n'est valable que si la période  $T$  des à-coups de puissance reste grande devant la période fondamentale de la tension (20 ms à 50 Hz). En effet, souvenons-nous que la relation (3) a été établie en régime permanent sinusoïdal.

Si la période des variations de tension dépend de celle des à-coups de charge, la profondeur des creux de tension  $\Delta U$  dépend, elle, de la puissance appelée, mais aussi de la proximité « électrique » du point de mesure et de l'impédance du réseau amont.

Bien sûr, si  $\Delta U$  fait sortir la tension de la fourchette contractuelle, le problème est « grave » et risque de perturber le fonctionnement de bon nombre de charges alimentées. En revanche, et c'est bien là la difficulté, il est tout à fait possible que l'amplitude des variations  $\Delta U$  soit minime, mais que leur périodicité  $T$  conduise à des effets néfastes sur certaines charges. En vérité, ce sont essentiellement les systèmes d'éclairage qui seront sensibles à ce type de fluctuation rapide de tension ; ils pourront créer un papillotement perceptible de la lumière susceptible d'entraîner une gêne visuelle, mais aussi des maux de tête.

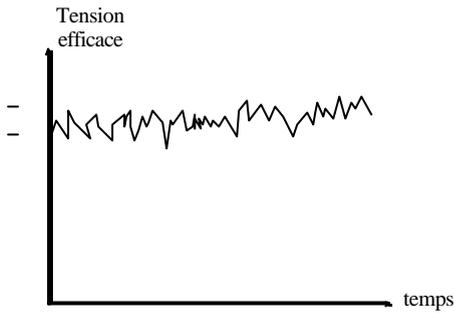
C'est ce type de perturbation, dont la fréquence est comprise typiquement entre 0,1 et 25 Hz, qui est habituellement baptisée par le terme anglais « flicker » (papillotement).

### Principales causes

Les principales sources de flicker résident dans les charges qui absorbent une puissance rapidement variable en fonction du temps.

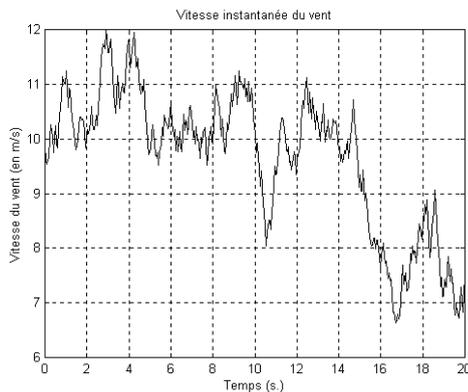
Sans prétendre être exhaustif, citons par exemple : les machines à souder point par point, les fours à arc, les laminoirs, les processus industriels accumulant les démarrages de moteurs, certaines grosses photocopieuses industrielles, etc.

Certaines de ces charges conduisent à des à-coups de tension très réguliers, tels que ceux représentés sur la figure 7 (machine à souder), d'autres à des à-coups irréguliers, d'autres enfin à des à-coups aléatoires, tels que représentés sur la figure 8 (fours à arc).



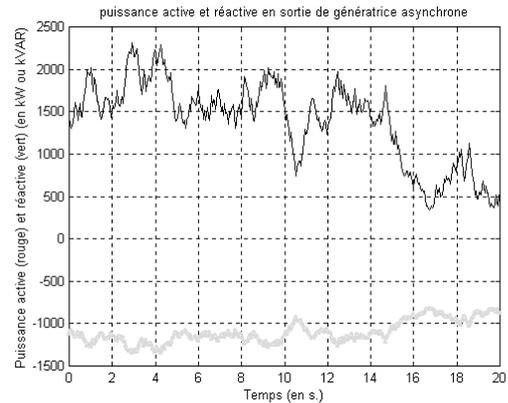
**Figure 8 :** exemple de tension (valeur efficace) résultant d'un appel de charge variable aléatoirement

Le flicker est souvent associé, à juste titre, à des charges de forte puissance ayant un comportement par à-coups tel que décrit ci-dessus. En fait, il faut aussi garder à l'esprit que des installations de production qui fourniraient une puissance présentant des fluctuations dans la gamme [0,1-25] Hz seraient également susceptibles de générer du flicker. Concrètement, ce type de fluctuation est essentiellement lié à des sites éoliens. En effet, les fluctuations de la vitesse du vent sont susceptibles de se répercuter sur la puissance injectée par l'installation sur le réseau.



**Figure 9 :** exemple de fluctuations de la vitesse du vent en fonction du temps (en abscisses : le temps en secondes, en ordonnées : la vitesse en m/s)

Le passage des fluctuations de la vitesse du vent aux fluctuations de puissance injectée n'est pas toujours simple : il dépend de la technologie de l'éolienne, des éventuelles interfaces électroniques si le couplage de la génératrice n'est pas direct, du mode de commande, etc. Par exemple, on peut récupérer, en sortie d'une éolienne qui serait soumise au profil de vent de la figure 9, les puissances actives (fournies) et réactives (consommées) ayant des allures telles que représentées sur la figure 10.



**Figure 10 :** exemple de fluctuations puissances en fonction du temps (en abscisses : le temps en secondes, en ordonnées : la puissance active  $P$  ( $>0$ ) en kW et la puissance réactive  $Q$  ( $<0$ ) en kVAR)

Si la puissance injectée présente des fluctuations dans la gamme de fréquence [0,1 ; 25] Hz, un phénomène de flicker est susceptible d'apparaître sur le réseau, exactement comme il ferait si une charge absorbait une puissance présentant de semblables variations.

### La mesure

Quantifier le flicker en un point du réseau n'est pas chose facile, tout d'abord parce que les effets du flicker sont avant tout qualitatifs : il s'agit d'une gêne visuelle qui peut être différemment perçue par plusieurs personnes.

De nombreux essais menés pendant plusieurs années ont conduit des instances internationales telles que l'UIE (Union Internationale pour l'Électrothermie) à définir des seuils de gêne physiologiques. Ces seuils sont nécessairement complexes à établir, puisqu'ils dépendent non seulement de l'amplitude des creux de tension ( $\Delta U/U$ ) mais aussi de leur gamme de fréquence et même de leur accumulation sur une période longue, puisqu'ils peuvent ne pas être réguliers. C'est l'ensemble de ces trois paramètres qui conduisent à une « irritabilité » de la personne soumise à ce papillotement de l'éclairage.

Finalement, la quantification « objective » du niveau de flicker à partir de mesures échantillonnées de la tension a fait l'objet de publications normatives (CEI 555 puis CEI 61000), qui définissent deux indicateurs normalisés : le Pst (« probability short time ») et le Plt (« probability long time »). Ces indicateurs sont calculés à partir d'une chaîne de traitement complexe qui fait intervenir une succession de filtres numériques permettant d'extraire les fluctuations de tension par démodulation, de prendre en compte la réponse d'une lampe à incandescence mais aussi de représenter de façon simplifiée la réponse typique du système visuel humain (œil-cerveau). Le Pst correspond à un indicateur statistique évalué sur 10 minutes alors que le Plt (moins utilisé) correspond à

une estimation statistique de la probabilité de gêne visuelle sur une durée de 2 heures.

Ces deux coefficients sont sans dimension. Si le Pst dépasse 1, le seuil d'irritabilité est dépassé. Cet indicateur a le mérite d'être rigoureusement défini. Rien ne garantit cependant qu'une personne « sensible » ne sera pas gênée avec un Pst de 0,8 alors qu'une autre plus « robuste » vivra sans problème dans une pièce éclairée avec des lampes alimentées par une tension présentant un Pst de 1,2. Les détails de la chaîne de calcul des indicateurs Pst et Plt sont donnés dans les publications CEI. Ils constituent la base de tous les appareils de mesure souvent appelés « flickermètres numériques » qui peuvent être proposés soit sous forme de logiciels, soit directement implémentés dans des perturbographe.

La figure 10 illustre la signification du Pst. Elle représente une courbe qui correspond à  $Pst=1$ , pour une modulation périodique et rectangulaire de la tension. En abscisses est portée la fréquence des changements de valeur efficace tandis qu'en ordonnées est portée la profondeur des variations de tension  $\Delta U/U$ . Les points situés au-dessous de la courbe correspondent à  $Pst < 1$  et ceux au-dessus de la courbe à  $Pst > 1$ . On peut constater qu'une même variation relative  $\Delta U/U$  peut provoquer une gêne visuelle ou pas, selon sa fréquence. La fréquence la plus défavorable correspond à environ 1000 changements par minute, c'est-à-dire environ 8 Hz. Cette fréquence est en quelque sorte la fréquence de résonance du système oeil-nerf optique-cerveau.

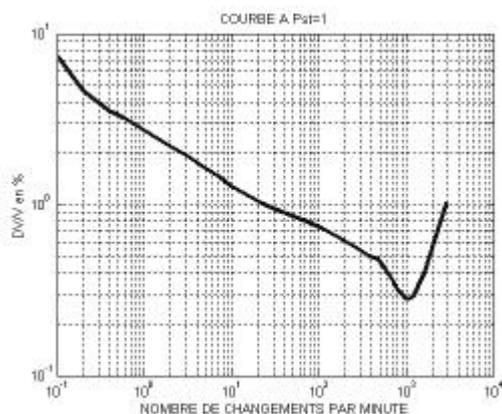


Figure 11 : courbe à Pst unitaire pour une modulation périodique et rectangulaire de la tension (lampe à incandescence à 230 V.)

Enfin, il faut aussi noter que la norme CEI définit pour le flickermètre des coefficients de filtrage différents selon la tension d'alimentation des lampes. La figure 10 n'est valable que pour des lampes à incandescence 230 volts.

### Les remèdes

Si une installation consomme une puissance présentant des fluctuations rapides (dans la gamme

0,1 à 25 Hz), elle est susceptible de générer du flicker sur l'ensemble du réseau auquel elle est connectée. L'amplitude des fluctuations de tension dépend des puissances active et réactive appelées et de la puissance de court-circuit du réseau amont. La façon dont se propagent ces fluctuations sur le réseau dépend des impédances des différentes branches, comme c'est aussi le cas pour la plupart des perturbations (creux de tension, harmoniques, ...).

La solution la plus efficace pour limiter le flicker généré par une installation « polluante » consiste donc à augmenter la puissance de court-circuit du réseau, vu du point de connexion de la charge. Bien sûr, si cette solution est efficace, elle reste souvent difficile à mettre en oeuvre. Il est fréquent qu'elle passe par un renforcement du réseau, donc par des investissements lourds.

Il est également envisageable, dans certains cas, de jouer sur le process industriel à l'origine du flicker. Deux pistes peuvent être étudiées : modification de la fréquence des à-coups et diminution de la puissance appelée à chaque à-coup.

Enfin, une gamme de solutions électroniques est également disponible aujourd'hui. Ces solutions associent généralement des condensateurs, des bobines et des composants d'électronique de puissance (thyristors, IGBT, ...) afin de pouvoir fournir ou consommer rapidement de la puissance réactive. En effet, si la chute de tension liée à une consommation de puissance active  $P$  et une consommation ou fourniture de puissance réactive  $Q$  peut être estimée par la relation (3), on peut s'appuyer sur cette même relation pour annuler (idéalement ...) la chute de tension créée par une installation générant du flicker. Ainsi, supposons que l'on connecte, en parallèle avec une telle installation, un compensateur statique de puissance réactive (CSPR) capable de fournir ( $Q_c < 0$ ) ou consommer ( $Q_c > 0$ ) une puissance réactive  $Q_c$ .

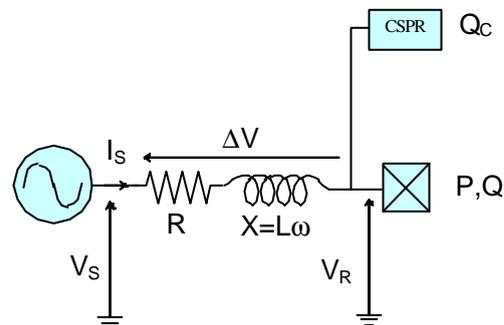


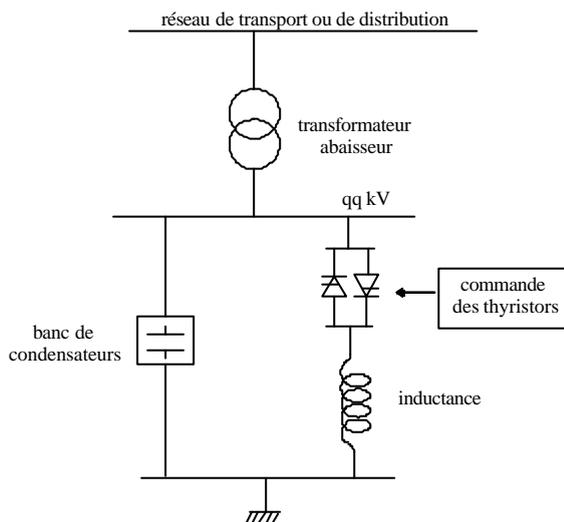
Figure 12 : Connexion d'un compensateur statique de puissance réactive en parallèle sur une charge générant du flicker

La chute de tension en réseau a désormais pour expression :

$$\Delta V \approx \frac{RP + X(Q + Q_c)}{V_R} \quad (4)$$

Idéalement, le compensateur doit adapter en temps réel sa production (voire consommation) de puissance réactive  $Q_c$  au gré des variations de puissance active  $P$  et éventuellement réactive  $Q$  consommées par la charge de telle sorte que  $\Delta V=0$ . Dans ce cas, la source de flicker est éliminée.

Bien sûr, la difficulté de cette stratégie est de pouvoir contrôler rapidement et de façon continue la puissance réactive  $Q_c$ . Des moyens traditionnels (bancs de condensateurs et bancs de bobines) ne permettent pas un tel réglage. En revanche, l'association de tels moyens et d'interrupteurs électroniques conduisent à des montages certes plus coûteux, mais efficaces. Ces dispositifs font partie de la famille des FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems). La figure 12 montre par exemple la structure de base d'un TCR - SVC (Thyristor Controlled Reactor - Static VAR Compensator).



**Figure 13 :** Schéma de principe d'un SVC (schéma monophasé étoile équivalent)

En jouant sur le temps de conduction des thyristors au sein d'une période fondamentale de signal, ce type de dispositif permet de piloter la puissance réactive injectée sur le réseau (ou consommée), et finalement d'asservir la tension efficace au point de connexion. Le temps de réponse d'un tel montage peut être de l'ordre de 50 ms, ce qui permet théoriquement de corriger des fluctuations rapides de tension.

Enfin, il ne serait pas raisonnable de faire une liste des principales solutions pour éviter les phénomènes de flicker sans mentionner la possibilité de modifier le système d'éclairage des installations perturbées. En effet, tous les types de lampes ne sont pas sensibles aux variations rapides

de la tension de la même façon, et si les perturbations sont concentrées sur peu de sites, de préférence tertiaires voire industriels, cette solution peut être économiquement intéressante.

### Conclusion

Le flicker est un phénomène qui est lié à des variations de la valeur efficace de la tension, dont l'amplitude peut être faible, mais dont la fréquence (entre 0,1 et 25 Hz) peut conduire à un papillotement de certains systèmes d'éclairage. C'est un phénomène qui est largement décrit dans les normes internationales et qui fait partie des perturbations à prendre en compte lorsqu'on évoque la « qualité de l'énergie électrique ». Les limites imposées aux installations raccordées en terme de variations rapides de tension susceptibles de générer du flicker sont explicitement décrites dans les contrats d'accès aux réseaux publics de transport ou de distribution. Plus généralement, les normes de compatibilité électromagnétique (CEM) fixent également des limites pour les appareils électriques raccordés aux réseaux basse tension.

Des applications pédagogiques peuvent être construites autour de ce phénomène. Elles peuvent être orientées dans diverses directions : applications industrielles de l'électricité pour décrire les origines du phénomène, fonctionnement des réseaux électriques eux-mêmes pour décrire la propagation du flicker, électronique de puissance pour étudier certaines solutions, traitement du signal pour appréhender les problèmes de mesure ou encore production éolienne pour étudier l'impact propre à ce type de technologie. La plupart de ces applications pédagogiques peuvent être menées par simulation numérique, et certaines d'entre elles peuvent même donner lieu à des études de laboratoire sur des montages basse tension avec des lampes à incandescence.

### Bibliographie

- [1] Référentiels Dunod – Maîtrise de la CEM – partie 3 , chapitre 3 , sous-chapitre 6 – Dunod, février 2001
- [2] CEI – Norme internationale CEI 61000-4-15 – Compatibilité électromagnétique (CEM), partie 4: techniques d'essais et de mesure, section 15: flickermètre – 1997
- [3] Martinon J. , Bastard P. , Brouaye F. – Assessment of voltage fluctuations and flicker generated by wind parks , Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Probabilistic Methods applied to Power Systems, PMAPS 2000 - Funchal - Portugal - 25-28 septembre 2000

# PUISSANCES : L'ACTIF ET LE REACTIF ET LA COMPLICATION DES HARMONIQUES

**Michel MEUNIER,**  
professeur à Supélec, 91 192 GIF SUR YVETTE

**Résumé :** Les puissances actives et réactives sont des notions employées en permanence. Cependant nos élèves les comprennent difficilement. La présence d'harmoniques met définitivement le trouble dans leur esprit. Ils utilisent alors leur méthode préférée : utiliser des formules toutes faites sans savoir exactement si elles correspondent à la réalité.

Cet article propose un chemin, le plus direct possible, pour aborder ces problèmes ; il essaie d'éviter les polémiques sur les définitions, notamment lorsqu'il y a des harmoniques.

Ce n'est pas le meilleur chemin, puisque celui-ci dépend du couple élève – professeur, mais je me plais à espérer qu'il est possible de puiser ici quelques idées pour créer ou améliorer une présentation du problème des puissances.

**Mots clés :** Pédagogie, puissance active, puissance réactive, harmoniques

## Introduction

Les systèmes sinusoidaux sont universellement utilisés. Toutes les notions utiles, pour un fonctionnement à fréquence constante, sont parfaitement connues. Cependant ces notions restent assez compliquées et leur enseignement paraît assez ardu aux élèves pour que ceux-ci ne les maîtrisent jamais de façon satisfaisante.

Nous aborderons ce problème de front, sans passer par une quelconque représentation, en posant les expressions analytiques. Cela ne conduit pas à des développements excessifs. Le problème de la présence d'harmoniques est lui aussi abordé de façon pragmatique, avec un minimum de complication.

## Le sinusoidal

### Définitions fondamentales

Tension et courant sinusoidaux permettent de modéliser de façon très efficace les systèmes de puissance usuels.

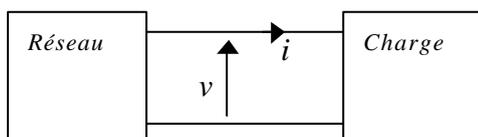


Figure 1

Les tension et courant peuvent s'écrire :

$$v = V \cdot 2 \cdot \cos(\omega t) \quad i = I \cdot 2 \cdot \cos(\omega t - j)$$

et être représentés vectoriellement



Figure 2

La puissance  $p$  absorbée par la charge (ou fournie par le réseau) est le produit de ces deux grandeurs :

$$p = v \cdot i = 2VI \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos(\omega t - j)$$

Cette expression peut être modifiée, en utilisant des formules de trigonométrie usuelles, de deux façons différentes :

$$p = VI \cdot \cos j + VI \cdot \cos(2\omega t - j)$$

Cette forme montre :

La puissance moyenne  $VI \cos j$

La puissance fluctuante  $VI \cdot \cos(2\omega t - j)$

$$p = 2VI \cdot \cos j \cdot \cos^2(\omega t) + 2VI \cdot \sin j \cdot \cos(\omega t) \cdot \sin(\omega t)$$

$$p = VI \cdot \cos j \cdot [1 + \cos(2\omega t)] + VI \cdot \sin j \cdot \sin(2\omega t)$$

On a l'habitude d'appeler :

La puissance active :  $P = VI \cdot \cos j$ .

La puissance réactive :  $Q = VI \cdot \sin j$ .

### 1<sup>er</sup> traitement : puissance fluctuante

Ce premier traitement a peu d'importance pratique pour les utilisateurs usuels de ces notions ; en effet la puissance fluctuante n'a pas de propriété mathématique particulièrement intéressante et ne s'utilise donc pas souvent. Cette présentation a cependant l'avantage d'être très importante pédagogiquement ; le dessin, sur une même figure, de la tension, du courant et de la puissance instantanée permet de visualiser la raison de la complexité des ces notions : la puissance n'a pas une valeur constante.

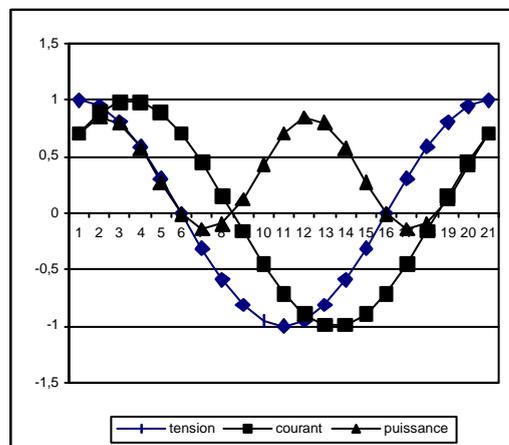


Figure 3 : tension, courant et puissance en régime sinusoidal.

Construire un petit programme qui permet de changer le déphasage entre la tension et le courant est important pédagogiquement. Celui correspondant à la figure 1 est fait sous Excel. Le déphasage affiché est  $\pi/4$ .

Les puissances moyenne et fluctuante apparaissent de façon évidente sur des dessins du genre de la figure 1. En faisant varier le déphasage entre V et I, on illustre très efficacement la variation de la puissance moyenne en fonction de l'angle de déphasage. On visualise aussi très simplement le fait que la puissance peut s'inverser et qu'il y a un échange permanent de puissance entre la source et la charge.

## 2<sup>ème</sup> traitement ; théorème de Boucherot

Je ne connais pas de façon simple de faire un dessin qui illustre les notions de puissances active et réactive. L'important est dans le théorème de Boucherot. Peu d'élèves se souviennent de ce théorème (même s'ils utilisent à peu près correctement les puissances active et réactive), aucun élève ne se souvient de sa démonstration. Beaucoup d'enseignants considèrent que c'est du temps perdu que de consacrer du temps à un discours qui ennuie fortement les élèves et qui a de ce fait un rendement nul (voire négatif). Je ne leur donne pas résolument tort ; j'ai personnellement, et douloureusement, expérimenté les discours ennuyeux, aussi bien en tant qu'élève qu'en temps qu'enseignant...

Le théorème de Boucherot démontre que les puissances active et réactive sont conservatives.

Si deux dipôles sont en série, il est facile de démontrer que les puissances active et réactive totales sont respectivement les sommes des puissances actives et réactives de chacun des dipôles. Pour deux dipôles en parallèles, la démonstration est aussi facile. On peut alors généraliser à tout circuit.

C'est cette propriété de conservativité des puissances active et réactive qui fait qu'elles sont si souvent et si efficacement utilisées.

Avec un terme en cosinus et un terme en sinus, les puissances active et réactive sont aisément corrélées avec les parties réelle et imaginaire de l'impédance, ou de l'admittance, complexe des dipôles. C'est d'autant plus pratique que les élèves maîtrisent bien la notion d'impédance complexe. En tout cas, ils utilisent bien les protocoles de calcul avec représentation complexe et, donc, impédances complexes.

## Autres définitions

### La puissance complexe

Avec la puissance active en cosinus et la puissance réactive en sinus, on est naturellement tenté de définir une puissance complexe avec comme partie réelle la puissance active et comme partie imaginaire la puissance réactive. Cette puissance complexe n'a pas de propriété conservative. Elle est égale au produit de la valeur complexe de la tension par le conjugué de la valeur complexe du courant. Facile à utiliser, et efficace à utiliser, elle ne l'est guère que par les

enseignants et quelques élèves. Quelques années après la sortie de l'Ecole, cette notion est en général oubliée au profit exclusif de la puissance apparente.

### La puissance apparente

Pour un dipôle, la puissance apparente est le produit des valeurs efficaces des tension et courant. L'amplitude de la puissance complexe est égale à la puissance apparente.

La puissance apparente n'est pas conservative.

Cette notion est constamment utilisée parce que :

- La définition est très simple.
- Elle est définie aussi bien pour des systèmes sinusoïdaux que pour des systèmes non sinusoïdaux.
- Elle est le majorant de la puissance moyenne qu'il est possible d'avoir dans un dipôle.
- Elle est corrélée avec le dimensionnement des systèmes et donc avec leur coût.

## Harmoniques

### Le problème

Il arrive que les systèmes soient déformés. Dans ce cas, malheureusement usuel, les notions de puissance active et de puissance réactive se compliquent. Ces problèmes d'harmoniques se trouvent dans deux situations, tout au moins en ce qui concerne les problèmes d'énergie ou de puissance :

- Dans les réseaux d'énergie
- Dans les onduleurs autonomes

### Réseaux d'énergie

Le réseau d'énergie parfait délivre une tension sinusoïdale à fréquence fixe. C'est l'utilisation d'appareils non linéaires qui crée des distorsions.

On a ainsi des courants fortement déformés, avec une composition spectrale riche et intense. Les tensions sont moins déformées parce que le réseau reste souvent de bonne qualité.

Une approximation souvent utilisée consiste à considérer que le réseau reste "bon" et à négliger la distorsion de la tension. Comme toute approximation, cela donne aux élèves une image peu rigoureuse et pas très bonne pédagogiquement...

La problématique de la distorsion des réseaux d'énergie est importante pour la formation professionnelle. Tous les utilisateurs d'un réseau d'énergie peuvent y être confrontés. Ignorer toute notion sur ce sujet mettra un jour votre ancien élève en difficulté...

### Onduleur autonome

Parce que, la plupart du temps, la source qui alimente un onduleur autonome est une source de tension et que les composants ne sont que des interrupteurs ouverts ou fermés, la tension a un taux de distorsion important. Les courants, filtrés par les enroulements d'une machine ou par les filtres de sortie de l'onduleur, le

sont moins. Les taux de distorsion sont beaucoup plus élevés que dans la problématique des réseaux d'énergie. Contrairement aux réseaux d'énergie, les distances de transport sont très courtes et les pertes associées sont donc faibles.

Les concepteurs de systèmes y parlent souvent de puissances active et réactive; les concepteurs d'onduleurs autonomes privilégient des études directes où l'on examine plutôt les pertes en conduction et les contraintes sur les composants lors des changements d'état.

### L'hypothèse de la tension pure

C'est théoriquement l'hypothèse d'une des deux grandeurs (tension ou courant) parfaitement sinusoidale. Comme cette approximation est le plus souvent utilisée dans les réseaux d'énergie, c'est la tension qui est considérée comme pure. On a donc :

$$V = V_1 \cdot 2 \cdot \cos \omega t$$

$$i = I_1 \cdot 2 \cdot \cos(\omega t - \mathbf{j}_1) + \dots + I_n \cdot 2 \cdot \cos(n\omega t - \mathbf{j}_n) + \dots$$

La puissance moyenne  $P$  est la valeur moyenne d'une série constituée de chacun des termes du courant multiplié par  $v$ .

Tous les termes de rang supérieur à 1 donnent zéro après intégration sur une période. Ceci montre que, si une des deux grandeurs (tension ou courant) est parfaitement sinusoidale, les harmoniques de l'autre grandeur ne participent pas du tout à la puissance moyenne mise en jeu.

Le premier terme donne :

$$P = V I_1 \cdot \cos \mathbf{j}_1$$

Seul le fondamental, doit être pris en compte pour obtenir la puissance moyenne.

Cependant, même avec la tension sinusoidale, si le courant est déformé, cela a une influence sur la puissance apparente.

La valeur efficace du courant est en effet :

$$i_{eff} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2 + \dots}$$

La valeur efficace d'une série de Fourier est une notion utile qui est souvent omise dans les cours de mathématiques sur le sujet. Cette valeur est toujours supérieure à la valeur efficace du fondamental.

On peut calculer le facteur de puissance qui est le rapport entre la puissance moyenne et la puissance apparente. On obtient :

$$K = \frac{I_1}{\sqrt{I_1^2 + \dots + I_n^2 + \dots}} \cos(\mathbf{j}_1)$$

On y voit le facteur de puissance défini en régime sinusoidal pur,  $\cos \phi_1$ , multiplié par un terme toujours plus petit que 1. Ainsi la présence des harmoniques dégrade toujours le facteur de puissance.

On ne peut pas de façon très simple définir une puissance réactive. Cependant, en négligeant tous les harmoniques, la puissance réactive associée au fondamental est celle définie en régime purement sinusoidal et possède toutes ses propriétés.

Cette approximation de la tension purement sinusoidale est très largement utilisée dans les réseaux d'énergie, avec beaucoup de succès.

### Tension et courant déformés

Dans ce cas :

$$v = V_1 \cdot 2 \cdot \cos \omega t + \dots + V_n \cdot 2 \cdot \cos(n\omega t - \mathbf{j}_{vn}) + \dots$$

$$i = I_1 \cdot 2 \cdot \cos(\omega t - \mathbf{j}_1) + \dots + I_n \cdot 2 \cdot \cos(n\omega t - \mathbf{j}_{in}) + \dots$$

Pour calculer la puissance moyenne, il faut intégrer sur une période la série

$$p = v \cdot i$$

Tous les termes croisés (les termes de rangs différents) donnent une intégrale nulle sur une période. Tous les termes de rangs identiques ont une valeur moyenne non nulle. On obtient une puissance moyenne :

$$P = \sum_1^{\infty} V_n I_n \cos(\mathbf{j}_{vn} - \mathbf{j}_{in})$$

Si on se place dans la situation usuelle du problème des harmoniques sur un réseau d'énergie, l'ordre de grandeur d'un harmonique de tension est 1% de la tension nominale; l'ordre de grandeur d'un harmonique de courant est inférieur à 10% du courant nominal.

Ainsi, le produit  $V_n \cdot I_n$  a pour ordre de grandeur 0,1% de la puissance nominale. Les puissances harmoniques, pour être mesurées, nécessitent un appareillage et des conditions expérimentales très soignées. En général, on ne peut pas les mesurer, ce qui conduit à faire l'hypothèse de la tension non déformée.

On peut définir une puissance réactive associée aux fondamentaux, en négligeant tous les harmoniques. Aucune autre puissance réactive ne peut être utilement définie.

### Dégradation du facteur de puissance

Quand on a des harmoniques, le facteur de puissance est toujours dégradé.

Avec l'hypothèse de la tension sinusoidale, on a trouvé un coefficient multiplicatif qui explique très bien cette dégradation. Ce coefficient est :

$$k_d = \frac{I_1}{\sqrt{I_1^2 + \dots + I_n^2 + \dots}}$$

C'est le facteur de déformation.

Lorsque tension et courant sont tous les deux déformés, il n'existe pas de formule analogue très simple.

Dans tous les cas, on peut utiliser une formule d'évaluation :

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$$

$S$  est la puissance apparente.

$P$  est la puissance active, c'est aussi la puissance moyenne.

$Q$  est la puissance réactive; c'est celle qu'on définit en prenant en compte uniquement les fondamentaux de la tension et du courant.

$D$  est un terme qui permet de représenter la dégradation du facteur de puissance due aux harmoniques.

Ce terme  $D$  n'a pas de propriété mathématique particulière. Simple à définir, comme à calculer, il permet de prendre en compte le plus simplement possible la présence d'harmoniques. Il ne faut pas lui en demander plus.

### Conclusion

La conclusion est l'occasion de porter un jugement sur ce qu'on vient d'écrire. J'ai donc relu le texte avant d'aborder cette conclusion.

Je trouve ce texte plutôt ardu, alors qu'on a toujours tendance à surestimer l'impédance de ses propres textes ; ce n'est pas encourageant !

Mais il a quelques qualités :

Aucune des notions utilisées n'est inconnue du lecteur (tout au moins dans l'auditoire visé !). La preuve en est que j'ai écrit sans avoir besoin d'ouvrir un livre ou de relire un article ; toutes les notions font partie de notre culture technique ordinaire.

S'il ne peut pas être utilisé tel quel pour faire un cours, il évite les circonvolutions que les professeurs utilisent pour faire entrer dans la tête des élèves ces notions pour lesquelles ces élèves sont bien peu motivés.

Il est absolument nécessaire de ne pas entrer dans des considérations sur les puissances réactives associées aux harmoniques. C'est peut être intéressant théoriquement ; cela n'a aucune application pratique.

Je ne dis pas comment il faut faire (en tous les cas, j'essaie de ne pas le faire !). Chacun connaît sa sensibilité et son auditoire. Les cours sur la puissance sont souvent associés aux représentations complexes et

les enseignants insistent beaucoup sur l'association entre les parties réelles et imaginaires de l'impédance et les puissances active et réactive. Je le fais très peu.

Je ne dispose pas de logiciel particulier à propos de la puissance réactive. Je n'ai pas de "truc". Mais je joue souvent au "jeu de la puissance réactive" : un billet de banque circule parmi les élèves. Pour l'avoir entre les mains, il faut donner une pièce au professeur. Puis le billet passe à un autre élève qui donne lui aussi une pièce. Le billet représente la puissance réactive ; l'argent est conservatif (même s'il est volatil) et pour démarrer le jeu, il faut un investissement. A chaque fois que cette "puissance réactive" circule, cela coûte. Une déontologie élémentaire oblige à arrêter rapidement le jeu et à rembourser chacun des élèves qui a donné pour avoir le billet un instant entre les mains...

On ne sait pas stocker l'énergie électrique. Il y a toujours équilibre entre ce qui est fourni et ce qui est consommé. Cet équilibre est double : actif et réactif. Cette nécessité physique est incontournable. L'enseignement de ces notions est difficile et donc souvent peu efficace ; mais nous utilisons, et nos élèves utilisent usuellement une procédure de calcul, basée sur le théorème de Boucherot, qui est plutôt mal comprise mais plutôt bien utilisée.

Mon objectif a été d'explicitier sans discours inutile ces notions. J'espère qu'il a été au moins partiellement atteint et que vous trouverez ici quelques idées de structure de cours sur le sujet qui ne bouleverseront pas vos habitudes, mais qui permettront de progresser vers une meilleure compréhension de ces notions dont il ne faut pas sous-estimer la difficulté.

# **MISE EN EVIDENCE PAR LA MESURE, DES RISQUES D'ERREUR INDUITS PAR LE RELAIS HOMOPOLAIRE, DANS LA DETECTION DES COURANTS DE DEFAUT**

**François EDDI et Jean-François DING**

Consultants techniques, Société EduWatt, 13 rue Georges AURIC 75 019 PARIS

Email : eduwatt@wanadoo.fr

*Les auteurs remercient Eric Labouré pour ses précieux commentaires.*

**Résumé :** le contenu de cet article reprend pour l'essentiel le rapport d'une expertise effectuée à la demande d'un client inquiet de la présence de courants de défaut sur son installation. Il met en évidence comment il a été possible de confirmer, à partir de mesures réalisées sur site, les hypothèses issues d'une étude théorique qui montre que la détection de courants de défaut par les méthodes usuelles peut se révéler erronée. En effet les courants de mode commun ne sont pas seulement des courants de défaut, mais ils sont pourtant signalés comme tels par les relais homopolaires

---

## **1 Introduction**

Notre société a pour vocation d'effectuer des expertises dans les différents domaines touchant à la qualité de l'énergie électrique sur les sites industriels et gros tertiaires. Notre expérience à ce jour nous conforte dans l'idée qu'il est, la plupart du temps, impossible de conclure sans la mise en oeuvre d'une instrumentation adaptée à la situation. A quelle occasion la prescription d'une campagne de mesures est-elle nécessaire? Selon notre expérience, deux possibilités se dégagent :

- ✓ Dans le cadre d'une expertise de type préventif, il s'agit de définir un état des lieux à une date donnée.
- ✓ Dans le cadre d'une expertise de type curatif, il faudra déterminer la cause d'un dysfonctionnement sur une installation.

L'intérêt, la méthodologie, l'instrumentation et sa mise en oeuvre ainsi que le diagnostic ne seront pas alors complètement de même nature.

Dans le premier cas, le souhait du client est principalement de faire vérifier que les modes de fonctionnement de tout ou partie de son installation et de ses constituants se situent à l'intérieur d'un gabarit prédéfini par les constructeurs, pour un certain nombre de grandeurs physiques caractéristiques. En conséquence, l'instrumentation à utiliser et sa mise en oeuvre sont directement déterminées par leur adéquation avec le cahier des charges de la mission. L'intérêt des mesures effectuées consiste alors à comparer les résultats obtenus à des spécifications connues. On peut illustrer cette situation par l'exemple simple suivant : suite à un ajout de charges sur une installation, les informations fournies par l'instrumentation de tableau dans un TGBT annoncent des courants voisins des valeurs nominales du transformateur HT/BT. L'exploitant devrait alors, à titre préventif, installer un analyseur de réseau en tête de son installation pour s'assurer que le niveau de distorsion harmonique en courants ne risque pas de placer son transformateur en situation d'échauffement et donc de vieillissement prématuré.

Dans le second cas, la nature du dysfonctionnement va orienter le choix de l'instrumentation et son temps de pose, et d'autre part les emplacements significatifs, en fonction de l'expérience acquise. Cette démarche est certainement plus difficile que la première et les résultats ne pourront être totalement garantis. Comme dans le premier cas, des schémas de distribution à jour seront une aide précieuse ; il est important de pouvoir visualiser les transferts énergétiques et leur nature pour effectuer un bon diagnostic. La connaissance des différents types de charges est également souhaitable. Par exemple, lors d'une expertise curative visant à la dépollution harmonique, elle permet de définir les emplacements les mieux adaptés pour la pose de l'instrumentation. C'est l'interprétation des données, notamment au regard de la norme EN 50160, qui fournira les prescriptions adaptées à la dépollution du site.

Le cas exposé, dans le rapport d'analyse qui suit, relève de cette seconde catégorie. Il traite d'une distribution dont le schéma de liaisons à la terre est en I.T, sur laquelle des défauts signalés par des relais homopolaires sont impossibles à localiser, alors que le contrôleur permanent d'isolement ne laisse pas suspecter leur présence. Les tores fournissant la mesure à ces relais homopolaires sont installés comme indiqué sur la figure 1 du rapport d'analyse. La mission qui nous a été confiée consistait à trancher quant à l'incompatibilité entre les informations fournies par les relais homopolaires et le CPI. Elle a été conduite selon le calendrier suivant :

- ✓ Visite sur site pour analyse des schémas de distributions et des équipements impliqués.
- ✓ Etude théorique du problème.

- ✓ Détermination des causes probables.
- ✓ Définition du protocole expérimental sur site pour confirmer ces causes : mesures simultanées des formes d'onde de courants supposés être de mode commun aux points D1 et D2 de la figure 1. Si les formes d'onde sont identiques, cela montrera bien que les courants homopolaires mesurés ne sont pas des courants de mode commun mais résultent simplement des dissymétries constitutives sur deux distributions présentant des couplages particuliers. De plus, si, lorsque l'on supprime les couplages incriminés, ces courants disparaissent, les conclusions s'imposeront d'elles-mêmes.
- ✓ Retour sur site, mise en oeuvre du protocole expérimental.
- ✓ Rédaction du rapport d'expertise.

Les mesures et les interventions effectuées sur l'installation (voir corps du rapport) ont constitué les preuves expérimentales de la validité du modèle théorique proposé pour justifier de l'absence de courants de défaut sur cette installation.

Cette étude induit également que, pour certaines installations existantes, des relais homopolaires, que l'on a parfois finalement supprimés, signalent des courants de défaut qui n'en sont pas. Par contre, là où on les a supprimés, plus rien ne signale le départ en défaut dans un réel cas de défaut. Ceci risque de considérablement ralentir la détection d'un premier défaut d'isolement dans un schéma de liaisons à la terre I.T. Paradoxalement, cette situation mettra en péril la continuité de service, considérée pourtant comme l'intérêt majeur de ce type de schéma.

Pour conclure, nous pensons qu'il est rassurant et légitime que ce soit la mise en oeuvre d'une instrumentation appropriée (quantification détaillée des grandeurs concernées) qui ait mis en défaut (!) un autre type d'instrumentation.

## 2 Rapport d'expertise

### 2.1 Instrumentation mise en oeuvre

Oscilloscope Tektronix : THS 720 P  
Pincés ampèremétriques :  
MERLIN-GÉRIN : XP 100 AC  
LEMFLEX 3000RR.

### 2.2 Objet de l'étude

Le but de cette étude est

- de déterminer les causes d'une signalisation de la présence de courants supposés de mode commun lors de la mise en oeuvre des différents couplages possibles en sortie des groupes onduleurs ADI1 et ADI2 aussi bien dans le local TGCA que dans les trois tableaux divisionnaires alimentés par la distribution ondulée.
- de déterminer le niveau réel de ces courants de mode commun afin de savoir s'ils représentent un risque de perte de la continuité de l'alimentation des charges en aval des groupes onduleurs.
- de proposer des solutions qui amélioreront la fiabilité de la distribution.

### 2.3 Présentation de l'étude et mesures effectuées

Le courant de mode commun est le courant circulant entre un conducteur actif et la terre. Cette circulation de courant a normalement comme origine un réel défaut d'isolement d'un équipement ou encore, il peut être dû à l'existence de couplages capacitifs parasites entre conducteurs actifs et la terre.

Dans le cas particulier de l'existence de multiples couplages, en amont et en aval de 2 sources distinctes (les 2 groupes onduleurs - Source 1, Source 2 - dans le cas qui nous concerne), tels que nous avons pu les constater lors de notre pré-visite, nous avons été conduits à effectuer une étude théorique. Cette étude montre que la somme des courants dans les conducteurs actifs alimentant des charges en aval de deux sources présentant plusieurs couplages peut atteindre des valeurs significatives sans qu'il n'existe pour autant de défaut d'isolement.

En conséquence l'étude théorique présentée ci-dessous, a deux objectifs :

- fournir une explication du phénomène ;
- et justifier des mesures à effectuer pour confirmer cette explication.

2.3.1 Étude théorique du phénomène

La situation rencontrée correspond au schéma de principe électrique proposé ci-dessous :

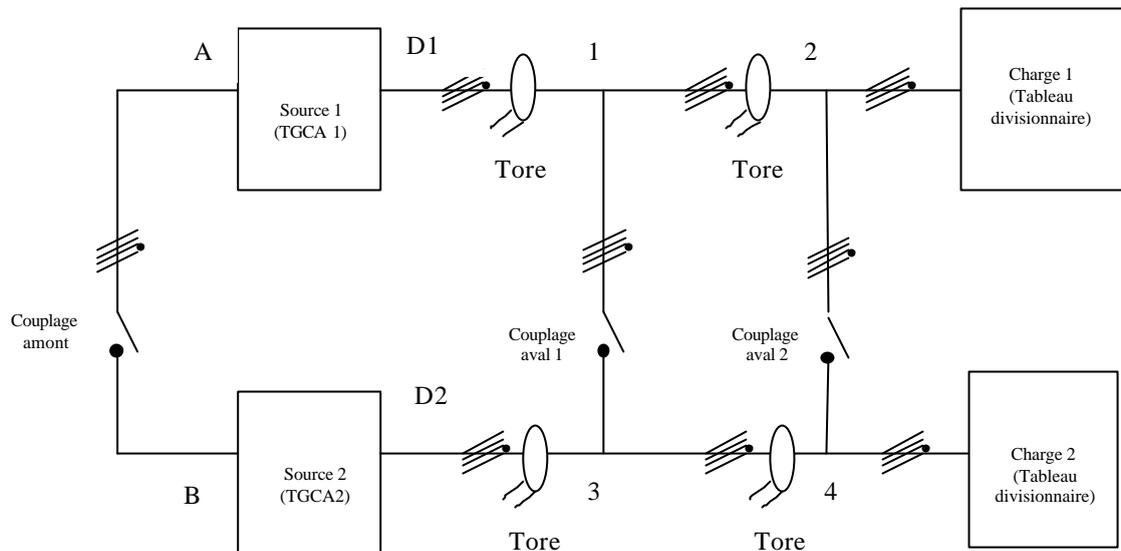


Figure 1 : schéma de principe de la distribution

Si l'on se place dans l'hypothèse de l'absence de défaut sur l'installation, la somme des courants (3 phases + neutre) vers les charges est nécessairement nulle.

Cette hypothèse impose comme conséquence les résultats suivants :

- La somme totale des courants entre les noeuds électriques en 1 et 2 et les noeuds électriques en 2 et 4 est nécessairement nulle.
- La somme totale des courants entre les noeuds électriques en 3 et 4 et les noeuds électriques en 2 et 4 est nécessairement nulle.

Dans le cadre de cette hypothèse, nous détaillons ci-dessous divers cas possibles.

- Cas 1 : couplage amont ouvert, couplage aval 1 fermé, couplage aval 2 ouvert  
la somme des courants
  - entre noeuds électriques en 1 et noeuds électriques en 2
  - entre noeuds électriques en 3 et noeuds électriques en 4
  - entre source 1 et noeuds électriques en 1
  - entre source 2 et noeuds électriques en 3

sera nulle et aucune signalisation n'aura lieu.

- Cas 2 : couplage amont ouvert, couplage aval 1 fermé, couplage aval 2 fermé  
si l'organe de couplage aval 2 est fermé, le raisonnement suivant, nécessitant de prendre en compte les impédances des sources ainsi que les impédances de tous les conducteurs figurant sur le schéma permet d'expliquer que la somme des courants entre les noeuds électriques en 1 et 2 d'une part et 3 et 4 d'autre part ne sera plus nulle, provoquant la signalisation d'un défaut sur l'installation.  
En effet, du fait que :
  - les sources 1 et 2 ne proposent pas rigoureusement les mêmes tensions et n'ont pas exactement les mêmes impédances de source
  - les impédances de lignes
    - entre la source 1 et les noeuds électriques en 1 d'une part, la source 2 et les noeuds électriques en 3 d'autre part,
    - entre les noeuds électriques en 1 d'une part et les noeuds électriques en 2 d'autre part,
    - entre les noeuds électriques en 3 d'une part et les noeuds électriques en 4 d'autre part,

ne sont pas rigoureusement identiques il résulte que, pour chacune des phases et le neutre, les potentiels respectivement aux noeuds électriques en 1 et 3 d'une part et 2 et 4 d'autre part ne sont pas identiques et les différences de ces potentiels sont dans la dépendance de la dissymétrie des diverses impédances.

En conséquence il n'y a aucune raison pour que la somme des courants circulant entre, d'une part, les noeuds électriques en 2 et 4 et, d'autre part, les noeuds électriques en 1 et 3, soit nulle.

Cette somme n'étant pas nulle, il en sera de même pour la somme des courants entre, d'une part, les noeuds électriques en 1 et 2 et, d'autre part, les noeuds électriques en 3 et 4, provoquant de ce fait la signalisation d'un défaut pourtant inexistant.

Par contre, la somme des courants

- entre source 1 et noeuds électriques en 1
- entre source 2 et noeuds électriques en 3

reste nulle et il n'y aura pas de signalisation de défaut à ce niveau de l'installation;

- Cas 3 : couplage amont fermé, couplage aval 1 fermé, couplage aval 2 ouvert  
Cette hypothèse impose comme conséquence les résultats suivants :
- La somme totale des courants entre source 1 et noeuds électriques en 1 et les noeuds électriques en 1 et 3 est nécessairement nulle.
- La somme totale des courants entre source 2 et noeuds électriques en 3 et les noeuds 1 et 3 est nécessairement nulle.

Si l'organe de couplage aval 1 est fermé, le raisonnement suivant, nécessitant de prendre en compte les impédances des sources ainsi que les impédances de tous les conducteurs figurant sur le schéma permet d'expliquer que la somme des courants entre source 1 et noeuds électriques en 1 d'une part et entre source 2 et noeuds électriques en 3 d'autre part ne sera plus nulle, provoquant la signalisation d'un défaut sur l'installation.

En effet, du fait que :

- les sources 1 et 2 ne proposent pas rigoureusement les mêmes tensions et n'ont pas exactement les mêmes impédances de source
- les impédances de lignes
  - entre la source 1 et les noeuds électriques en 1 d'une part, la source 2 et les noeuds électriques en 3 d'autre part,
  - entre les noeuds électriques en 1 d'une part et les noeuds électriques en 2 d'autre part,
  - entre les noeuds électriques en 3 d'une part et les noeuds électriques en 4 d'autre part,

ne sont pas rigoureusement identiques

il résulte que, pour chacune des phases et le neutre, les potentiels respectivement aux points A et B d'une part et aux noeuds électriques en 1 et 3 d'autre part ne sont pas identiques et les différences de ces potentiels sont dans la dépendance de la dissymétrie des diverses impédances.

En conséquence il n'y a aucune raison pour que la somme des courants circulant entre les noeuds électriques en 1 et 3 soit nulle.

Cette somme n'étant pas nulle, il en sera de même pour la somme des courants entre, d'une part, la source 1 et les noeuds électriques en 1 et, d'autre part, la source 2 et les noeuds électriques en 3, provoquant de ce fait la signalisation d'un défaut pourtant inexistant.

- Cas 4 : couplage amont fermé, couplage aval 1 ouvert, couplage aval 2 ouvert  
la somme des courants
  - entre noeuds électriques en 1 et noeuds électriques en 2
  - entre noeuds électriques en 3 et noeuds électriques en 4
  - entre source 1 et noeuds électriques en 1
  - entre source 2 et noeuds électriques en 3

sera nulle et aucune signalisation n'aura lieu.

Nous proposons ci-dessous les résultats obtenus par modélisation du problème pour les cas 1 et 2.

- Cas 1 : couplage amont ouvert, couplage aval 1 fermé, couplage aval 2 ouvert

Le chronogramme ci-dessous représente le courant (figure 2) vu par un tore qui entoure l'ensemble des conducteurs actifs (3 phases + neutre) entre noeuds électriques en 1 et noeuds électriques en 2 en ayant des valeurs très légèrement différentes pour les tensions de sources et les diverses impédances de lignes entre les différents noeuds

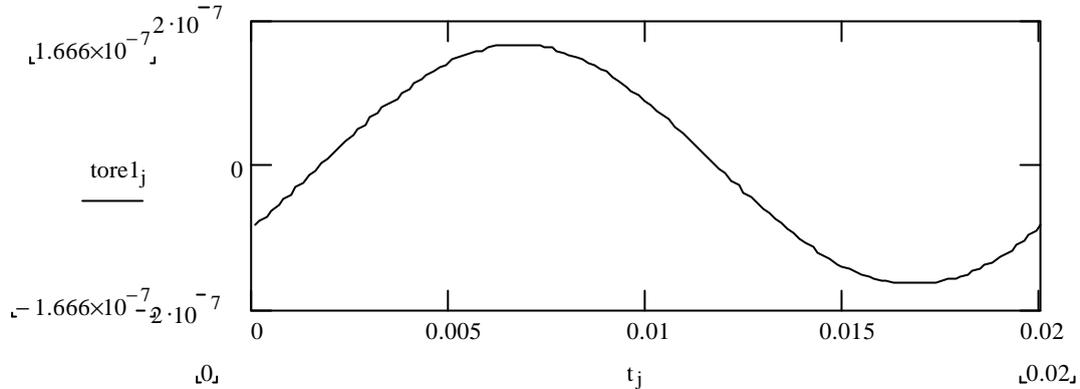


Figure 2 : le courant est de l'ordre de  $10^{-7}$ A, c'est à dire quasiment nul

- Cas 2 : couplage amont ouvert, couplage aval 1 fermé, couplage aval 2 fermé

Le chronogramme ci-dessous représente le courant (figure 3) vu par un tore qui entoure l'ensemble des conducteurs actifs (3 phases + neutre) entre noeuds électriques en 1 et noeuds électriques en 2 en ayant des valeurs très légèrement différentes pour les tensions de sources et les diverses impédances de lignes entre les différents noeuds (valeurs rigoureusement identiques au cas 1)

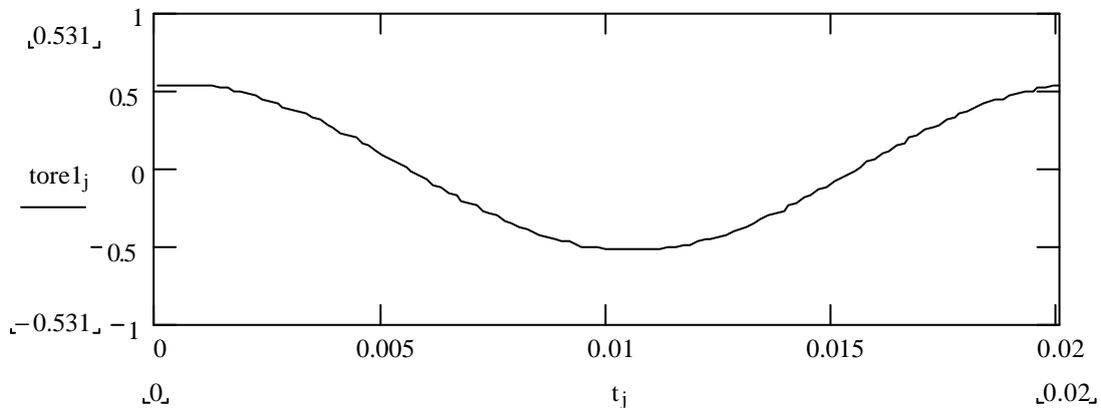


Figure 3 : Le courant atteint 500 mA et provoquerait bien la signalisation d'un défaut pourtant inexistant sur l'installation.

### 2.3.2 Mesures effectuées

Afin de vérifier que le phénomène sur l'installation en aval des groupes onduleurs est bien celui décrit ci-dessus, les formes d'ondes de courants de mode commun ont donc été relevées aux points suivants :

- Arrivée TGCA 1 simultanément avec TGCA 2 avec couplage en amont des sources fermé, couplage entre TGCA1 et TGCA2 fermé, couplage dans les tableaux divisionnaires ouverts
- Arrivée TGCA 1 avec couplage en amont des sources fermé et couplage TGCA1 et couplage entre TGCA 1 et TGCA 2 ouvert, couplage dans les tableaux divisionnaires ouverts
- Arrivée TGCA 2 avec couplage en amont des sources fermé et couplage TGCA1 et couplage entre TGCA 1 et TGCA 2 ouvert, couplage dans les tableaux divisionnaires ouverts

Les résultats sont présentés sous la forme suivante :

- ✓ Forme d'onde de courant
- ✓ Analyse spectrale de la forme d'onde de courant

2.4 Analyse et interprétation des mesures

2.4.1 Arrivée TGCA 1 simultanément avec TGCA 2 avec couplage en amont des sources fermé et couplage entre TGCA 1 et TGCA 2 fermé, couplage dans les tableaux divisionnaires ouverts (voir figures 4 et 5)

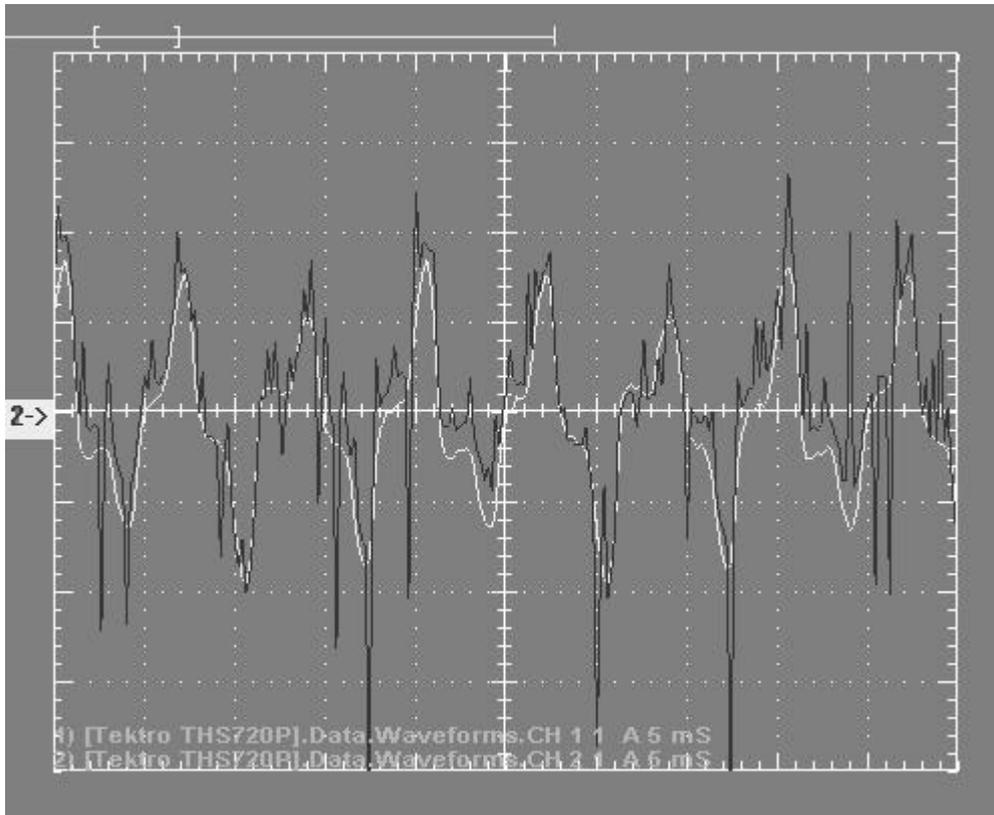


Figure 4 : forme d'onde des courants supposés de mode commun au niveau de D1 et de D2 avec couplage

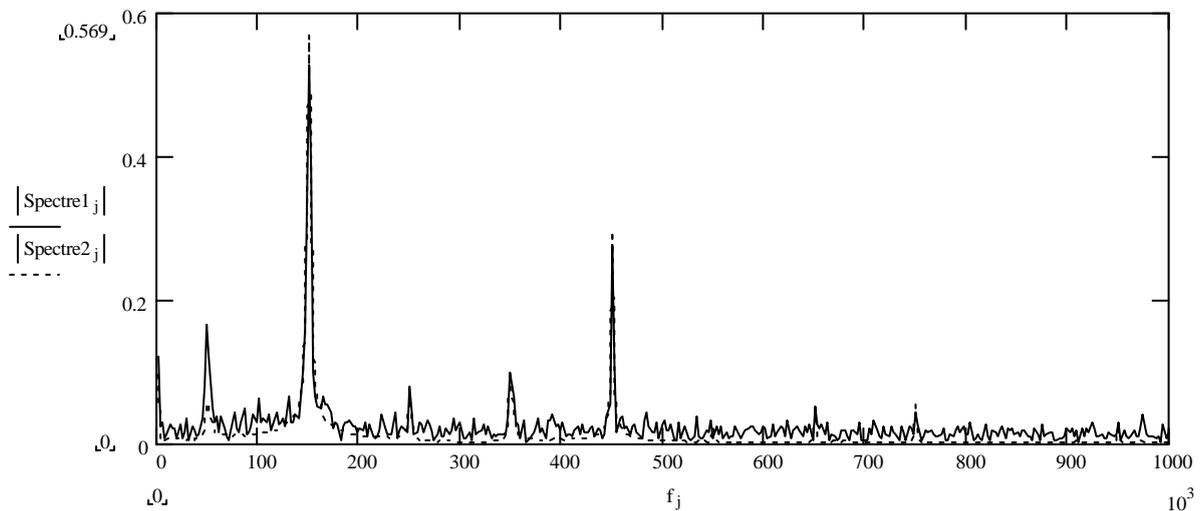


Figure 5 : analyses spectrales des ondes de courants supposés de mode commun au niveau de D1 et de D2 avec couplage

Comme prévu lors de l'étude théorique (cas 3), les chronogrammes montrent la présence de courants, supposés de mode commun, élevés et identiques sur les 2 arrivées TGCA 1 et TGCA 2 (figures 4 et 5) et les voyants annoncent l'existence de ces courants qui ne correspondent pourtant pas à des courants de fuites vers la terre.

2.4.2 Arrivées TGCA 1 et TGCA 2 avec couplage en amont des sources fermé et couplage TGCA1 et couplage entre TGCA 1 et TGCA 2 ouvert, couplage dans les tableaux divisionnaires ouverts (voir figures 6, 7, 8 et 9).

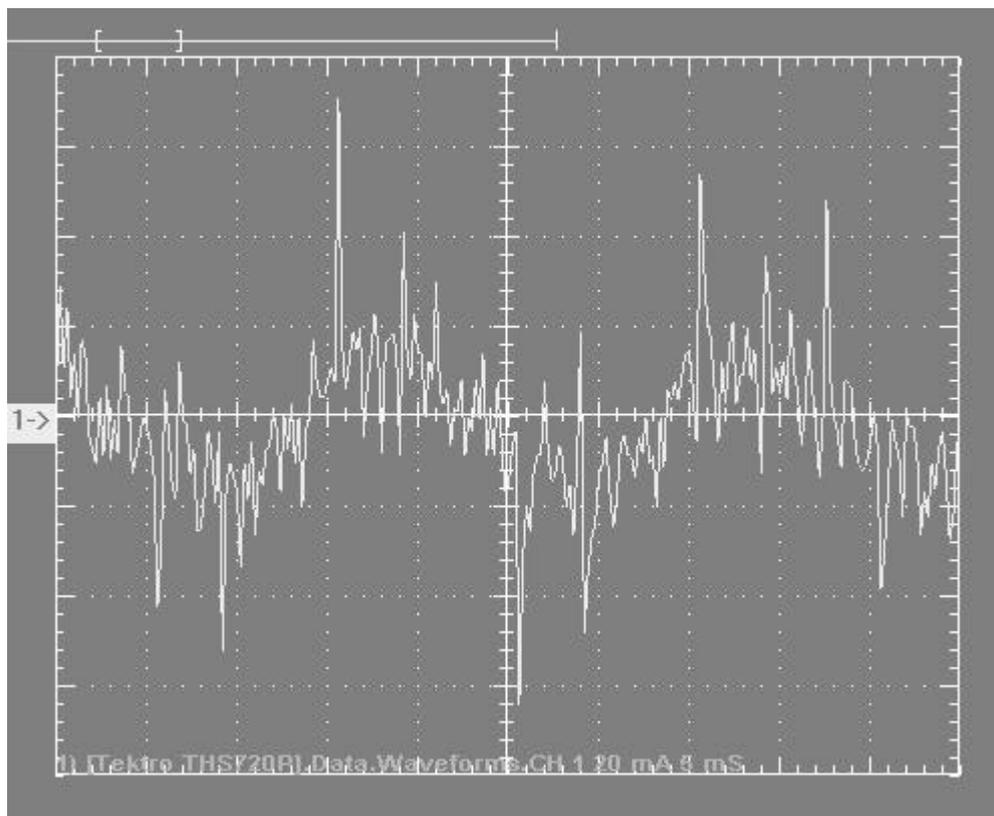


Figure 6 : forme d'onde du courant de mode commun au niveau de D1 hors couplage

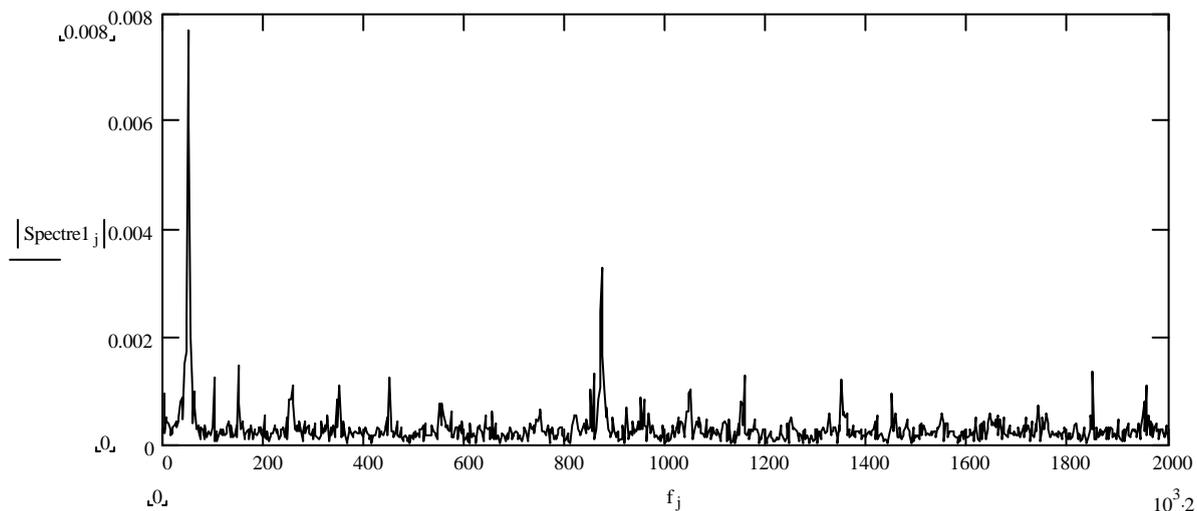


Figure7 : analyse spectrale de l'onde du courant de mode commun au niveau de D1 hors couplage

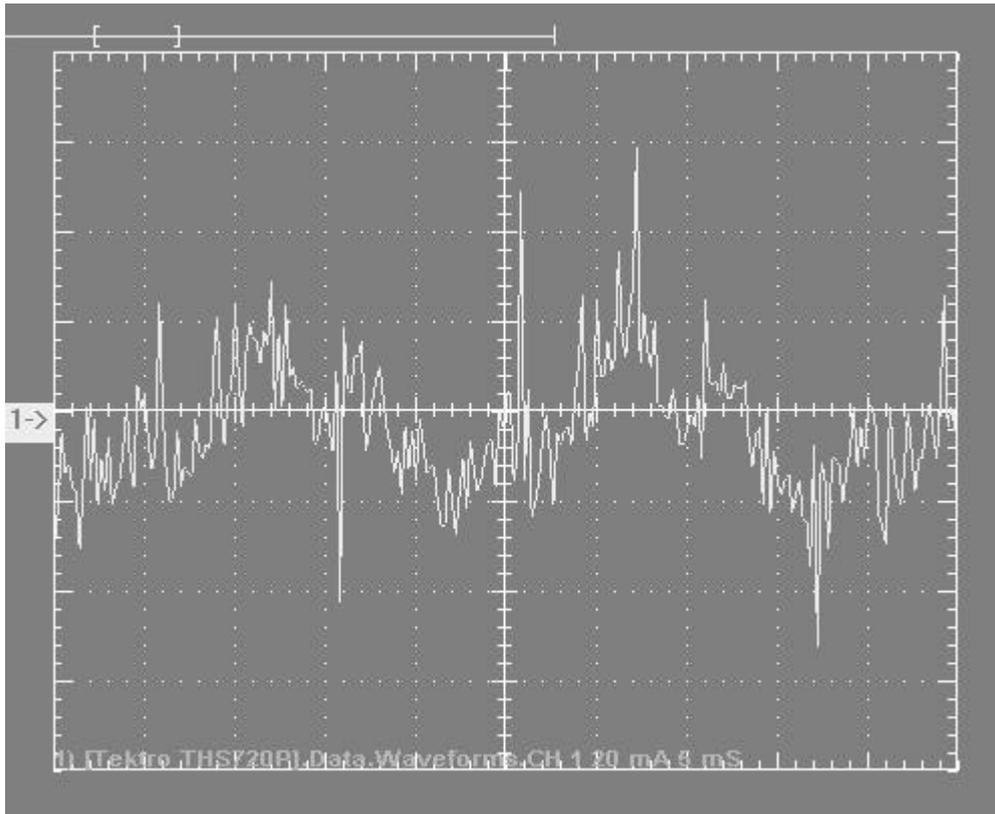


Figure 8 : forme d'onde du courant de mode commun au niveau de D2 hors couplage

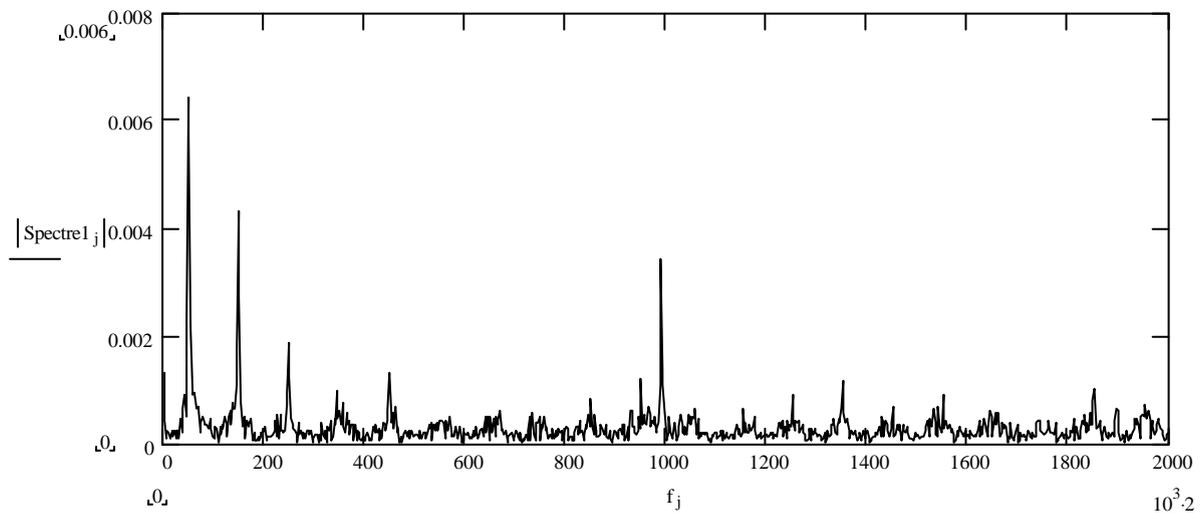


Figure 9 : analyse spectrale de l'onde du courant de mode commun au niveau de D2 hors couplage

Comme prévu lors de l'étude théorique (cas 4), les chronogrammes montrent des courants de mode commun à des valeurs négligeables aussi bien pour l'arrivée TGCA 1 (16 mA) que pour l'arrivée TGCA 2 (15 mA), ce qui confirme l'absence de tout défaut d'isolement en aval des groupes onduleurs (figures 6, 7, 8 et 9). Les valeurs mesurées correspondent aux courants de mode commun circulant au travers des capacités parasites de la distribution et des équipements en aval de TGCA 1 et TGCA 2.

Ainsi, lors de l'ouverture du couplage entre le TGCA 1 et le TGCA 2, les voyants de signalisation se sont bien éteints.

### *2.4.3 Observations complémentaires*

Afin de valider totalement les premiers résultats obtenus, nous avons procédé à la fermeture du couplage au niveau des tableaux divisionnaires, en conservant le couplage entre le TGCA 1 et le TGCA 2 (cas 2). Nous avons alors pu observer l'allumage des voyants, fournissant ainsi la confirmation définitive du fait que malgré l'absence de défaut d'isolement sur l'installation, la présence d'un double couplage (amont- aval ou aval-aval) entraîne que la somme des courants (3 phases + neutre) dans la maille limitée par les deux couplages est non nulle.

### 2.5 Conclusions et prescriptions

Suite à l'ensemble de l'étude réalisée à ce jour, il apparaît que :

- Les indications de présence de défaut d'isolement fournies par les relais homopolaires des TGCA 1 et TGCA 2 ou par ceux des armoires divisionnaires T.SdE CA, T. SR CA, T. SB CA ne sont pas exactes et qu'elles sont dues uniquement à l'existence des doubles couplages en amont et / ou en aval de la distribution ondulée.
- Le niveau d'isolement en aval de la distribution ondulée est satisfaisant et ne présente à ce jour pas de risque de perte de la continuité de l'alimentation des charges en aval des groupes onduleurs.

Nous recommandons, afin de replacer l'installation dans un niveau de fiabilité élevé, de supprimer les possibilités de couplage actuellement existantes et de procéder à la mise en place de systèmes de transfert statiques au niveau des armoires divisionnaires. Ceux-ci permettraient le transfert automatique de la charge vers l'onduleur restant disponible en cas de perte de l'autre.

# LA MÉTHODE D'OPPOSITION : UNE VIEILLE DAME RAJEUNIE PAR LES BESOINS DE CARACTÉRISATION ET D'ÉTUDE DES CONVERTISSEURS STATIQUES

**François FOREST, Jean-Jacques HUSELSTEIN**

LEM / Université Montpellier 2  
CC079, Place E. Bataillon,  
34095 Montpellier cedex 5  
Contact : forest@univ-montp2.fr

**Frédéric RICHARDEAU, Christophe TURPIN**

LEEI / ENSEEIHT - UMR du CNRS N°5828  
2 rue Camichel - 31071 Toulouse Cedex 7

## Résumé :

*La méthode d'opposition est connue depuis la nuit des temps de l'Electrotechnique, pour réaliser la caractérisation de systèmes de puissance classiques tels des machines électriques ou des transformateurs. Dans cet article, notre objectif sera de montrer comment ce concept peut être étendu avec bonheur aux convertisseurs statiques, en insistant sur ses conditions d'applications et sur les avantages indéniables qu'il présente sur le plan expérimental.*

## I. INTRODUCTION

La méthode d'opposition est une technique expérimentale probablement aussi vieille que les machines électriques. Son principe reste extrêmement intéressant dans le test et la caractérisation des systèmes de fortes puissances pour lesquels les essais en charge et la séparation des pertes constituent un challenge, de par la mise en oeuvre des moyens expérimentaux lourds qu'ils nécessitent. Nous nous proposons de montrer ici les conditions et les conséquences très positives de l'application de cette méthode à l'étude des convertisseurs statiques.

## II. PRINCIPE DE LA MÉTHODE

### II.1. rappels

Rappelons tout d'abord le principe de la méthode appliquée aux machines à courant continu ou aux transformateurs, qui reste l'un des morceaux de bravoure des travaux pratiques d'Electrotechnique avec d'autres sujets célèbres comme l'arbre électrique ou le couplage d'un alternateur au réseau. Le schéma de la figure 1 montre ce principe.

Sans rentrer dans le détail de ces applications finalement particulières, indiquons simplement sur ces exemples qu'il s'agit d'interconnecter deux systèmes identiques, assistés par une ou plusieurs sources d'énergie auxiliaires communes, l'un fonctionnant en générateur, l'autre en récepteur de façon à ne gérer que l'énergie perdue dans ces deux systèmes. Dans l'exemple des transformateurs, la configuration est relativement simple car les échanges sont de natures purement électriques. Les primaires sont alimentés par le même réseau et une source alternative auxiliaire (synchrone du réseau d'alimentation, idéalement à déphasage réglable) permet de contrôler le courant

secondaire (en amplitude et en phase) donc le régime de fonctionnement et la puissance échangée entre les deux transformateurs. Le réseau fournit sensiblement les pertes fer, la source auxiliaire les pertes Joule.

Dans le cas des machines à courant continu, les énergies externes sont électriques et mécaniques. La configuration d'essai peut donc faire intervenir deux sources auxiliaires distinctes, l'une électrique dans la maille des induits, l'autre mécanique sur l'arbre d'entraînement, idéalement commun aux deux machines (vitesses rigoureusement identiques). La première fournira sensiblement les pertes liées à la partie électrique, la seconde les pertes mécaniques. Notons que l'on peut préserver le principe général de l'essai avec des variantes plus simples mais moins rigoureuses ou précises, telles un montage sans entraînement mécanique auxiliaire, la source électrique assurant le démarrage du banc et la fourniture de l'ensemble des pertes, ou encore la configuration précédente avec deux arbres découplés mécaniquement, ce qui suppose un ajustement de la vitesse par l'excitation.

L'intérêt de la méthode est double. Elle permet, d'une part, de réduire au minimum l'environnement expérimental puisqu'il n'y a pas de charge et les sources fournissent uniquement les pertes, d'autre part, ces dernières peuvent être mesurées avec une grande précision. Le tableau ci-dessous illustre le gain obtenu par rapport à une mesure effectuée par différence des puissances d'entrée et de sortie d'un système.

Mesure directe des pertes	Différences de puissances
$\frac{\ddot{A}P_e}{P_e} = \frac{\ddot{A}P}{P}$	$\frac{\ddot{A}P_e}{P_e} = \left[ \frac{1 + \eta}{1 - \eta} \right] \frac{\ddot{A}P}{P}$

Avec,

$\Delta P_e/P_e$ , incertitude sur la mesure des pertes

$\Delta P/P$ , incertitude sur la mesure de puissance

$\eta$ , rendement du système

Pour un rendement de 90%, la mesure par différence conduit à une incertitude sur la mesure des pertes 20 fois supérieure à l'incertitude de l'appareil de mesure.

Dans le cas des convertisseurs statiques, nous verrons plus loin que, moyennant certains aménagements et concessions, la philosophie générale de l'essai de deux systèmes énergétiquement placés "tête-bêche" peut être appliquée, même si ces derniers sont différents (mais appartenant à une même famille générique).

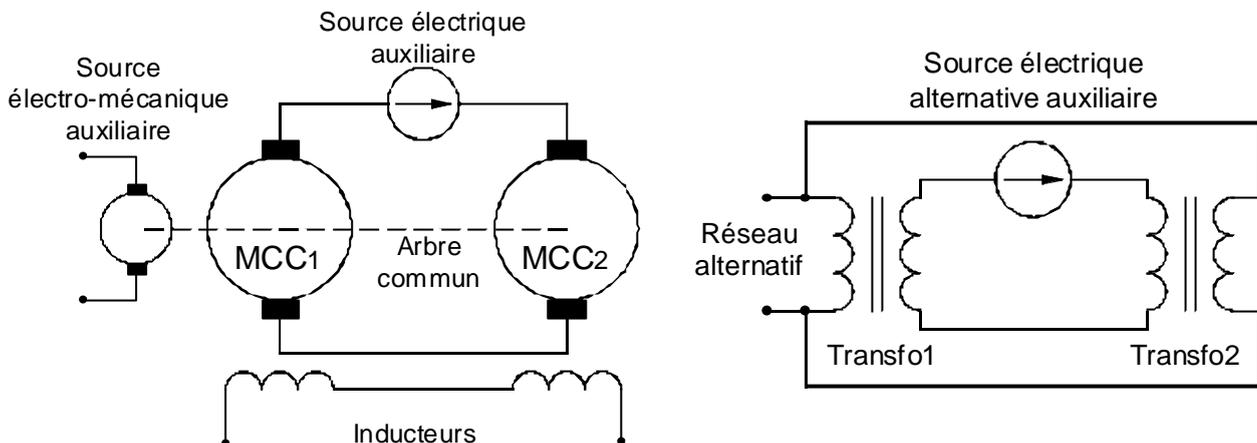


Figure 1 : Méthode d'opposition pour des dispositifs classiques

## II.2. Principes généraux d'application

La définition des principes généraux et des conditions d'application de la méthode, en supposant quelconques les dispositifs et la nature des échanges d'énergie qui s'y produisent, serait certainement un exercice de réflexion et de synthèse passionnant mais probablement complexe et sortant, de toute façon, du cadre de cette modeste présentation.

Nous nous en tiendrons donc ici aux systèmes essentiellement électriques, avec à l'esprit l'application plus précise aux convertisseurs statiques.

### II.2.a. Réversibilité

Si l'on fait l'hypothèse de deux systèmes identiques, l'un fonctionnant en générateur et l'autre en récepteur, cela implique immédiatement leur réversibilité énergétique. A priori, on ne peut donc pas tester des systèmes tels les convertisseurs AC-DC ou DC-DC non-réversibles.

### II.2.b. Symétrie de fonctionnement

Disposer de deux systèmes identiques réversibles ne signifie pas obligatoirement que l'essai les placera dans les mêmes conditions de fonctionnement, tout simplement parce qu'un dispositif réversible peut fonctionner différemment (avec plus ou moins de nuances) en générateur ou en récepteur. Un exemple simple pour illustrer cette possibilité est celui de la machine asynchrone qui, à même fréquence d'alimentation, devra fonctionner à vitesse différente en génératrice et en moteur ou, inversement, à vitesse

constante, devra être alimentée à fréquences différentes dans les deux modes. Dans ce deuxième cas, on voit bien que l'échange entre les deux machines sur leur partie électrique ne pourrait se faire directement.

Il faut donc prendre garde à ce que la nature des systèmes considérés et la définition des points de fonctionnement de la chaîne permettent d'aboutir à une symétrie de fonctionnement satisfaisante, ce qui doit être évalué au cas par cas.

Ces deux conditions strictes doivent être respectées lorsque l'on veut tester spécifiquement un système encore non-caractérisé et que l'on dispose de deux exemplaires de ce système. Dans la partie suivante, nous verrons que d'importantes entorses peuvent être faites à ces règles si l'on dispose de systèmes "étalon" pré-caractérisés, ce qui est tout à fait concevable dans une logique de banc de test de dispositifs.

## III. APPLICATIONS AUX CONVERTISSEURS STATIQUES

Les convertisseurs statiques se prêtent finalement bien à la méthode d'opposition. Les échanges sont de nature électriques et de nombreuses fonctions de conversion présentent un côté "continu", ce qui facilite grandement l'interconnexion et la gestion du régime de fonctionnement. Nous allons présenter dans cette partie les convertisseurs sur lesquels la mise en application est quasi-naturelle ainsi que les extensions de la méthode que l'on peut imaginer avec deux convertisseurs différents.

### III.1. Convertisseurs identiques

Les deux familles de convertisseurs qui apparaissent d'emblée bien adaptées aux essais en opposition à deux systèmes identiques sont les commutateurs de courant à thyristors et les onduleurs de tension, fonctions parallèlement très largement utilisées.

#### III.1.a. Exemple 1 : Mise en opposition de commutateurs à thyristors

La figure 2 montre un exemple de mise en opposition de deux ponts à thyristors, alimentés par le même réseau alternatif et interconnectés sur leur partie continue.

On notera la similitude frappante de ce montage avec la structure d'une alimentation 4 quadrants à thyristors à inductances de circulation, à ceci près qu'aucune charge n'est placée entre les deux ponts, ou encore mieux, avec une liaison intermédiaire à courant continu reliant deux réseaux alternatifs distincts. Le principe de contrôle sera d'ailleurs tout à fait similaire à ce dernier cas (cf. plus loin). La disposition des inductances entre les deux ponts est rendue nécessaire par leur connexion directe au même réseau triphasé.

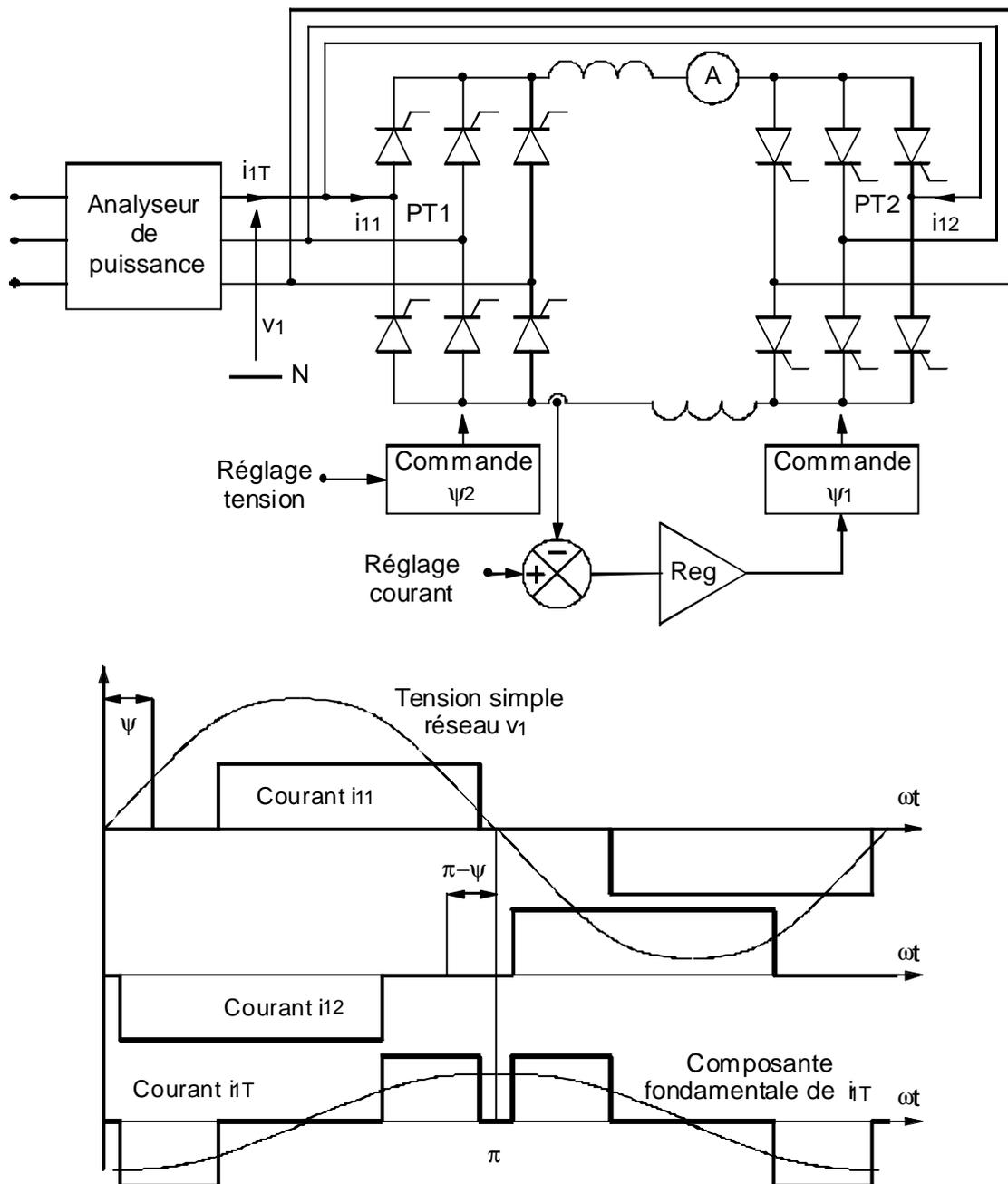


Figure 2 : Commutateurs à thyristors en opposition

On note, sur ce schéma, qu'aucune source continue auxiliaire n'est présente dans la ligne continue. En effet, le contrôle des commutateurs par l'angle de retard à l'amorçage des thyristors permet de maîtriser à volonté le courant circulant entre les deux ponts.

La mesure de puissance sur le réseau alternatif donne alors immédiatement les pertes dans l'ensemble de la chaîne, comprenant les deux commutateurs et les inductances. Si ces dernières sont bien caractérisées, ce qui n'est guère compliqué, on peut déterminer aisément les pertes dont elles sont le siège en fonction du courant continu et faire la séparation des pertes entre ces inductances et les commutateurs.

Pour choisir et régler le point de fonctionnement, il est largement préférable d'introduire des boucles de régulation, ce qui est le "plus" permis par les convertisseurs par rapport aux montages traditionnels de la figure 1 et qui correspond de surcroît à la réalité de leur utilisation. Dans le cas présent, une approche (figure 2) est de laisser l'un des ponts en boucle ouverte en réglant sa tension moyenne de sortie directement avec sa commande d'amorçage, l'autre étant piloté par une boucle de régulation du courant intermédiaire.

On choisit donc la tension de fonctionnement en réglant le premier pont (PT1) et le courant intermédiaire (courant débité par chaque pont) en réglant la consigne de la boucle. L'angle d'amorçage du second pont PT2 s'alignera sur celui de PT1 en respectant approximativement une loi du type :

$$\psi_2 = \pi - \psi_1,$$

avec un écart permettant l'apparition du courant désiré et compensant les chutes de tension du montage.

Dans cette proposition apparaît une petite imperfection par rapport aux conditions d'application évoquées précédemment. Les points de fonctionnement des deux commutateurs ne sont pas rigoureusement identiques puisqu'ils sont commandés avec des angles d'amorçages différents (l'un est en redresseur, l'autre en onduleur assisté). Ceci a peu d'influence sur le bilan global, si les convertisseurs sont en régime continu de courant, car les thyristors voient alors sensiblement la même forme de courant (l'amplitude étant contrôlée), quel que soit l'angle d'amorçage. Le point sensible à la valeur de cet angle est la commutation (empiètement) entre branches qui détermine la forme de l'établissement et de la disparition du courant dans un thyristor. On peut considérer que ce phénomène n'interviendra qu'au second ordre sur les pertes.

Un autre point particulier apparaît à l'analyse du courant  $i_T$  de la figure 2. Ce courant, représenté de façon idéalisée, est la résultante des courants de chaque commutateur, dont on a supposé, sur ce graphe, qu'ils étaient commandés à angle d'amorçage rigoureusement complémentaires (pertes nulles). Sa valeur instantanée n'est pas nulle et sa forme laisse deviner l'existence d'une composante à la fréquence fondamentale en quadrature avec  $v_i$ . Il n'y a donc pas de puissance active consommée, conformément à l'hypothèse mais

une puissance réactive demeure, qui dépend des valeurs de  $\psi_1$  et  $\psi_2$  et qui pourra éventuellement gêner la précision de la mesure de puissance dans une configuration réelle avec des pertes.

### III.1.b. Exemple 2 : Mise en opposition de bras d'onduleur de tension

La seconde famille se prêtant fort bien à l'application de la méthode d'opposition est celle des onduleurs de tension. C'est également une fonction très utilisée, dans l'alimentation de machines à courants alternatifs, pour élaborer des onduleurs de secours, des filtres actifs, des FACTS, des absorbeurs sinusoidaux et d'autres applications moins courantes.

C'est dans le cadre de l'étude de tels dispositifs que nous nous sommes ré-approprié la méthode dans nos deux laboratoires.

Le schéma de la figure 3 montre le type d'association que l'on peut réaliser pour caractériser des bras d'onduleur. Les composants à semi-conducteurs actifs qui y apparaissent sont des IGBT, du fait de leur utilisation quasi-systématique dans ces fonctions, jusqu'à des puissances de l'ordre du MW.

Le principe du montage est sensiblement le même que dans le cas précédent à ceci près que ces bras d'onduleur sont alimentés en tension continue, ce qui facilite largement la mise en oeuvre. Le condensateur de découplage, indispensable au bon fonctionnement de ce type de structure (création d'une source locale connectée aux bras avec minimisation des inductances parasites), associé à l'inductance  $L$  empêche les courants harmoniques dus au découpage de remonter vers l'alimentation.

Dans cette association, conformément au principe, l'un des bras fonctionne en générateur et l'autre en récepteur. A nouveau, une simple inductance tient lieu de charge. Elle a pour unique fonction d'assurer la liaison entre les deux sources de tension instantanées distinctes que constituent les bras. Sa valeur est fonction du lissage du courant intermédiaire que l'on veut obtenir.

Le principe de contrôle, va s'apparenter à celui des commutateurs du paragraphe précédent. Ce type de convertisseur est aujourd'hui majoritairement utilisé en modulation de largeur d'impulsion (MLI). Nous allons donc nous placer dans cette configuration. Chaque bras est muni d'une commande MLI qui peut être réalisée avec toutes les techniques imaginables, des circuits analogiques jusqu'aux microcontrôleurs ou DSP en passant par les FPGA. C'est cette dernière solution que nous utilisons dans nos systèmes. Les deux commandes doivent être synchrones afin d'éviter des battements sur la ligne d'alimentation mais également de minimiser la valeur de l'inductance intermédiaire (choix judicieux de techniques de modulation nécessitant le synchronisme). En réalité, on peut dire qu'il s'agit d'une commande MLI à deux voies indépendantes sur le plan de la consigne mais complètement liées dans la technique de modulation.

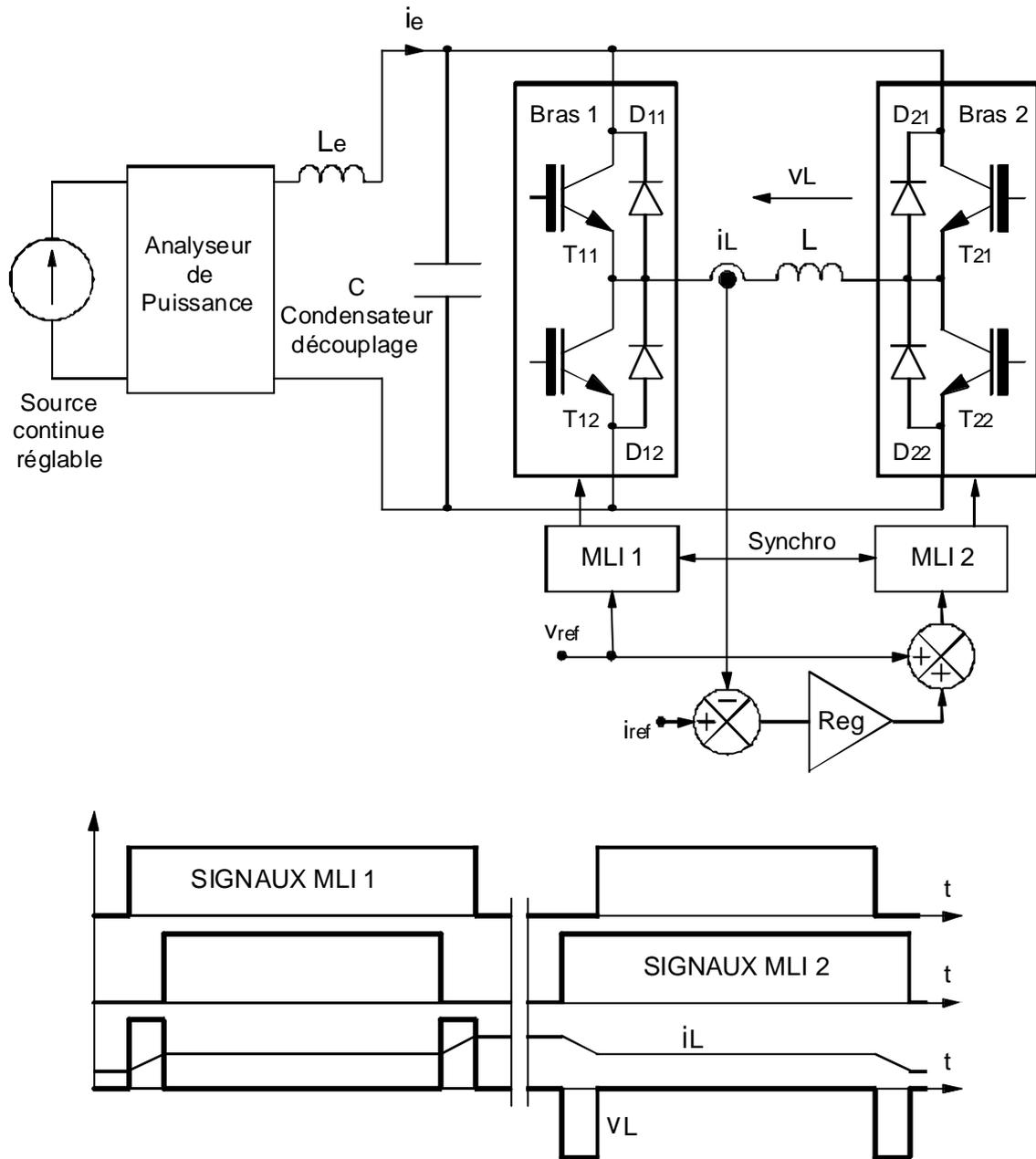


Figure 3 : Bras d'onduleur en opposition

Le premier bras (1) est piloté en boucle ouverte par une consigne permettant de contrôler sa tension de sortie. Le second bras est asservi sur le premier par une régulation de courant dont la consigne déterminera la forme du courant circulant entre les deux bras. La réinjection de la grandeur  $v_{ref}$  sur le schéma de la figure 3 a pour fonction de rendre cette boucle peu sensible à la perturbation que constitue l'éventuelle variation de la tension du bras 1 (piloté par  $v_{ref}$ ).

Dans cette association la modulation du bras 2 suivra de façon très proche celle du bras 1, l'écart entre les deux permettant d'imposer le courant voulu en compensant les pertes. Une illustration très qualitative est donnée sur le graphe de la figure 3 avec l'utilisation

d'une modulation régulière centrée sur les deux bras. Ce mode de fonctionnement conduit à des valeurs d'inductance intermédiaire très faibles en regard de ce qu'elles seraient dans un montage classique à paramètres identiques, ce qui est particulièrement intéressant sur le plan de la mise en oeuvre.

A partir de cette architecture, différents modes de fonctionnement peuvent être testés, selon la nature des consignes injectées dans la commande. Un fonctionnement en hacheur résultera de l'application de grandeurs continues sur  $i_{ref}$  et  $v_{ref}$ , tandis qu'un fonctionnement alternatif, plus conforme aux principales applications de ces bras, peut être obtenu par injection de modulateurs basse fréquence (du Hz à quelques centaines de Hz),

classiquement sinusoïdales. Dans ce deuxième cas, sur lequel nous allons nous pencher plus précisément, il suffit de disposer d'un générateur de consignes sinusoïdales synchrones réglables en amplitude et en phase pour le courant et la tension. Tous les points de fonctionnement d'un onduleur peuvent alors être obtenus.

Une qualification préalable des éléments réactifs (Le, L, C), dans lesquels il y aura quelques pertes (de l'ordre de 10% du total), permet de procéder ensuite à la

séparation des pertes. La mesure de puissance sur le bus continu est aisément d'une grande précision, ce qui autorise une caractérisation très fine des bras.

Comme nous l'avons souligné dans la définition des conditions d'application, il faut maintenant se poser la question de la symétrie de fonctionnement des deux bras dans cette configuration.

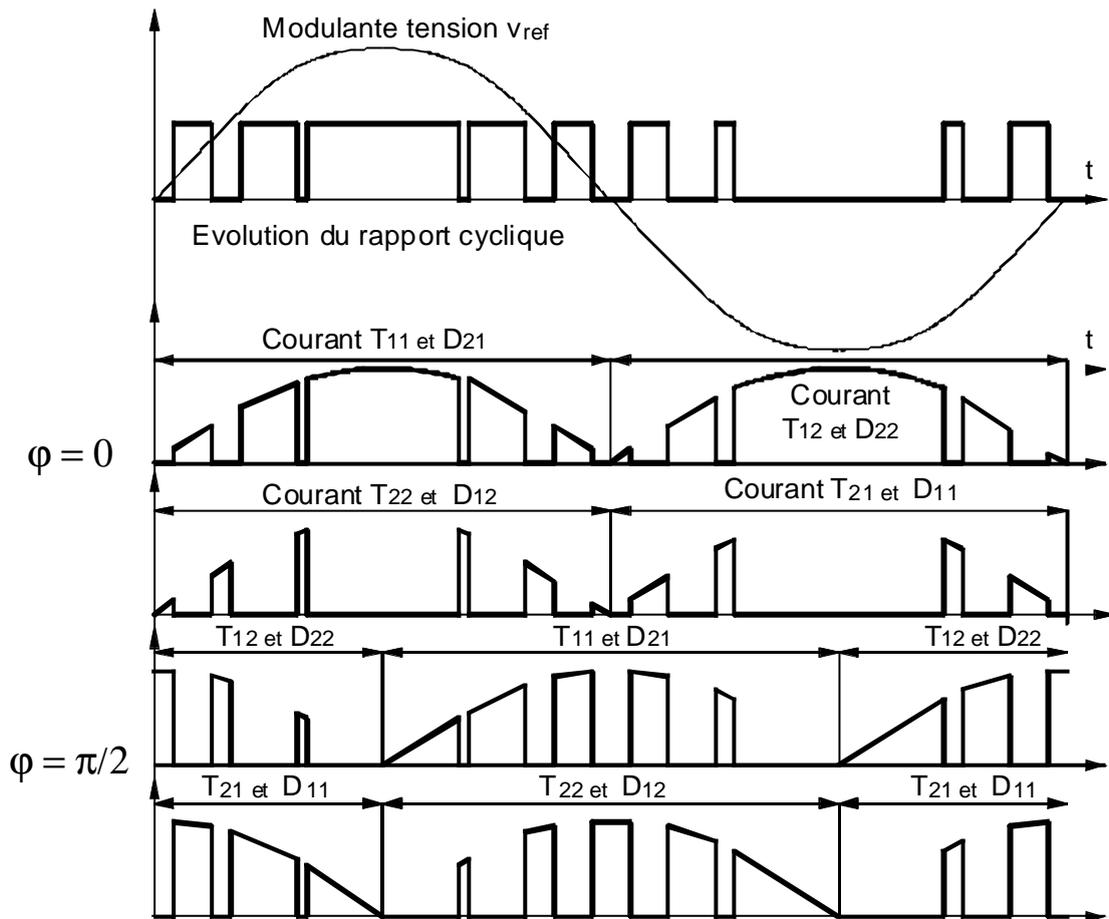


Figure 4 : Régimes de conduction en fonction du déphasage des modulantes

Pour cela nous allons raisonner sur le graphe de la figure 4 qui montre qualitativement ce qui se passe en modulation (avec ici un rapport très faible et purement pédagogique entre la fréquence de modulation et la fréquence de découpage). On suppose que les chutes de tension à compenser sont faibles et que les rapports cycliques sur les deux bras sont donc quasiment identiques.

Pour plus de commodité, on utilise une convention générateur pour les deux bras, soit  $i_1 = iL = -i_2$ . On néglige l'ondulation de courant dans L.

#### Pertes par conduction

L'évolution du rapport cyclique sur le bras 1 est

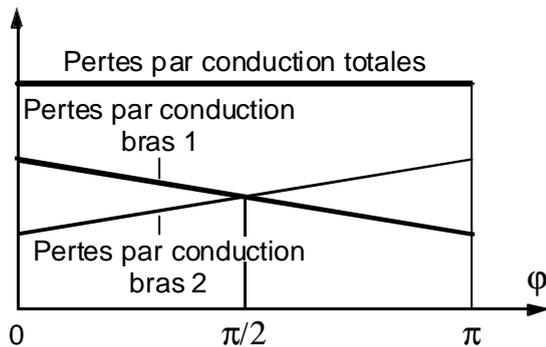
directement fonction de la modulante de tension injectée sur  $v_{ref}$ . Les séquences de conduction des différents composants, IGBT et diodes, dépendent alors du déphasage  $\varphi$  entre les modulantes tension et courant. Pour un courant  $i_1$  en phase (bras 1 générateur,  $\varphi = 0$ ), le maximum de courant dans les IGBT coïncide avec les rapports cycliques les plus élevés, soit des contraintes en conduction maximales tandis que les diodes sont peu contraintes. Inversement, pour un courant déphasé de  $\pi$ , ce qui est le cas de  $i_2$  (bras 2 récepteur) si  $i_1$  est en phase, ce sont les diodes qui sont maximales contraintes en conduction. Les chutes de tension à l'état passant des diodes et des IGBT étant a priori différentes (généralement plus faibles pour les diodes), les pertes par conduction ne seront pas

identiques dans les deux régimes. Le seul cas à contraintes symétriques est celui du déphasage  $\varphi = \pi/2$ .

Il faut préciser que les modes de fonctionnement des deux bras sont complémentaires :

- à  $\varphi = 0$ , le bras 1 est en "plein" générateur, le bras 2 en "plein" récepteur,
- à  $\varphi = \pi$ , c'est le bras 2 qui devient "plein" générateur et le bras 1, "plein" récepteur,
- à  $\varphi = \pi/2$ , aucune puissance active n'est échangée, les deux bras sont dans le même régime.

Si l'on trace qualitativement l'évolution des pertes par conduction en fonction de  $\varphi$ , à chutes de tension dans les diodes inférieures à celles des IGBT, la tendance est celle de la figure 5.



**Figure 5 :** Pertes par conduction en fonction du déphasage des modulantes

Si l'évolution des pertes par conduction d'un bras présente cette forme linéaire en fonction de  $\varphi$ , la modification du déphasage n'aura aucune influence sur la somme des pertes par conduction mesurée par la méthode. Parallèlement, il sera impossible de déduire de cette mesure de pertes globales l'évolution des pertes dans un bras en fonction de  $\varphi$ . Ce problème peut être assez correctement résolu par une pondération théorique de la répartition des pertes par conduction, en s'appuyant sur les caractéristiques données par les constructeurs des IGBT et des diodes. Dans un certain nombre de modules modernes intégrant l'ensemble du bras, les gains obtenus sur les chutes de tension directe des IGBT d'une part, et la tendance à améliorer les caractéristiques dynamiques des diodes, ce qui induit une augmentation de leur chute de tension directe, d'autre part, font que les pertes totales en conduction sont assez peu sensibles au déphasage.

#### **Pertes par commutation**

Si l'on regarde les graphes de la figure 4 et en les imaginant à une fréquence de découpage très supérieure à celle de la modulante, on peut assez facilement conclure que le régime de déphasage choisi n'a pas d'influence sur les pertes par commutation. En effet, à fréquence de découpage et amplitude du courant données, le nombre de commutation est le même et l'enveloppe du courant commuté sur

l'ensemble des périodes de découpage est également inchangée.

Inversement, la précision de la mesure des pertes induite par la méthode, permet de mesurer aisément la variation des pertes entraînée par une variation de la fréquence de découpage. Il faut avoir prévu cette possibilité de réglage au niveau de la commande MLI. En figeant tous les autres paramètres, amplitude du courant, déphasage, on fige les pertes par conduction et la variation mesurée est directement celle des pertes par commutation en fonction de la fréquence.

A l'exception de la nuance sur les pertes par conduction en fonction du régime de déphasage, on constate que le montage retenu permet de se rapprocher fortement des conditions optimales d'application de la méthode. Une évaluation précise des différentes pertes en fonction des paramètres de fonctionnement d'un bras peut alors être obtenue, ce qui est difficile pour ne pas dire impossible avec des méthodes directes.

### **III.2. Convertisseurs différents**

Nous avons vu, dans la partie précédente, l'application de la méthode d'opposition au plus près des règles de l'art, en utilisant deux systèmes de conversion identiques. A partir de cette méthode ou de tout autre moyen expérimental, la qualification d'un convertisseur "étalon" aux caractéristiques énergétiques parfaitement connues et aux paramètres de commande largement réglables peut permettre d'en étendre le champ d'utilisation.

En effet, le couplage de cet étalon à un autre convertisseur aux performances inconnues mais aux caractéristiques électriques compatibles, dans la même logique "générateur-récepteur", permet toujours l'économie d'une charge et une mesure précise des pertes du convertisseur en test, en retranchant aux pertes totales les pertes connues du convertisseur étalon.

La figure 6 fait apparaître quelques associations possibles, en supposant l'existence d'un bras d'onduleur étalon. La difficulté réside dans la nécessité de synchroniser deux commandes élaborées de façon distinctes, ce qui est néanmoins réalisable avec une commande du système étalon "bien pensée".

Ces éventuelles associations sont envisageables du fait de la similitude structurelle des convertisseurs qui réalisent tous, intrinsèquement une conversion DC-DC. Un tel dispositif expérimental, outre la difficulté de synchronisation évoquée précédemment, suppose que les tensions amont et aval des convertisseurs soient compatibles avec celles de l'étalon ou que ce dernier soit capable de fonctionner dans une large plage de tension d'alimentation, ce qui nécessite une précaractérisation dans un domaine paramétrique très vaste.

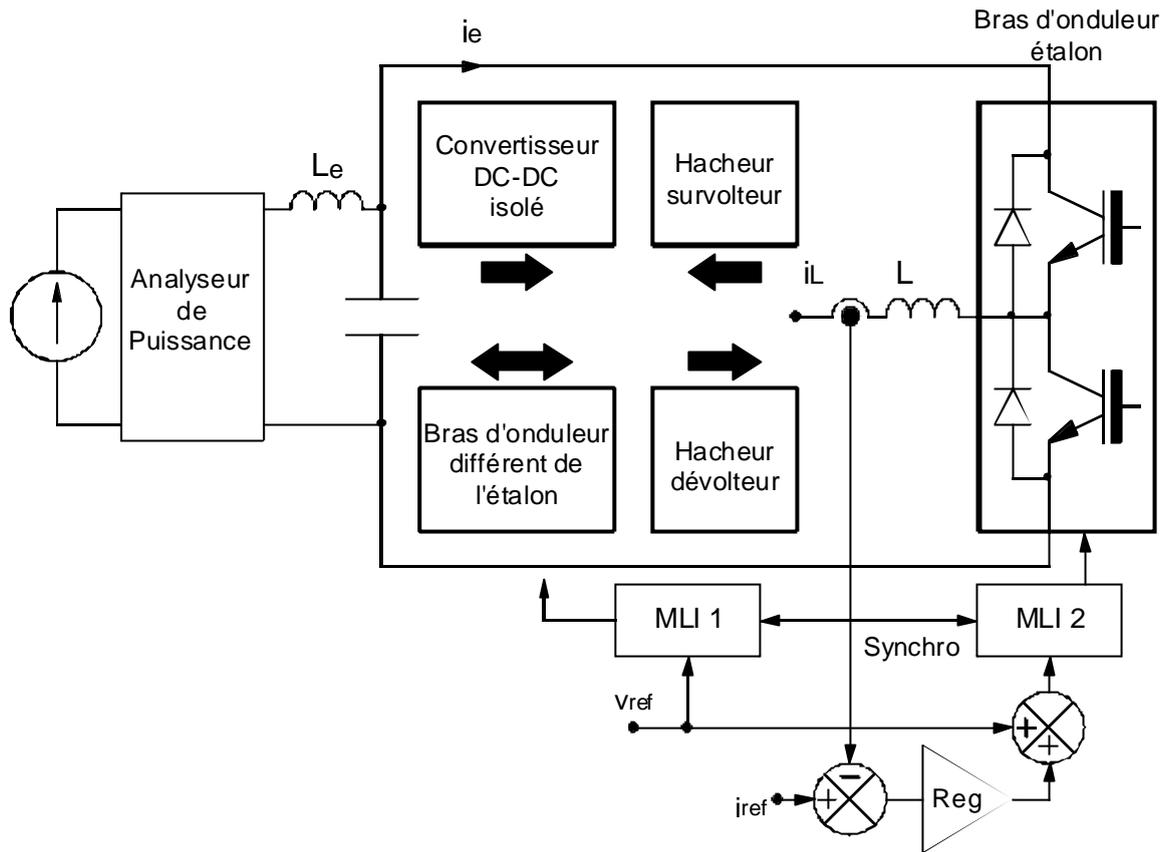


Figure 6 : Extension de la méthode à des systèmes différents

#### IV. CONCLUSION

Nous avons essayé de montrer ici que des méthodes expérimentales ingénieuses et efficaces, comme l'est indubitablement la méthode d'opposition, pouvaient allègrement résister à l'épreuve du temps. Nous avons largement exploité et continuons d'exploiter cette méthode dans nos laboratoires sur différentes opérations, essentiellement dans le domaine des onduleurs. Citons dans le désordre la caractérisation d'onduleurs multi-niveaux de plusieurs centaines de kW, la comparaison d'onduleurs à commutation douce et de leur équivalent à commutation dure, toujours dans la gamme des 100kW, enfin la réalisation de bancs de vieillissement de composants ou une structure de test à faible consommation est indispensable.

La constante de ces expériences diverses est la précision des mesures obtenues, que nous avons eu l'occasion de confirmer par d'autres techniques expérimentales, beaucoup plus lourdes, et la commodité des montages dans lesquels un élément frappant est la "petitesse" de la charge réactive et de la source d'alimentation en comparaison de la taille des convertisseurs testés.

Il nous paraît tout à fait concevable, en utilisant des convertisseurs de faible puissance, de faire passer ce concept dans le domaine pédagogique, avec les nombreuses observations sur les échanges d'énergie (réversibilité, compatibilité), sur l'origine et la mesure des pertes et des rendements qu'il permet de réaliser.

# CONVERSION D'ÉNERGIE À PARTIR D'UNE ÉOLIENNE EN VITESSE VARIABLE

Gilles FELD, Michel LAVABRE

Département EEA, ENS Cachan

61, Avenue du Président Wilson, 94 235 Cachan

E.mail : gilles.feld@eea.ens-cachan.fr

**Résumé :** La recherche de l'augmentation des rendements des chaînes de production d'énergie conduit à la réalisation de convertisseurs mécano-électrique fonctionnant à vitesse réglable de façon à optimiser le transfert de puissance. Nous envisageons ici l'étude d'une machine, constituée à la base par une machine asynchrone à rotor bobiné, utilisée en machine synchrone généralisée.

**Mots clés :** machine synchrone généralisée, redresseur à absorption sinusoidale, énergies renouvelables, éolienne.

Cet article a été publié dans les actes du colloque CETSIS- EEA 2001

## 1. Présentation

Cette manipulation proposée aux étudiants de génie électrique à l'ENS de Cachan est une transposition d'une éolienne à vitesse variable. La réalisation effectuée peut se faire dans un domaine de puissance quelconque sans distorsion de la réalité. Elle permet d'étudier successivement : une génératrice à vitesse variable et fréquence fixe, un convertisseur statique commandé en courant, un redresseur à absorption sinusoidale [1]. Le synoptique de la chaîne de conversion

d'énergie est donné par la figure 1.

Deux modes de fonctionnement sont possibles :

- ❶ Dans le cas d'un réseau îloté, la machine est régulée de façon à délivrer une tension de valeur efficace fixe et de fréquence fixe sur une plage de vitesse donnée.
- ❷ Dans le cas d'un réseau puissant, la machine est régulée en tension et fréquence avant d'être couplée sur le réseau. Elle est, par la suite, régulée en puissance active et réactive.

diamètre de l'hélice	nombre de pales	Surface balayée	fréquence de rotation	vitesse nominale du vent	multiplicateur
65 m	3	3318 m <sup>2</sup>	14 à 24 tr/min	13 m/s	78 / 1

Tableau 1 : Caractéristiques de l'éolienne

tension stator	couplage	tension rotor	courant stator	puissance	nombre de pôles	fréquence de synchronisme
500 V	étoile	1500 V	1733 A	1500 kW	4	1500 tr/min

Tableau 2 : Caractéristiques nominales de la machine

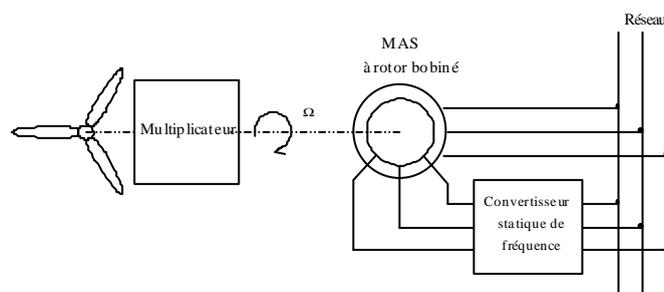


Figure 1 : Synoptique de la chaîne de conversion

2. Déroulement du TP.

Cette manipulation limitée à l'étude d'un réseau iloté se déroule sur deux séances de 4h et se décompose en trois parties :

2.1) Une étude mécanique succincte montrant l'intérêt de la vitesse variable sur la puissance fournie en fonction de la vitesse du vent. A partir d'un modèle simplifié, on détermine l'expression de la puissance en fonction de la vitesse angulaire de rotation et de la vitesse du vent de façon à tracer le réseau de courbes de la figure 2.

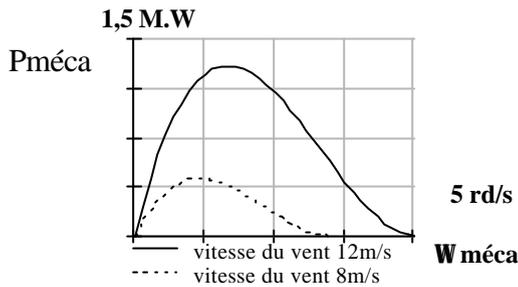


Figure 2 : Puissance délivrée par l'éolienne

2.2) Une étude du convertisseur électromécanique et la réalisation de trois sources permet de contrôler l'amplitude et la pulsation des courants rotoriques.

La pulsation rotorique  $\omega_r$  est réglée en fonction de la vitesse  $\Omega$  pour maintenir constante la pulsation statorique  $\omega_s$ . L'amplitude  $I_{max-r}$  est régulée de telle sorte que la tension statorique soit d'amplitude constante.

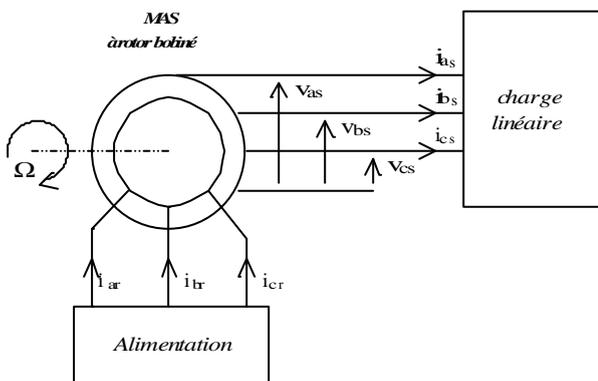


Figure 3 : Schéma de principe

La machine utilisée est un moteur asynchrone à rotor bobiné de 3 kW.

La partie puissance, côté rotor, est réalisée à partir d'un onduleur de tension piloté en courant conformément à la figure 4. Les bras d'onduleur sont constitués de transistors IGBT et de diodes Semikron (50 A-1200 V) avec un driver SKHI22 assurant la commande rapprochée et la protection.

Les références de courant sont élaborées à partir d'une carte dSPACE (voir annexe) et la commande

des interrupteurs est réalisée à l'aide de comparateur à hystérésis (fourchette de courant).

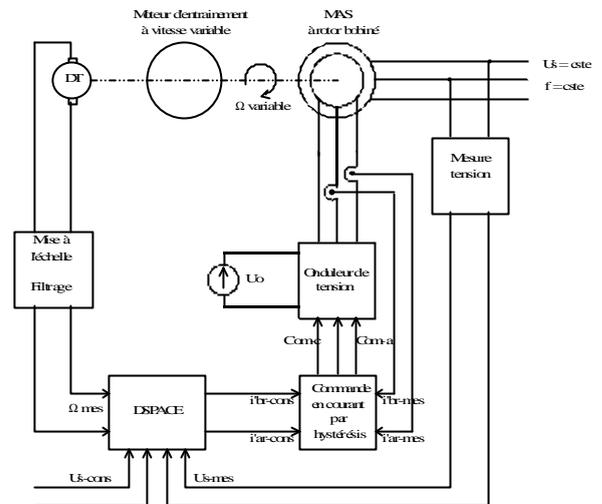


Figure 4 : Réalisation de l'alimentation du rotor

2.3) Une étude du convertisseur alternatif continu coté réseau (réalisation de  $U_0$ ) (figures 5 et 6). L'étude des échanges d'énergie autour de la vitesse de rotation nominale et le respect d'un taux de distorsion en courant conduit au choix d'un redresseur réversible en puissance et à absorption sinusoidale de courant. Les étudiants doivent dimensionner les éléments de ce variateur et élaborer une loi de commande permettant d'assurer la fonction désirée. Le convertisseur alternatif continu à commutations forcées est commandé en courant avec une boucle externe de tension.

La commande impose un facteur de puissance unitaire.

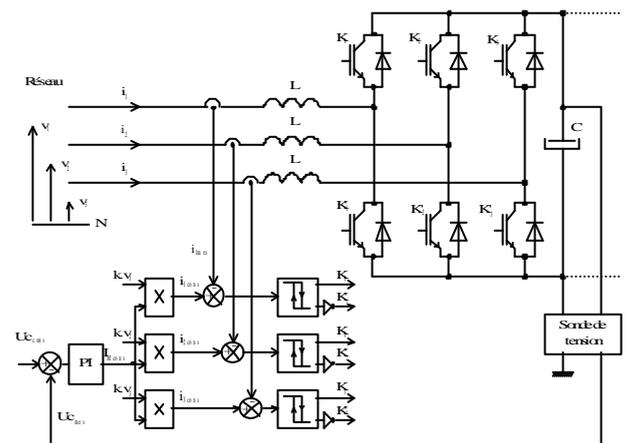


Figure 5 : Réalisation de la source de tension  $U_0$

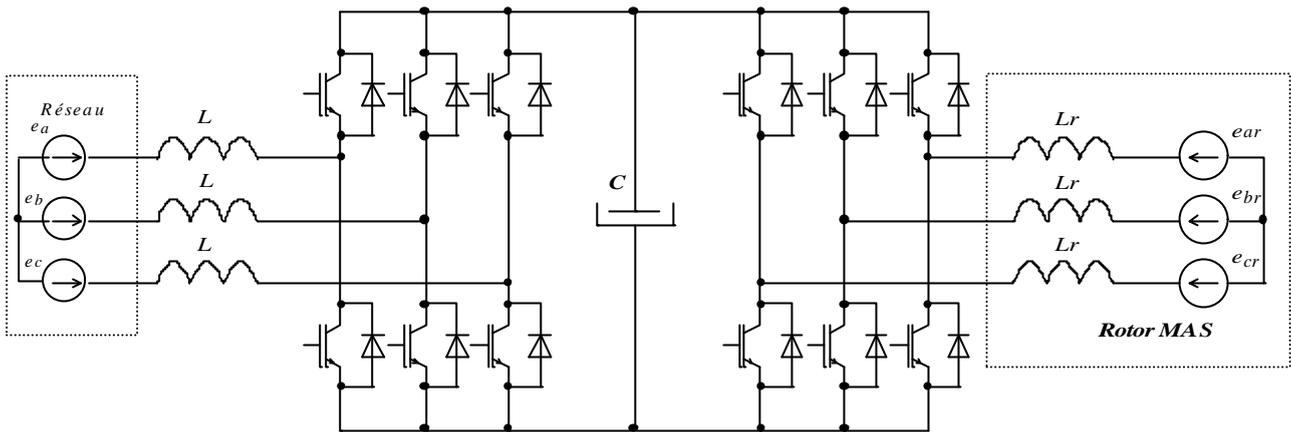
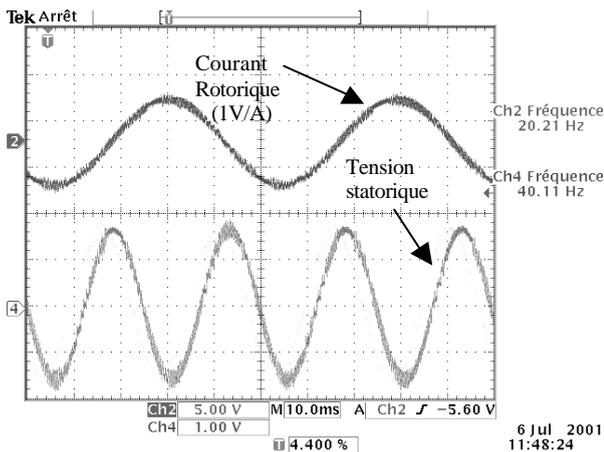


Figure 6 : Alimentation du rotor

### 3. Relevés expérimentaux

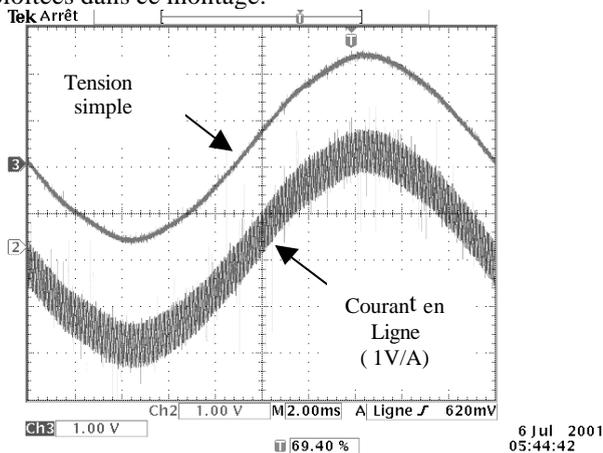
Les relevés ont été effectués pour une vitesse de rotation égale à la moitié de la vitesse de synchronisme.

#### Convertisseur électromécanique.



#### Convertisseur alternatif continu coté réseau

A cette vitesse le convertisseur alternatif continu côté réseau fonctionne en redresseur sans que les possibilités d'échange de puissance réactive ne soient exploitées dans ce montage.



Pour des vitesses supérieures à la vitesse de synchronisme, le courant en ligne resterait de forme sinusoïdale mais serait en opposition de phase avec la tension réseau

### 4. Conclusion

A partir d'un système réel dont l'actualité mérite d'être soulignée, les intérêts pédagogiques sont nombreux :

**Convertisseur électromécanique.** L'étude proposée permet, à partir du comportement de la machine asynchrone de déboucher sur la notion de convertisseur généralisé et elle met en oeuvre des équations d'électromagnétisme dont l'utilité n'apparaît pas toujours évidente auprès d'un public d'étudiants

**Convertisseurs statiques.** Généralité de la commande en courant (classique et présente dans d'autres manipulations). L'étude de  $U_0$  porte sur la réalisation d'un redresseur sinusoïdal et des avantages qui y sont associés.

**Aspect commande.** Universalité de la carte de commande dont le fonctionnement a été rencontré dans d'autres montages (pas obligatoirement dans le domaine des courants forts). Possibilité d'étudier une loi de commande permettant d'optimiser la puissance fournie.

**Aspect simulation.** L'utilisation des phaseurs spatiaux conduit à un modèle simple du convertisseur électromécanique (annexe 4) et permet la simulation de l'ensemble sous Matlab.

**Annexe 1. Schéma équivalent.**

En supposant le régime permanent sinusoïdal, la répartition des fmm sinusoïdales et la machine non saturée, le schéma équivalent d'une phase vue du stator est donné par la figure 7 où :

$$e_{as} = 1.5.M_{rs} \cdot (p.\Omega + \omega_r) \cdot I_r \cdot \sqrt{2} \cdot \sin((p.\Omega + \omega_r) \cdot t)$$

Avec

- $M_{rs}$  : Maximum de la mutuelle rotor stator.
- $L_s$  : Inductance cyclique statorique.
- $R_s$  : Résistance d'une phase.
- $\Omega$  : Vitesse angulaire de rotation.
- $\omega_r$  : Pulsation des courants rotoriques.
- $p$  : Nombre de paires de pôles.
- $I_r$  : Valeur efficace du courant rotorique

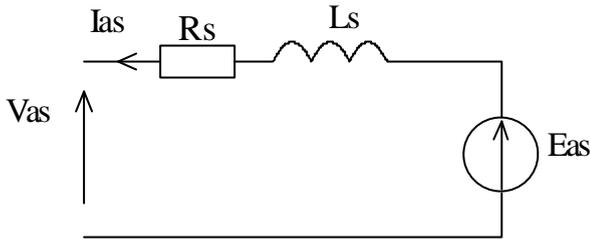


Figure 7 : Schéma équivalent

**Annexe 2. Echanges de puissance.**

Dans les mêmes conditions que précédemment, la puissance moyenne reçue par le rotor s'écrit :

$$P_r = \frac{\omega_s - p.\Omega}{\omega_s} \cdot P_{stator}$$

Pour une vitesse de rotation inférieure à la vitesse de synchronisme, l'arbre de puissance est donné à la figure 8 (le rotor absorbe de l'énergie électrique).

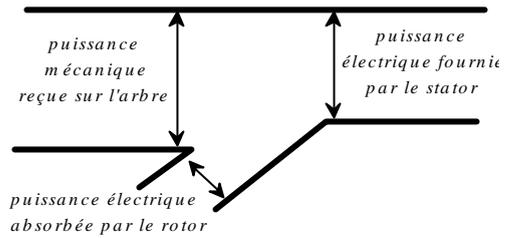


Figure 8 : Transfert de puissance.  $W < p w_s$

Pour une vitesse de rotation supérieure à la vitesse de synchronisme, l'arbre de puissance est donné à la figure 9 (le rotor fournit de l'énergie électrique)

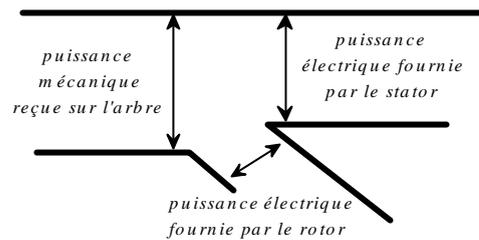


Figure 9 : Transfert de puissance.  $W > p w_s$

Pour un fonctionnement autour du synchronisme (typiquement  $\pm 30\%$ ), la puissance du convertisseur est limitée à 30% de la puissance fournie par le stator.

**Annexe 3. Commande du convertisseur.**

Le schéma de commande implanté dans le DSP, programmé à partir de Simulink, est donné à la figure 10.

Remarque. De façon à travailler au-delà de la vitesse de synchronisme, sans contraintes mécaniques excessives du groupe, nous avons choisi comme fréquence des courants statoriques la valeur de 40 Hz (soit une pulsation de  $80 \pi \text{ rad / s}$ ).

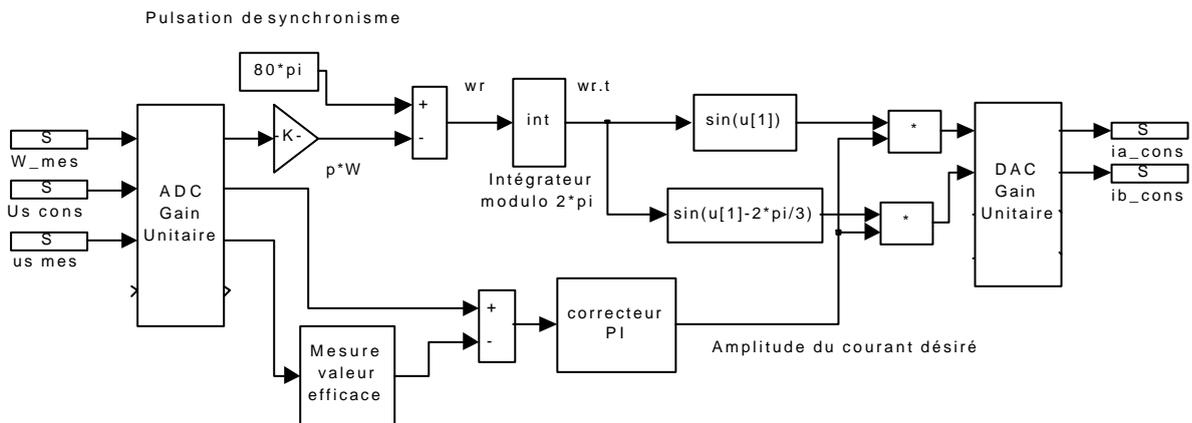


Figure 10 : Commande du convertisseur côté machine

**Annexe 4. Modélisation de la machine**

L'utilisation des phaseurs spatiaux permet une écriture concise des équations électromagnétiques. On rappelle l'écriture du phaseur spatial  $\underline{x}(t)$

$$\underline{x}(t) = \frac{2}{3}(x_a(t) + a.x_b(t) + a^2.x_c(t))$$

$$\underline{v}_s = R_s \underline{i}_s + \frac{d\phi_s}{dt} \quad \underline{v}_r = R_r \underline{i}_r + \frac{d\phi_r}{dt}$$

$$C_e = \frac{3}{4} p.j.(\phi_s \underline{i}_s^* - \phi_s^* \underline{i}_s)$$

$$\begin{bmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M.e^{j\theta_e} \\ M.e^{-j\theta_e} & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix}$$

Les équations de ce paragraphe conduisent au modèle donné par la figure 11

Le coefficient de dispersion de Blondel  $\sigma$  étant défini par la relation :

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_r.L_s}$$

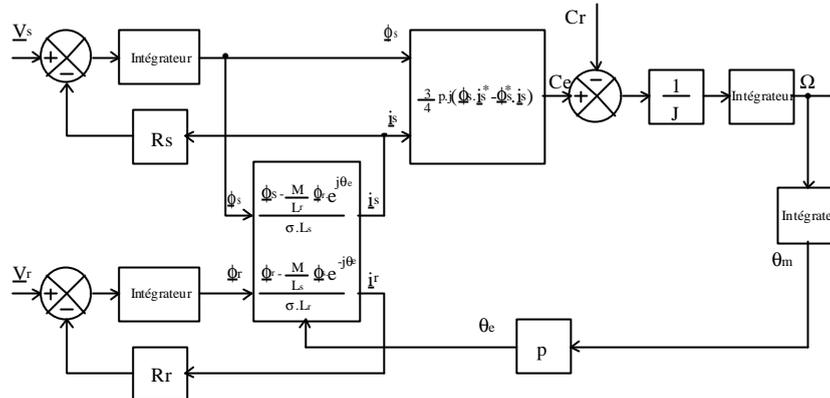


Figure 11 : Modèle de la machine

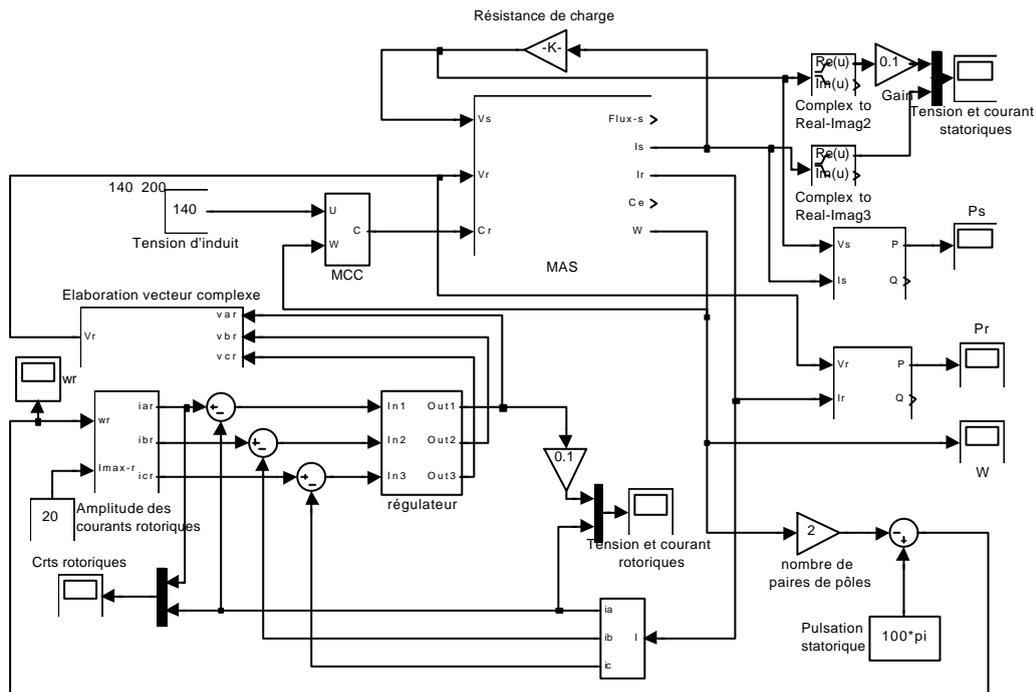


Figure 12 : Simulation avec entraînement de la machine par une MCC.

**Références**

- [1] S. Tnani et H. Godfroid, Génératrice synchrone généralisée. Alternateur à vitesse variable et fréquence fixe. Journée S.E.E.
- [2] H. Godfroid, A. Mirzaian et D. Ramuz, Machine synchrone pour procédés exigeants. Revue internationale de génie électrique. Volume1 1998
- [3] M. Budinger, D. Leray et Y. Deblezer, Eoliennes et vitesse variable. Revue 3EIn°21.

# ASPECT ECONOMIQUE DE LA CONCEPTION DES MATERIELS : Évolution du concept et souvenirs personnels.

Michel POLOUJADOFF

Membre émérite de la SEE

Université Pierre et Marie Curie, Paris VI,  
4, place Jussieu, 75 252 PARIS CEDEX 05

**Résumé :** Les diverses raisons qui influent sur le choix du rendement d'un futur équipement sont analysées. La méthode du coût total, incluant le prix capitalisé des pertes futures, est développée et l'historique de ses applications, telles que l'auteur l'a observé durant sa carrière, est esquissé.

**Mots clés :** machines électriques, rendement, pertes, capitalisation.

Cet article est la version écrite de l'exposé effectué par l'auteur au congrès " EF'99 "

## 1 Introduction.

Le titre de cet article annonce des " souvenirs personnels ", ce qui naturellement, est quelque peu égocentrique. L'avantage recherché est que le ton peut être moins formel et laisser plus de place à toute critique, ce qui, je l'espère, me donnera toute latitude pour dire des choses qu'on ne veut pas toujours reconnaître.

Il faut dire pour commencer que tout le début de ma carrière a été consacré à l'analyse du fonctionnement des machines électriques ; c'est ce qu'aujourd'hui on préfère appeler " modélisation ". C'est seulement après une dizaine d'années qu'on me demanda de faire quelques cours sur la conception des machines. Les sujets à traiter n'étaient pas vraiment définis, mais le temps imparti était quant à lui, tout à fait limité. Dans ces conditions, je décidai de réviser ce que j'avais appris à l'école qui portait sur de nombreux sujets, notamment les transformateurs, les machines à induction, et même les centrales hydrauliques et thermiques.

Hélas, la toute première question que je m'étais toujours posée resta une fois de plus sans réponse qui était : " qu'est une machine acceptable ? "

La seule chose qui m'ait semblé évidente à l'époque de mes études était que les pertes dans une machine ne doivent pas l'échauffer au point de la détruire mais cette règle ne donne d'indication utile que dans des cas extrêmes tels que des moteurs de fusées ou certains appareillages électroménagers.

Pour les cas ordinaires, on trouvait dans le livre de Liwshitz [1] des recommandations, du type de celles décrites à la figure 1, qui donnaient, pour certaines spécifications de transformateurs, des niveaux recommandés de pertes fer et de pertes par effet Joule.

Par ailleurs, M. Dormont, qui fut un très éminent professeur de technologie des transformateurs, recommandait de commencer par essayer de choisir pour section d'une colonne de transformateur la valeur (en  $\text{cm}^2$ ) :

$$A = C*(S/f)^{1/2}$$

Expression dans laquelle

S : puissance apparente par colonne ;

f : fréquence ;

C : constante comprise entre 125 et 175.

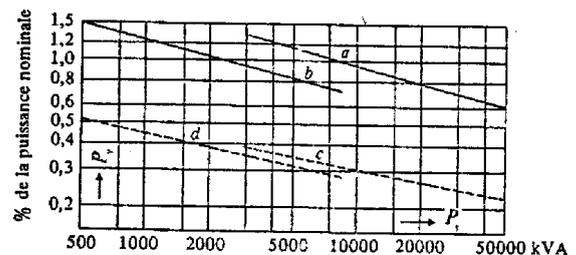


Figure 1 : pertes dans les transformateurs triphasés refroidis à l'huile pour des puissances de 500 à 50 000 kVA à 50 Hz, en fonction de la puissance nominale.

- pertes dans le cuivre, pour circulation d'huile, avec refroidissement extérieur à eau ;
- pertes dans le cuivre, avec refroidissement naturel ;
- pertes dans le fer, pour circulation d'huile avec refroidissement extérieur à eau ;
- pertes dans le fer avec refroidissement naturel.

Des recommandations analogues sont données dans un très grand nombre de manuels [2 à 7] ; celles-ci ont une très grande valeur pour un praticien, à un instant donné, mais cette valeur est nécessairement passagère, car tout changement technologique les rend caduques. Par exemple, la formule donnée ci-dessus par Dormont était relative aux anciennes tôles à grains non orientés, et à l'époque même où je l'apprenais, l'apparition des tôles à grains orientés la rendait déjà caduque. Une révolution similaire se reproduira si les matériaux amorphes se généralisent soudain.

Une autre coutume largement utilisée par les grands constructeurs, encore jusqu'à nos jours, est de se référer constamment au fichier des réalisations récentes de l'entreprise. Le projeteur (directement ou en utilisant un logiciel) examine les réalisations les plus proches de ce qu'il veut faire et essaie de les adapter à son nouveau besoin. Le renouvellement rapide des ingénieurs des bureaux d'études rend ces pratiques

dangereuses : personne ne sachant plus ce qu'il y a dans les programmes, les chances de sortir, sans s'en apercevoir des limites de validité des formules utilisées s'accroît de jour en jour. Nous ne sommes plus à l'époque où un ingénieur pouvait passer plus de trente ans de carrière au même endroit !

C'est pourquoi, je me suis interrogé dès le début des années 70, sur l'utilité de donner aux étudiants, une méthode assez évolutive de raisonnement. Il fallait pour cela essayer de découvrir, sous les formules empiriques émaillant la littérature, la sagesse qui, je n'en doutais pas, y était cachée.

## 2 Capitalisation des pertes.

Une telle méthode avait été développée depuis longtemps et était courante, après la dernière guerre, chez les grands producteurs d'énergie de l'époque. Elle était basée sur l'idée qu'une diminution des pertes dans une machine coûte cher mais qu'elle permet d'économiser une certaine dépense d'énergie au cours des années à venir.

Dans l'annexe A, on montre comment définir une équivalence entre une dépense future décidée aujourd'hui et une dépense immédiate. Ainsi, si la durée de vie d'un transformateur est de  $n$  années, s'il doit être maintenu sous tension 24 h/ 24 h (soit 8760 h par an) et si le prix d'un kilowatt-heure est  $p$ , un kilowatt de pertes fer est équivalent à une dépense immédiate égale à :

$$P' = 8760 * S(i,n) * p$$

Ce prix correspond à " celui d'un kW de pertes fer en régime nominal ".

Si le transformateur doit fonctionner en permanence en régime nominal, un kilowatt de pertes Joule aura naturellement le même prix. C'est le cas de certains transformateurs dans l'industrie chimique. Mais la charge de la plupart des transformateurs varie considérablement, tout au long de l'année, en fonction du jour, de l'heure et du mois. On pourra donc définir le prix

$$P'' = K_{ch} * 8760 * S(I,n) * p$$

d'un kilowatt de pertes nominales par effet Joule,  $K_{ch}$  étant un facteur de charge.

Dans ces conditions, le meilleur transformateur, du point de vue des investissements, est celui dont le prix total d'achat et d'exploitation  $P_t$  (somme du prix de construction  $P_0$ , augmenté de  $P' + P''$ )

$$P_t = P_0 + P' + P''$$

est minimal. Cette somme porte en anglais le nom de " total owning cost ".

Ce critère de choix du rendement d'un appareil électrique appelle de nombreuses remarques. Tout d'abord, il faut noter que  $P'$  et  $P''$  varient de façon extrêmement large, puisque ces grandeurs dépendent de la valeur du kW, lequel dépend de la tension de raccordement dans un pays donné. Si on prend le prix d'un kg de tôle magnétique comme unité de monétaire, on pourra obtenir des ordres de grandeurs tels que :

Prix du kg de fer = 1

Prix du kg de cuivre isolé = 2.7

Prix du watt de pertes dans le fer = 2

Prix du watt de pertes Joule = 0.7.

Il en résulte immédiatement que le prix de fabrication initial  $P_0$  du projet initial peut ne représenter que le tiers de  $P_t$ .

La recherche du  $P_t$  minimal conduira donc à considérer comme équivalentes une augmentation des pertes fer de 1kW ou une augmentation de deux tonnes de la masse de fer.

Il faut noter également que les éléments déterminants de  $P_0$  sont le prix du fer et aussi du cuivre. Or, le prix du cuivre fluctue très rapidement, on peut même le considérer souvent comme une grandeur spéculative. Notons enfin que l'appendice ne tient pas compte des probabilités de variations du taux d'intérêt. Le critère du prix minimum peut donc laisser une assez large place à des choix personnels. N'oublions pas aussi, qu'avant de faire un investissement, aussi judicieux soit-il, il est nécessaire de disposer d'un capital suffisant.

Bien entendu, ces considérations s'appliquent, avec quelques variantes, à n'importe quelle machine et même à un très grand nombre d'installations. Les pertes mécaniques d'un alternateur, les frais d'entretien d'un ensemble, sont des dépenses futures, capitalisables, selon la méthode de l'annexe A.

## 3 Évolution du concept.

Autant que je puisse m'en souvenir, tout ceci était fort connu au début des années 1970, lorsque je dus faire, pour la première fois, un cours de construction électrique. Cependant, je demandais à un ingénieur, fabricant de transformateurs, de m'assister pour les " bureaux d'études ". J'eus la surprise d'apprendre que cette méthode de choix d'un rendement, sans lui être inconnue, lui était tout à fait étrangère. Les clients, me dit-il, choisissaient sur catalogue, quel que fut l'emploi envisagé de l'appareil ; il ajouta « au cours des dernières années, un seul client a posé le même problème que vous, c'était un Suédois... ». Bien entendu, il était facile de voir que le catalogue reflétait essentiellement les préoccupations du seul client qui attachait une grande importance aux pertes : EdF. En d'autres termes, les chimistes eux-mêmes, achetaient des transformateurs de distribution, bien qu'ils auraient dû tenir compte, à travers le facteur de charge  $K_{ch}$ , d'un diagramme de charge tout à fait particulier. Un

spécialiste des travaux neufs, interrogé sur ce sujet, répondit « moi, je construis une usine qui marche et qui coûte le moins cher possible. Les chimistes paieront les pertes plus tard. »

Quelques temps après, au début des années 1980, j'ai eu l'occasion d'être associé à un très grand constructeur de transformateurs et j'eus la surprise de constater qu'aucun de ses clients ne fait ait d'achat sans avoir spécifié un prix des pertes.

A la même époque (début des années 80), les utilisateurs des moteurs asynchrones commencèrent à s'intéresser au coût des pertes plutôt qu'à des rendements usuels. De nombreux clients acceptèrent la proposition d'échanger des moteurs en état de fonctionnement par des machines au prix de revient assez élevé mais permettant d'importantes économies de pertes futures.

Il faut noter cependant que les clients des fabricants de machines asynchrones sont souvent des fournisseurs d'ensembles industriels et qu'ils n'ont pas tendance, ni intérêt d'ailleurs, à alourdir le prix de leur matériel.

C'est une des raisons qui poussent à imposer des rendements minimaux très élevés, comme c'est le cas des récentes dispositions prises en Amérique du Nord. Il semble cependant curieux que celles-ci se réfèrent à des niveaux de rendement, mettant ainsi sur le même pied, les pertes fer, les pertes Joule et les pertes mécaniques. Il s'agit en fait là, de décisions plutôt politiques, donnant généralement aux pertes des valeurs arbitrairement très élevées.

Beaucoup plus récemment, vient de se tenir au cours d'un congrès de l'IEEE, une discussion sur les tendances futures du rendement des transformateurs. Le compte-rendu rend le lecteur fort perplexé. Certains auteurs prêchent avec vigueur l'utilisation des pertes capitalisées, alors que d'autres font des remarques plus réalistes. Ceux-ci constatent que "durant la transition entre la régulation et la dérégulation, beaucoup de producteurs d'énergie sont restés sur l'expectative, ce qui les a conduits à ne pas apprécier les pertes lors de l'achat ou de la définition d'un transformateur." Ils ajoutent encore « c'est la tendance actuelle ».[8]

#### IV Conclusion.

Le but de cet article était de rappeler un certain nombre de principes sur un ton suffisamment familier pour permettre la réfutation des idées qui sont exposées. La lecture du compte-rendu cité en référence, montrera au lecteur que la question est loin d'être close.

#### V Bibliographie.

- [1] M. LIWSCHITZ, L. MARET calcul des machines électriques. Dunod Paris (1967).
- [2] J. CORRALES MARTIN Calculo industrial de maquinas electricas . Danae Barcelonne (1968).
- [3] R. H. ENGELMAN, W. H. MIDDENDORF Handbook of electric motors Marcel Dekker, New York (1995).
- [4] E. LEVY Polyphase motors, Wiley, New York (1984).
- [5] S. LOUTZKY Calcul pratique des alternateurs et des moteurs asynchrones. Eyrolles Paris 1969.
- [6] W. T. MCLYMANT Transformer and inductor design handbook Marcel Dekker, New York (1988).
- [7] W. SCHUISKY, Berechnung elektrischer maschinen. Springerverlag Berlin (1960).
- [8] B. W. KENNEDY Overview of future trends in energy-efficient transformers. IEEE Power Engineering Review, juillet 1998 pp.6-7.

#### VI Annexe: définition de la capitalisation des pertes.

Supposons que nous envisagions une dépense régulière de 1 franc par an au cours des  $n$  prochaines années. Si le taux de retour des investissements est égal à  $100*i$  (en "pour cent"), ou à  $i$  (en nombre ordinaire), ces dépenses futures pourront être couvertes dès aujourd'hui, par un investissement  $S(i,n)$ , égal à:

$$S(i, n) = \frac{1}{1+i} + \frac{1}{(1+i)^2} + \dots + \frac{1}{(1+i)^n}$$
$$S(i, n) = \frac{1}{i} * \left[ 1 - \frac{1}{(1+i)^n} \right]$$

Il est donc équivalent de se résigner à faire cette dépense dans le futur ou à augmenter la masse des investissements en cours d'un montant égal. C'est pourquoi  $S(i,n)$  est appelé "prix capitalisé d'une dépense de un franc par an au cours des  $n$  années à venir".

# UTILISATION D'UN TABLEUR POUR L'ETUDE D'UN CONVERTISSEUR A POMPE DE CHARGE.

Pascal LOOS  
Lycée STANISLAS  
468, rue de Vandoeuvre  
54600 VILLERS LES NANCY

**Résumé :** Il s'agit du descriptif d'un TD au niveau Bac+1 dont le but est triple :  
-Initier les élèves à la résolution d'équations différentielles par des méthodes numériques.  
-Illustrer l'étude des circuits R-C en régimes transitoires,  
-Faire découvrir les convertisseurs à pompe de charge.

## I. ÉTUDE PRÉLIMINAIRE

Afin de décrire la méthode employée et de mettre en évidence les précautions à respecter, on commence par étudier le régime transitoire le plus simple possible : la décharge d'un condensateur à travers une résistance

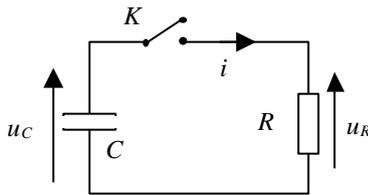


Figure 1

### I.1. Écriture des équations

- Caractéristiques des dipôles

Résistance :  $u_R = R \cdot i$

Condensateur :  $i = -C \cdot \frac{du_C}{dt}$

- Loi des mailles

$$u_C - u_R = 0$$

D'où l'équation différentielle :

$$u_C + R \cdot C \cdot \frac{du_C}{dt} = 0$$

De cette dernière on déduit l'équation de récurrence que l'on introduira dans le tableur :

$$\Delta u_C = - \frac{u_C \cdot \Delta t}{R \cdot C} \text{ et } u_{C(n+1)} = u_{C(n)} + \mathbf{D}u_C$$

$$\Rightarrow u_{C(n+1)} = u_{C(n)} \cdot \left(1 - \frac{\Delta t}{RC}\right) = u_{C(n)} \cdot \left(1 - \frac{\Delta t}{\tau}\right)$$

on comparera les valeurs obtenues par l'application de proche en proche de cette formule à celles obtenues par la solution analytique de l'équation différentielle :

$$u_C = U_{C0} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

### I.2 Implantation des formules dans le tableur

Dans les deux premières colonnes, on fixe les valeurs des paramètres nécessaires au traitement :

- Valeur initiale de  $u_C = U_{C0}$
- Valeur de la constante de temps  $\tau$
- Valeur du pas de calcul  $\Delta t$  fixé par  $k$  tel que :

$$\tau = k \cdot \mathbf{D}t$$

Un exemple est fourni ci-après :

	A	B
1	U <sub>C0</sub>	10
2	Tau	0,0001
3	k	10
4	delta t	=B2/B3

Remarque : dans la case B4 on a implanté la formule :

$$\Delta t = \tau / k$$

Dans les trois colonnes suivantes, on implante les formules permettant d'incrémenter le temps, de calculer la valeur de  $u_C$  estimée à l'aide de la formule de récurrence, ainsi que la valeur de  $u_C$  calculée à l'aide de l'équation différentielle.

- La première ligne est utilisée pour nommer les variables
- La ligne suivante permet d'initialiser les valeurs : on pose  $t = 0$ ,  $u_C = U_{C0} = 10$  V,
- La ligne suivante sert à écrire les équations :

	C	D	E
1	t	uc approchée	uc exacte
2		0 =B\$1	=B\$1
3	=C2+B\$4	=D2*(1-1/B\$3)	=B\$1*exp(-C3/B\$2)

Les équations sont :

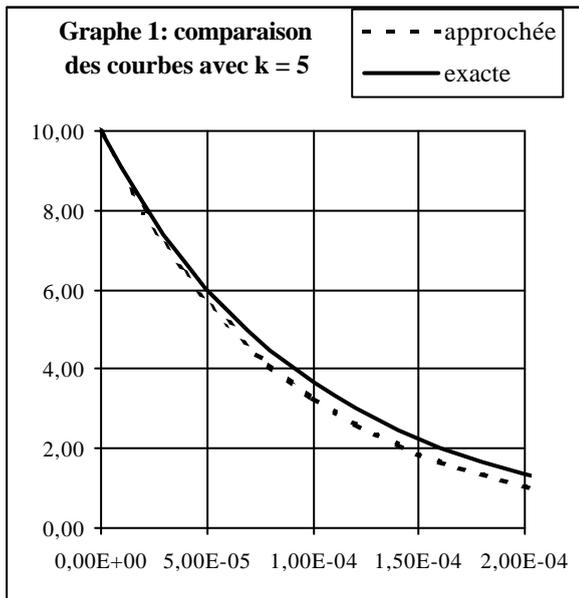
- Case C3 :  $=C2 + B\$4$  ; soit :  $t_{n+1} = t_n + Dt$
- Case D3 :  $=D2*(1-1/B\$3)$  ; soit  $u_{C(n+1)} = u_{C(n)} \cdot \left(1 - \frac{1}{k}\right)$   
 $\Leftrightarrow u_{C(n+1)} = u_{C(n)} \cdot \left(1 - \frac{\Delta t}{t}\right)$
- Case E3 :  $=B\$1 * \exp(-C3/B\$2)$  :  $u_C = U_{C0} \cdot \exp\left(-\frac{t}{t}\right)$

Ces équations sont recopiées vers le bas sur les 200 lignes suivantes.

**Remarque** : on peut ajouter en colonne F une formule calculant l'erreur relative en % entre la valeur approchée et la valeur exacte : en

$$F2 : =100*(E2- D2)/E2$$

Le graphe 1 représente les courbes obtenues pour  $k = 5$ . Nous avons choisi une faible valeur de  $k$  afin que les courbes soient nettement dissociées.



## I.2. Exploitation des résultats

Le tableur permet de vérifier que seul le paramètre  $k$  influe sur l'erreur relative.

On constate que pour  $k > 25$  les deux courbes sont quasiment superposées, l'erreur relative après une durée égale à  $t$  devient inférieure à 2 %.

## II. DÉVOLTEUR À POMPE DE CHARGE

### II.1. Principes généraux

Les convertisseurs à pompes de charges [1] sont des systèmes réalisant des changements de connexion entre des condensateurs afin d'obtenir en sortie une tension différente de celle de l'entrée. La figure 2 représente le principe d'un montage qui, en basculant des états 1 à 2 et réciproquement, avec un rapport cyclique de 0,5,

permet de diviser la tension  $V_E$  par 2. Si on intervertit  $V_S$  et  $V_E$ , on obtient un doubleur de tension.

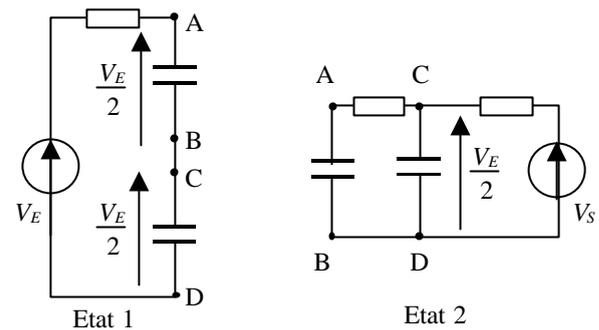


Figure 2

## II.2. Exemple de la famille 6050x de Texas Instrument

Les références 6050x [2] concernent des circuits associant un régulateur linéaire et un convertisseur abaisseur à pompe de charge. Ils ont pour fonction de délivrer une tension de sortie régulée, fixée à 3,3 V ou 1,8 V ou 1,5 V ou encore ajustable, alors que la tension d'entrée est variable et comprise entre 1,8 V et 6,5 V. la figure 3 représente la logique du fonctionnement correspondant à une tension de sortie de 1,8 V.

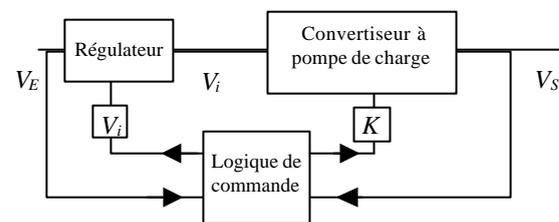


Figure 3

La logique de commande opérant selon la valeur de  $V_E$  conformément au tableau ci-dessous :

Valeur de $V_E$	Valeur de $V_i$	Valeur de $K$
de 6,5 V à 5,4 V	5,4 V	1/3
de 5,4 V à 3,6 V	3,6 V	1/2
de 3,6 V à 2,7 V	2,7 V	2/3
de 2,7 V à 1,8 V	1,8 V	1

Le rendement de ce type de convertisseur est représenté sur la courbe ci-après.

Les différentes valeurs de  $K$  peuvent être obtenues à l'aide d'une structure à 9 interrupteurs (transistors MOS) dont le schéma de principe est représenté à la figure 4. Les condensateurs  $C$  et le condensateur de sortie  $C_S$  sont ajoutés au circuit par l'utilisateur. Les valeurs de capacité préconisées dépendent du courant de sortie.

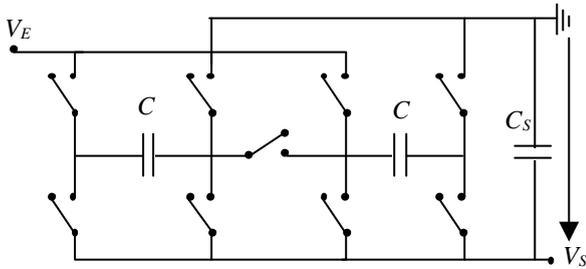
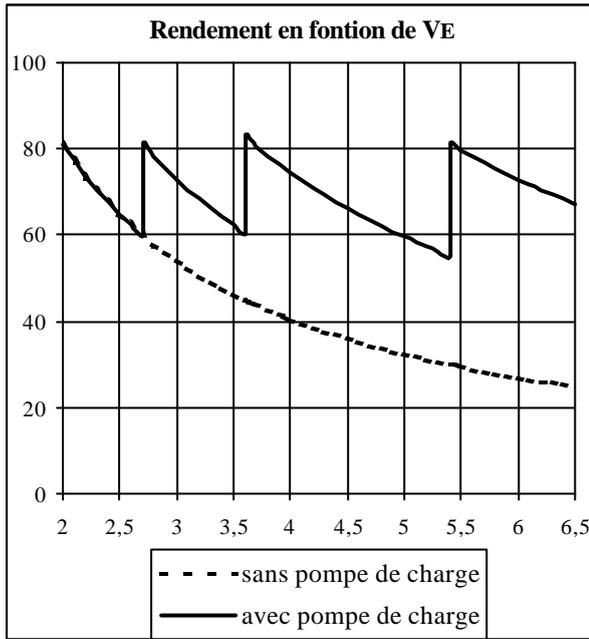


Figure 4

### II.3. Détail du mode 1/2

Nous choisissons d'étudier plus en détail le fonctionnement correspondant à  $K = 0,5$ .

Les deux séquences de fonctionnement sont notées séquence A et B et sont représentées à la figure 5. La résistance  $r$  correspond à la résistance d'un transistor MOS à l'état passant (environ  $0,8 \Omega$  pour ces circuits).

Les montages correspondant aux deux séquences peuvent être simplifiés, les schémas équivalents sont représentés à la figure 6.

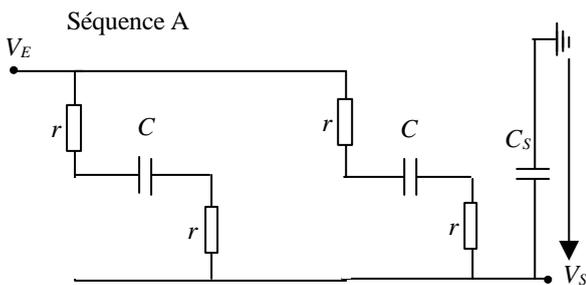


Figure 5a

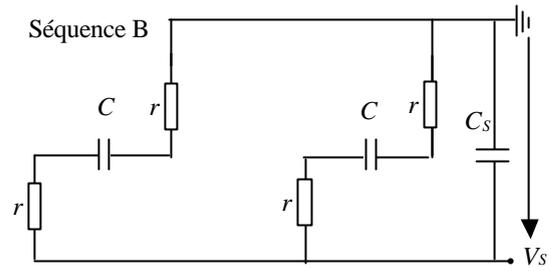


Figure 5b

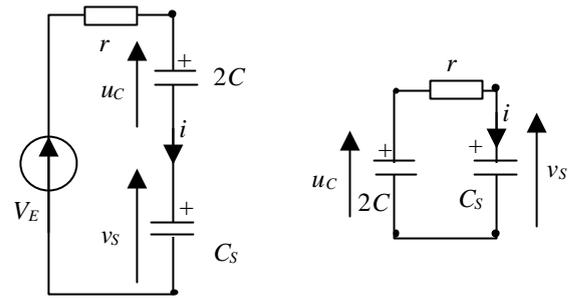


Figure 6

## III. SIMULATION DU FONCTIONNEMENT À VIDE

### III.1. Etude théorique

#### III.1.a. Séquence A

L'étude de la séquence A de la figure 6 conduit à

$$u_R = R \cdot i$$

$$i = C_S \cdot \frac{dv_S}{dt} = 2C \cdot \frac{du_C}{dt}$$

$$v_S + u_C + u_R = V_E$$

d'où les équations différentielles :

$$v_S + u_C + 2rC \frac{du_C}{dt} = V_E$$

$$v_S + u_C + r \cdot C_S \frac{dv_S}{dt} = V_E$$

On en déduit les équations de récurrence :

$$\Delta u_{C(n)} = \frac{(V_E - v_{S(n)} - u_{C(n)}) \Delta t}{2rC} \text{ et } u_{C(n+1)} = u_{C(n)} + \Delta u_{C(n)}$$

$$\Delta v_{S(n)} = \frac{(V_E - v_{S(n)} - u_{C(n)}) \Delta t}{rC_S} \text{ et } v_{S(n+1)} = v_{S(n)} + \Delta v_{S(n)}$$

#### III.1.b. Séquence B

L'étude de la séquence B de la figure 6 conduit à

$$u_R = R \cdot i$$

$$i = C_S \cdot \frac{dv_S}{dt} = -2C \cdot \frac{du_C}{dt}$$

$$v_S + u_R = u_C$$

d'où l'on tire les équations différentielles :

$$v_s - u_c - 2r \cdot C \frac{du_c}{dt} = 0$$

$$v_s + r \cdot C_s \frac{dv_s}{dt} - u_c = 0$$

On en déduit les équations de récurrence :

$$\Delta u_{C(n)} = \frac{(v_{S(n)} - u_{C(n)}) \Delta t}{2r \cdot C} \text{ et } u_{C(n+1)} = u_{C(n)} + \Delta u_{C(n)}$$

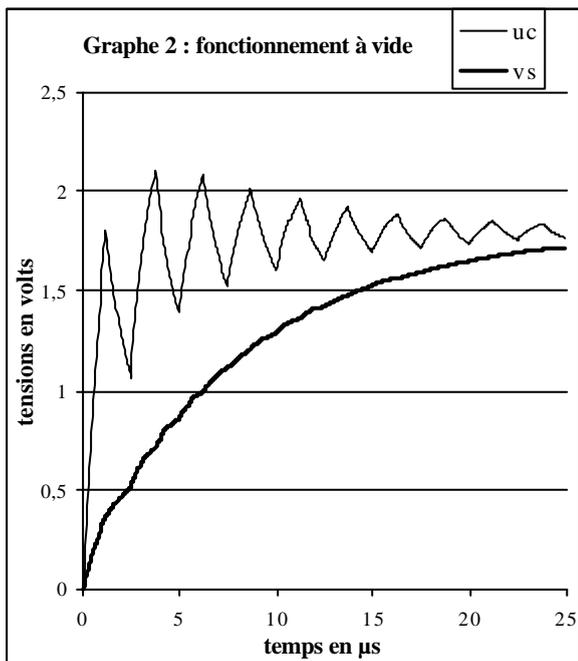
$$\Delta v_{S(n)} = \frac{(u_{C(n)} - v_{S(n)}) \Delta t}{r \cdot C_s} \text{ et } v_{S(n+1)} = v_{S(n)} + \Delta v_{S(n)}$$

### III.2. Solution par tableur

La tension d'entrée est fixée à 3,6 V. Les valeurs des capacités seront celles préconisées dans la notice du constructeur [2] pour un courant de sortie égal à 150 mA soit  $C = 1 \mu\text{F}$  et  $C_s = 10 \mu\text{F}$ . La constante de temps des circuits est égale à :

$$r \frac{2C \cdot C_s}{2C + C_s}, \text{ soit } 1,33 \mu\text{s}$$

Le composant étant doté d'une horloge de fréquence 800 KHz, la durée de chaque séquence de fonctionnement vaut  $1,25 \mu\text{s}$ .



Le pas de calcul  $\Delta t$  est fixé à  $0,05 \mu\text{s}$  soit 25 calculs par séquence. Les premières formules de récurrence sont implantées sur les 25 premières lignes, les secondes sont implantées sur les 25 lignes suivantes.

Le bloc de 50 lignes ainsi constitué est copié, puis collé à la suite 9 fois, ce qui permet d'obtenir la courbe du fonctionnement à vide de 0 à  $25 \mu\text{s}$ . Le fichier peut être téléchargé sur [www.lesite3EI.com](http://www.lesite3EI.com).

La courbe obtenue (graphe 2) correspond au régime transitoire de démarrage pour un fonctionnement à

vide. On constate que les tensions  $v_s$  et  $u_c$  convergent vers  $0,5 \cdot V_E$ .

L'intérêt d'une résolution numérique c'est qu'il suffit de connaître les équations différentielles pour obtenir la courbe, alors qu'une résolution analytique est possible mais longue et fastidieuse.

## IV. SIMULATION DU FONCTIONNEMENT EN CHARGE

### IV.1. Etude théorique

#### IV.1.a. Etude de la séquence A

La fig. 7 représente le schéma équivalent correspondant à la séquence A lors d'un fonctionnement en charge.

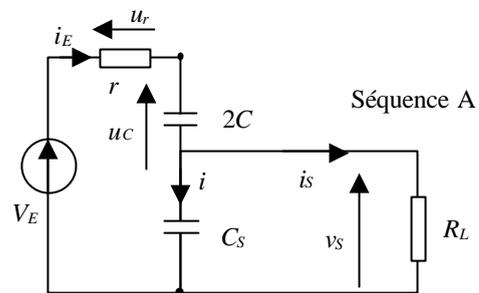


Figure 7

$$u_r = r \cdot i_E \text{ et } v_s = R_L \cdot i_s$$

$$i_E = 2C \cdot \frac{du_c}{dt} \text{ et } i = C_s \cdot \frac{dv_s}{dt}$$

$$v_s + u_c + u_r = V_E \text{ et } i + i_s = i_E$$

On détermine  $du_c$  à l'aide de

$$v_s + u_c + 2r \cdot C \frac{du_c}{dt} = V_E :$$

$$\Delta u_{C(n)} = \frac{(V_E - v_{S(n)} - u_{C(n)}) \Delta t}{2r \cdot C}$$

$$\text{et } u_{C(n+1)} = u_{C(n)} + \Delta u_{C(n)}$$

La formule de récurrence est identique à celle du fonctionnement à vide.

On détermine l'expression de  $dv_s$  à l'aide de :

$$v_s + u_c + r \cdot i + r \cdot i_s = V_E :$$

$$v_s + u_c + r \cdot C_s \frac{dv_s}{dt} + r \cdot \frac{v_s}{R_L} = V_E$$

$$\Delta v_{S(n)} = \frac{(V_E - v_{S(n)} - u_{C(n)}) \Delta t}{r \cdot C_s} - \frac{v_s}{R_L \cdot C_s}$$

$$\text{et } v_{S(n+1)} = v_{S(n)} + \Delta v_{S(n)}$$

La formule de récurrence est identique à celle du fonctionnement à vide quand  $R_L$  tend vers l'infini.

#### IV.1.b. Etude de la séquence B

L'étude de la figure 8 conduit à :

$$u_r = r \cdot i_c \text{ et } v_s = R_L \cdot i_s$$

$$i_c = -2C \cdot \frac{du_C}{dt} \text{ et } i = C_S \cdot \frac{dv_S}{dt}$$

$$u_C - v_S - u_r = 0 \text{ et } i + i_s = i_c$$

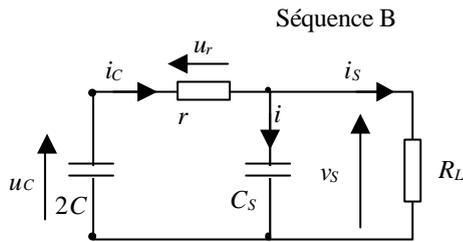


Figure 8

On détermine  $du_C$  à l'aide de l'équation différentielle :

$$v_S - u_C - 2r \cdot C \frac{du_C}{dt} = 0$$

On en déduit (comme pour le fonctionnement à vide) :

$$\Delta u_{C(n)} = \frac{(v_{S(n)} - u_{C(n)}) \Delta t}{2r \cdot C} \text{ et } u_{C(n+1)} = u_{C(n)} + \Delta u_{C(n)}$$

On détermine  $dv_S$  à l'aide de

$$v_S + r \cdot i + r \cdot i_s = u_C$$

$$v_S + r \cdot C_S \frac{dv_S}{dt} + r \cdot \frac{v_S}{R_L} = u_C$$

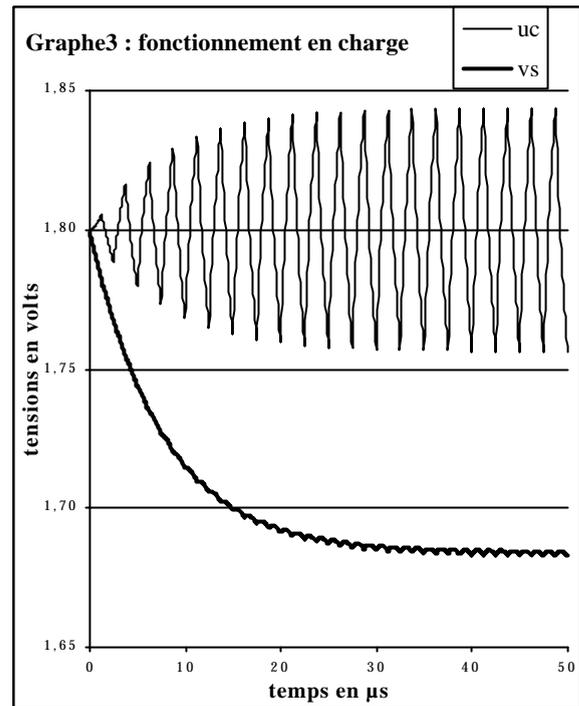
$$\Delta v_{S(n)} = \left[ u_{C(n)} - v_{S(n)} \left( 1 + \frac{r}{R_L} \right) \right] \Delta t$$

$$\text{et } v_{S(n+1)} = v_{S(n)} + \Delta v_{S(n)}$$

#### IV.2. Tracé des courbes

Les valeurs utilisées pour l'étude à vide sont conservées. A l'instant initial on suppose les condensateurs chargés, la tension à leurs bornes vaut  $0,5 V_E$  soit 1,8 V. La résistance de charge  $R_L$  vaut  $12 \Omega$  elle absorbe donc un courant de 150 mA sous 1,8 V. On constate (graphe 3) que la tension de sortie diminue puis se stabilise (sa valeur moyenne se stabilise à 1,684 V). La tension aux bornes des deux condensateurs C fluctue autour de 1,8 V.

Le tableur permet de faire varier les différents paramètres et de vérifier "en direct" l'influence de ces derniers sur le transitoire de mise en service et sur le fonctionnement en régime permanent. **Le fichier peut être téléchargé sur [www.lesite3EI.com](http://www.lesite3EI.com).**



#### IV.3. Rendement

Une étude du rendement en régime établi peut être faite simplement sur une période de fonctionnement en régime établi :

$$\text{Puissance fournie par la source : } \frac{1}{50} \sum_{n=k}^{n=k+50} (V_E \cdot i_{E(n)})$$

$$\text{Puissance reçue par la charge : } \frac{1}{50} \sum_{n=k}^{n=k+50} \left( \frac{v_{S(n)}^2}{R_L} \right)$$

les calculs effectués avec le tableur nous donnent :

$$P_E = 252 \text{ mW} ; P_S = 236 \text{ mW} ; \eta = 93.7 \%$$

#### BIBLIOGRAPHIE

- [1]: **F. FOREST**: *Electronique de puissance basse tension, haut rendement pour les applications portables* : Revue 3EI, n°30 septembre 2002, pp 7 – 16  
 [2]: **TEXAS INSTRUMENTS**: TPS 605000, TPS60501, TPS60502, TPS60503, *High efficiency, 250 mA step-down charge pump*. : [www.ti.com](http://www.ti.com).

#### IMPORTANT :

A la suite de l'accord cadre passé le 17 septembre 2002 avec le ministère de la Jeunesse, de l'Education nationale et de la Recherche, la société *Sun Microsystems* met à la disposition des écoles, collèges, lycées (...) la suite bureautique Star Office 6.0 pour tous types d'usages. Cette suite contient un tableur permettant de réaliser ces simulations. Plus de renseignements sur :

<http://fr.sun.com/produits-solutions/logiciels/staroffice/>

## PETITE HISTOIRE DES TRANSPORTS URBAINS

Jacques ROSSETTI (A)  
Musée des Transports Urbains  
163 Boulevard du Général de GAULLE  
92 700 COLOMBES

Jean BONAL (B)  
ECRIN, Président du club Électronique de Puissance  
Professeur associé au CNAM, Paris

*Les photographies ont été fournies par le Musée des Transports Urbains.*

### A - PETIT HISTORIQUE

#### AVANT PROPOS

La plupart des renseignements contenus dans cet article ont été tirés des remarquables ouvrages publiés par M. Jean Robert, Docteur ès Sciences, " *Les tramways parisiens* ", " *Notre métro* ", " *L'histoire des transports publics dans les villes de France* ", aujourd'hui, pour la plupart, épuisés.

En outre, nous nous sommes attardés particulièrement sur Paris et sa banlieue car, sauf exception, c'est Paris qui a développé la première, les innovations qui ont jalonné l'histoire des transports urbains. Nous insistons aussi sur la période qui a précédé la seconde guerre mondiale, moins connue que la période contemporaine, où nous assistons à une certaine stabilité dans l'évolution des techniques ou de l'exploitation.

La toute première manifestation d'un transport public est apparue, il y a près de quatre siècles (1617) pendant le règne de Louis XIII, sous la forme de chaises à porteurs dont le personnel et le matériel étaient présents en différents points de Paris, un peu à la manière des stations de taxis actuelles. Puis des carrosses de louage furent créés en 1623.

Mais il ne s'agissait alors que de transports de particuliers, et le véritable début d'un transport public en commun est dû au philosophe Blaise Pascal avec les carrosses à " *cinq sols* ". Sa requête auprès du roi (1661) aboutit à l'autorisation donnée en janvier 1662 de mettre en service cinq " *routes* " (lignes), quatre rayonnant dans le Paris de Louis XIV (tracé des Grands Boulevards actuels), plus une ligne circulaire. Le succès fut au rendez-vous. Toutefois, dès février 1662, les voitures furent interdites aux soldats, laquais et autres gens de livrée. L'augmentation à six sols et sans doute des voitures mal adaptées aux rues étroites et encombrées du Paris d'alors firent que l'entreprise périclita pour disparaître vers 1677. Mais cette première tentative avait eu le mérite d'établir les règles du transport en commun encore valables au XXI<sup>e</sup> siècle à savoir, des départs à heures fixes, un tarif publié (cinq sols), un itinéraire déterminé, notions novatrices pour l'époque, trop sans doute.

Après cet échec, seuls subsisteront, pendant un siècle et demi, des carrosses de louage et, à partir de la

Révolution, des petites voitures desservant la banlieue mais sans horaires, ni tarifs publiés.

La relance n'interviendra qu'en 1825, à Nantes.

Un ancien colonel d'Empire en disgrâce, Stanislas Baudry, acheta en 1823 une minoterie à vapeur dans un faubourg de Nantes et l'importante quantité d'eau chaude inutilisée lui donna l'idée de créer un établissement de bains. Éloigné du centre ville, il établit un service de voiture pour desservir celui-ci. Si la ligne d'omnibus remporta un franc succès, les bains beaucoup moins ! Aussi, en bon gestionnaire, il ferme les bains et procède à l'extension des omnibus. Mais déjà la capitale dominait le monde économique français et Baudry n'eut de cesse d'obtenir l'autorisation d'y établir un réseau d'omnibus. Ses démarches aboutirent en janvier 1828 et la Préfecture lui accorda le droit de créer dix lignes desservies par cent voitures, dont les premières roulèrent dès avril 1828 au tarif de 25 centimes perçus par un receveur. Ces petites voitures offraient quatorze places. Nous avons changé d'échelle et Paris entre-temps s'était agrandi jusqu'à l'enceinte des Fermiers Généraux (boulevards dits extérieurs actuels, lignes 2 et 6 du métro). Le transport en commun sera, cette fois, établi durablement.



*Photographie 1 : Omnibus de l'entreprise "les tricycles" (1830)*

Le succès de cette première initiative entraîna une vive concurrence, les entreprises se multipliant d'une façon anarchique sur les itinéraires les plus rentables. Vers 1836, on dénombrait seize compagnies exploitant trente-cinq lignes. ( *photographie 1* )

Cette situation durera jusqu'en 1855, à la veille de la première exposition internationale où, sous l'impulsion d'Haussmann, les dix compagnies subsistantes furent

invitées fermement à fusionner sous le nom de Compagnie Générale des Omnibus (CGO), (*photographie 2*) véritable ancêtre de la RATP puisqu'elle obtiendra le monopole des transports dans Paris intra-muros, monopole qui donnera lieu à de nombreux conflits quand des compagnies privées furent autorisées, après la guerre de 1870, à desservir la banlieue, mais ayant leurs terminus dans Paris. Paris qui avait alors réalisé sa dernière extension en 1860 dans la limite du boulevard périphérique actuel.



*Photographie 2 : Paris place de la Bourse, les omnibus CGO*

Si les premières voitures étaient des voitures légères, les premiers omnibus à impériale apparurent en 1853, presque en même temps que le premier tramway dit chemin de fer américain, établi au départ de la Concorde vers la barrière de Passy en suivant la Seine.

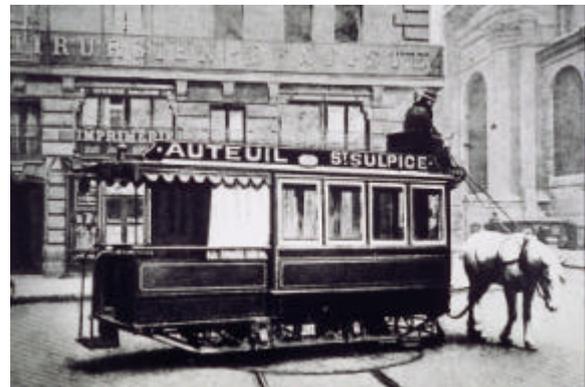
C'est aux Etats-Unis qu'apparurent les premiers tramways (1832 à New-York), mais la voie posée sommairement, aux rails saillants, causait de nombreux accidents. L'idée fut donc abandonnée pour vingt ans et reprise par un Français, Alphonse Loubat, qui obtint l'autorisation, en 1853, d'installer à New-York de nouvelles lignes équipées d'un rail posé sur longrines, pourvu d'une gorge et ne faisant plus saillie sur la chaussée. Loubat revient en France et sollicite l'autorisation d'installer une ligne traversant Paris de Sèvres à Vincennes, mais la voie ne sera jamais posée au-delà de la Concorde, tout au moins jusqu'à la généralisation des tramways longtemps après, les pouvoirs publics s'y opposant. Les petites voitures d'origine furent remplacées rapidement par la CGO, qui venait d'obtenir le monopole des transports dans Paris, par de lourdes voitures à impériale pouvant transporter quarante, puis cinquante-deux voyageurs. Ce timide essai tenté sur une ligne sans grand trafic, restera unique ou presque (ligne de Port-Marly) pendant vingt ans.

Entre-temps Paris s'était agrandi dans ses limites actuelles et de grandes artères avaient été créées par Haussmann. Les séquelles financières de la guerre de 1870 effacées, un décret du 9 août 1873 concédait au département de la Seine un réseau de tramways de dix lignes en banlieue, plus une ligne circulaire dans Paris (ligne des boulevards dits "*extérieurs*"). Deux mois

auparavant la ligne Sèvres-Louvre-Vincennes, enfin terminée, était inaugurée le 15 juin 1873. La première ligne de la nouvelle concession, Étoile-La Villette fut ouverte le 18 juin 1875. Les dix lignes furent partagées entre deux nouvelles compagnies, les Tramways Nord et les Tramways Sud.

Les villes de province suivirent l'exemple de Paris avec quelques années de retard. Dès les années 1830 pour Lyon et Le Havre, après 1850 pour les autres. Ce décalage disparaîtra après 1870 avec le début, puis le développement des lignes de tramways puisque tous les grands réseaux se constituèrent entre 1874 et 1880. Plus tard, les villes de province précédèrent parfois Paris pour les innovations techniques avec, par exemple, Nantes et la traction par air comprimé, et Clermont-Ferrand avec la première prise de courant aérienne (navette dans un tube creux).

À Paris, la création des deux compagnies de tramways battait en brèche le monopole de la CGO dans Paris, malgré les redevances que celles-ci devaient verser à celle-là pour l'utilisation de ses voies afin de desservir les terminus situés intra-muros. Hors, les finances de ces deux nouvelles sociétés n'étaient pas pour autant très brillantes et, finalement menacées de faillite, furent remplacées par deux autres sociétés. De nombreuses autres compagnies verront le jour entre 1890 et 1900 à l'approche de l'exposition, mais certaines ne pourront mettre leurs lignes en service qu'après sa fermeture. De multiples remaniements de lignes, de fusions alterneront jusqu'à la guerre de 1914 et se termineront, en 1921, par le monopole de la STCRP (Société des transports en commun de la Région Parisienne) sur Paris et sa banlieue.



*Photographie 3 : Tramway à un seul cheval, sur plaque tournante.*

Pendant toute la période 1880-1900, le souci constant de toutes les compagnies sera de supprimer, le plus vite possible, la traction hippomobile, (*photographie 3*) très onéreuse. En 1900, la seule CGO et ses nombreuses lignes d'omnibus de Paris conservera une cavalerie importante (jusqu'à 16 à 17 000 chevaux!). On verra alors éclore un foisonnement incroyable d'idées. Petites machines à vapeur avec foyer, puis sans foyer avec postes de chargement de vapeur, air comprimé, le système sans doute le plus fiable, quoique limité dans ses possibilités, automotrices à vapeur Serpollet, puis

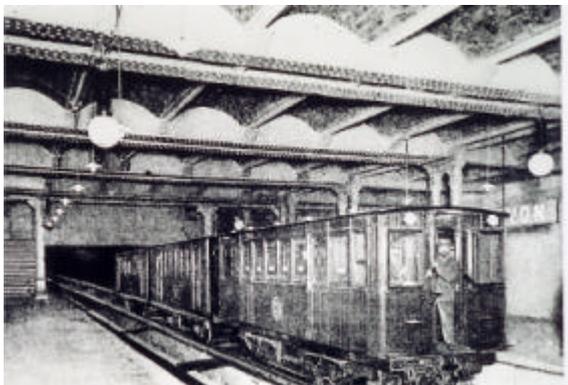
Purrey ; (*photographie 10*) enfin la traction électrique d'abord par accumulateurs, ensuite par plots. Mais, dès avant 1900, la cause était entendue avec la traction électrique par fil aérien et trolley à roulette. Ce n'est que contraintes et forcées par la ville de Paris que les compagnies adopteront, pour des raisons esthétiques, le caniveau axial ou latéral pour la prise de courant dans le centre de Paris.



**Photographie 4 :** CGO, motrice Fives-Lille, avec remorque, à impériale

Il faudra cependant attendre la veille de la guerre de 1914 pour voir disparaître la traction chevaline (1913) et l'électrification totale des lignes à traction mécanique. C'est bien entendu l'omnibus automobile qui aura raison des chevaux à partir de 1906 (*photographie 4*); mais, huit ans plus tard, la totalité du parc (environ 900 véhicules) sera réquisitionné par l'armée et Paris ne reverra circuler quelques rares autobus qu'à partir de 1917. Heureusement, auparavant, était apparu en 1900 un redoutable concurrent pour toutes les compagnies de tramways, le Chemin de Fer Métropolitain.

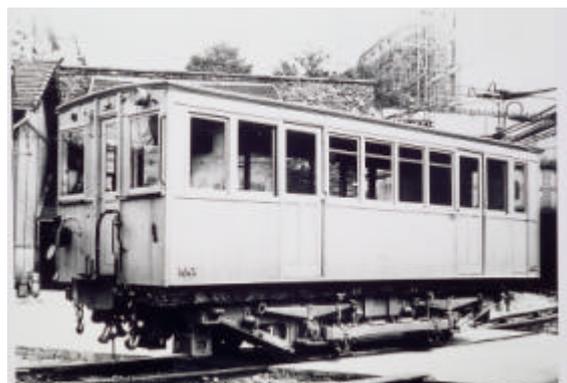
Si les multiples créations de lignes de tramways suscitées par l'exposition de 1900 ne sont pas restées dans les mémoires, par contre, l'ouverture le 19 juillet 1900, quoique privée d'inauguration officielle, de la première ligne de métro ne passa pas inaperçue et connut un succès immédiat malgré quelques critiques.



**Photographie 5 :** Métro 1900, rame de trois voitures, gare de Lyon.

En effet, après bien des controverses entre l'Etat, les grandes compagnies de Chemins de Fer et la Ville de Paris, celle-ci avait obtenu gain de cause avec la loi du 30 mars 1898 et la concession d'un chemin de fer municipal de six lignes avec prise de courant (600 V comme les tramways) par rail latéral. Et pour être certaine d'être maîtresse chez elle la Ville de Paris fit adopter un gabarit de 2,40 m empêchant toute pénétration du matériel des grandes compagnies de chemin de fer.

La première ligne (ligne 1 actuelle, limitée à Porte de Vincennes-Maillot) (*photographie 5*) fut achevée en vingt mois (novembre 1898 - juillet 1900) et le premier réseau de six lignes en 1909, mais dès avant cette date un second réseau était en travaux (lignes 7 et 8) et terminé avant 1914. Pour susciter une certaine concurrence à la CMP (Compagnie du Métropolitain de Paris), une deuxième société avait obtenu une concession fin 1901, le Chemin de fer Électrique Souterrain du Nord-Sud, représentée par les lignes 12 et la partie nord de la 13, la partie sud étant achevée par la CMP. À la veille de la guerre de 1914, 87 kilomètres de lignes étaient achevés.



**Photographie 6 :** motrice MM3 à deux portes

Le bouleversement apporté par la guerre de 1914-1918 verra — comme mentionné plus haut — la fusion de toutes les compagnies de tramways sous le nom de STCRP qui rénova le matériel ancien et fit construire 100, puis 475 motrices modernes, ainsi que 395 remorques (dits attelages à la STCRP) pour former des trains réversibles.

Comme le matériel, les voies qui avaient souffert du manque d'entretien furent reconstruites solidement à grands frais durant les années vingt, à l'aide, entre autres, d'emprunts faits aux USA et dont les contribuables parisiens régleront les annuités jusqu'en 1955, dix-huit ans après la suppression de la dernière ligne de tramways, le 15 mars 1937, juste avant l'ouverture de l'Exposition universelle.

Donc en 1906 apparaissait l'engin qui devait devenir, trente ans plus tard, le fossoyeur du tramway, l'autobus, dit alors omnibus automobile. Il allait d'abord avoir raison des omnibus à chevaux encore nombreux à l'époque. Cent cinquante voitures furent construites, après concours, par Brillié-Schneider

( *photographie 7* ) avec réutilisation des caisses d'omnibus hippomobiles réformés.



*Photographie 7 : Autobus Brillé-Schneider P2, ligne AM, 1906*

À partir de 1911, apparaît un nouveau type d'autobus reprenant les principes des célèbres autobus à plate-forme que les anciens parisiens ont connu, donc sans impériale. Près de mille voitures nouvelles furent construites jusqu'en 1914, mettant définitivement fin à la traction chevaline en janvier 1913 pour les omnibus et avril 1913 pour les tramways. ( *photographie 8* )

Toutes ces voitures seront réquisitionnées en 1914 et beaucoup se retrouveront sur la Voie sacrée ravitaillant Verdun.



*Photographie 8 : Autobus type P3, ligne M*

Les Parisiens ne verront réapparaître timidement l'autobus qu'en 1917 avec le type H de Schneider qui constituera la totalité du parc durant les années vingt et qui ne s'éteindra qu'en 1938. Les premières voitures surbaissées (une seule marche) et montées sur pneumatiques sortiront en 1927, préluant le quasi-monopole de Renault jusqu'en 1938. 3 800 autobus sont en service en 1939 et, les mêmes causes produisant les mêmes effets, une grosse partie de ce parc sera réquisitionnée par l'armée. Peu de Parisiens se souviendront que le réseau de tramways avait été massacré deux ans auparavant !

Si le réseau d'autobus avait proliféré au point de faire disparaître le tramway entre les deux guerres, le métro géré par la CMP (le Nord-Sud est absorbé en 1930) n'était pas resté inactif et c'est avec 150 km de lignes (87 en 1913), plus la ligne dite de Sceaux (partie sud de

la ligne RER B actuelle première ébauche du futur RER) qu'elle abordera la deuxième guerre mondiale. Ce réseau, grâce à la qualité de son matériel et de ses équipements, supportera avec vaillance un trafic colossal entre 1940 et 1950, relayé en banlieue par seulement 500 autobus jusqu'à la Libération (en fait 1945) fonctionnant, tant bien que mal, avec 300 voitures au gaz de ville non comprimé et 200 avec gazogène à charbon de bois, et une perte de puissance estimée à 30 % pour ces derniers, sans oublier les sujétions d'entretien.

Durant toutes ces périodes, les réseaux de province avaient suivi la même évolution technique (sauf le métro qui n'apparaîtra à Lyon et Marseille que bien après la fin de la guerre, en 1978). Traction hippomobile d'abord, omnibus ou tramway, puis des tâtonnements avec les différentes sortes de traction mécanique, enfin électrification par fil aérien des tramways et, pour les omnibus à chevaux, remplacement par des autobus. Toutefois, il faut signaler que certains réseaux de province parmi les plus importants, Lyon, Rouen, Marseille, contrairement à Paris, avaient expérimenté et mis en service le trolleybus dont les qualités (adhérence, aptitude aux accélérations, silence) feront merveille sur les lignes accidentées de ces réseaux. Heureusement, même si les tramways commençaient à se voir contester leur suprématie, les villes de province (sauf Reims en 1939) avaient conservé l'essentiel de leurs lignes de tramways, certaines lignes encore intactes ou presque étant remises en service en 1940 (Le Havre, Versailles, etc.), permettant ainsi, en l'absence de métro, d'assurer une desserte convenable, malgré des surcharges importantes.

À Paris, la guerre terminée, le réseau se reconstituera peu à peu, gaz de ville et gazogène se verront rapidement abandonnés pour revenir au bon vieux carburant ternaire (1/3 essence, 1/3 alcool, 1/3 benzol). Il faudra attendre 1950 pour voir circuler les premières voitures diesel (300 unités commandées à SOMUA) avec, grande innovation pour Paris, entrée à l'arrière, en passant devant un receveur à poste fixe, et sortie à l'avant.



*Photographie 9 : prototype de trolleybus sur châssis Renault, Type PY, début des années 30.*

À signaler que Paris, devant les nécessités de la guerre, avait enfin mis en service une ligne de trolleybus en janvier 1943. Deux autres lignes seront construites après la guerre, supprimées ensuite, ainsi que la première ligne et, en 2002, Paris n'envisage toujours pas l'exploitation de tels véhicules. (photographie 9)

Les derniers autobus parisiens à plate-forme disparaîtront en janvier 1971 sur la ligne 21 et le service à un seul agent sera généralisé en 1974.

Comme avant la seconde guerre mondiale, l'évolution des réseaux de province sera équivalente à celle de Paris (à l'exception notable du réseau RER), c'est-à-dire suppression des tramways remplacés, dans le meilleur des cas, par des trolleybus sur les plus grosses lignes. Mais ceux-ci se verront rapidement menacés et disparaîtront pour la plupart. Les grandes agglomérations seront amenées à construire des métros, sous la forme traditionnelle pour Marseille et Lyon, pour Lille, Toulouse et bientôt Rennes, sous la forme du VAL de Matra. Lyon fera figure de pionnier avec la première ligne de métro classique automatique, avec la ligne D, mise en service après bien des avatars.

Seuls trois réseaux garderont sans interruption une seule de ligne de tram, non par conviction, mais par nécessité, Lille avec une ligne en Y particulièrement bien tracée, Marseille avec une ligne se terminant en tunnel dans le centre et inaccessible aux bus (des

études avaient été faites !) et enfin Saint Etienne, impossible à desservir autrement, de par sa topographie ; la ligne de tram assurant à elle seule plus de 50 % du trafic de la totalité du réseau incluant bus et trolleybus.

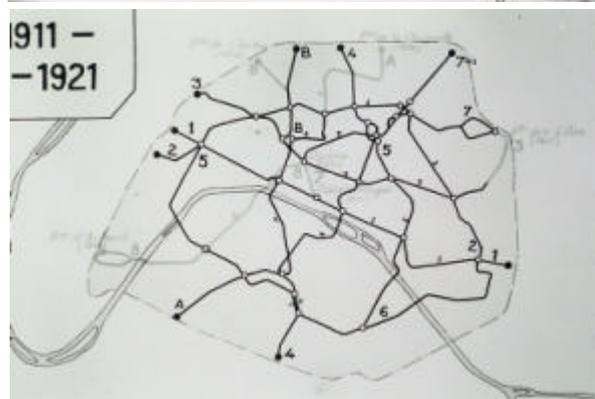
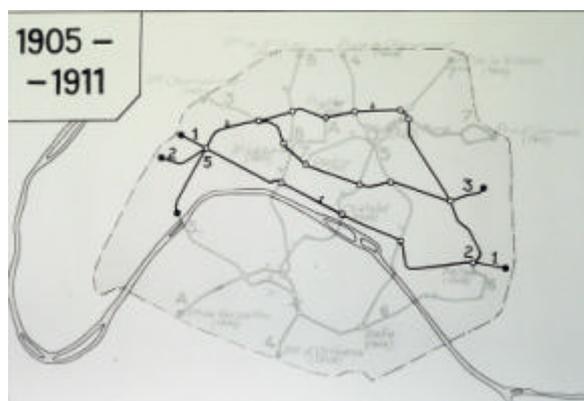
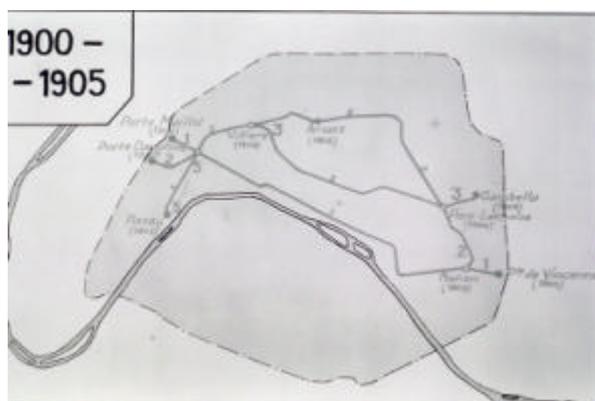
Cinq villes conserveront le trolleybus, Lyon, Marseille<sup>1</sup>, Grenoble<sup>2</sup>, Saint Etienne et enfin Limoges, patrie de ce type de véhicule, sans oublier la conversion de Nancy à cette technique dans les années 80.

C'est à partir de ces années que l'accroissement incessant du trafic automobile va permettre aux tramways de revenir en grâce pour essayer de juguler celui-ci, avec Nantes d'abord, puis Grenoble, Paris (banlieue), Rouen, Strasbourg, Montpellier, Lyon et bientôt Bordeaux (trois lignes).

Enfin pour revenir au métro parisien, quelques timides prolongements en proche banlieue verront le jour entre 1942 et 1946, puis avec une volonté plus forte à partir de 1970 et de longues extensions toujours en banlieue (Asnières-Gennevilliers, Saint-Denis, Châtillon-Montrouge, Créteil, Villejuif, Boulogne, La Courneuve).

<sup>1</sup> A Marseille, le trolley semble condamné à brève échéance

<sup>2</sup> Grenoble n'utilise plus de trolley depuis fin 2002



Photographies 10 : évolution du réseau du Métro parisien entre 1900 et 1931

En 1951 est apparue une motrice révolutionnaire montée sur pneus et circulant sur une piste spéciale. Le

prototype fit de longs essais sur l'ancienne navette Porte des Lilas-Pré-Saint-Gervais, puis il fut décidé

d'équiper la ligne 11 Châtelet-Mairie des Lilas. Ligne relativement courte, sinueuse et en forte rampe qui en ferait un banc d'essai probant. Les premiers trains furent mis en service en novembre 1956. Trois autres lignes seront équipées avec ce système. D'abord les lignes 1 et 4 dont les stations avaient été agrandies à 90 m pour permettre de recevoir des trains de six voitures. Enfin, après un temps d'arrêt, il fut décidé d'équiper la ligne 6, en grande partie aérienne et dont les riverains se plaignaient du bruit. Devant le coût et la longueur des transformations du fer au pneu, il fut décidé d'arrêter définitivement ces mutations technologiques. Le matériel fer ayant entre-temps fait de grands progrès en silence et accélération.

Le pneu fera sa réapparition en 1998 à la RATP avec la ligne 14 (METEOR), ligne nouvelle qui n'aura connu que ce système d'exploitation.

Parmi les améliorations les plus remarquables du métro urbain au cours des trente dernières années, il faut mentionner la ligne 13 actuelle avec la jonction des lignes 13 et 14 (anciennes versions) avec l'avant-dernière des traversées sous fluviale entre Champs-Élysées-Clémenceau et Invalides en 1976.

Mais le véritable renouveau du réseau ferré urbain et suburbain viendra, conjointement avec la modernisation du réseau banlieue SNCF, avec le RER et ses lignes à grand gabarit traversant Paris et rayonnant loin en banlieue sur des lignes SNCF.

Les prémices de ce réseau avaient eu lieu avec l'électrification en 1 500 V et rattachement à la CMP de la ligne de Sceaux en 1938. Puis, seulement trente-deux ans plus tard, avec l'électrification, toujours en 1 500 V et exploitée par la RATP, de la ligne dite de Vincennes, de Nation à Boissy-Saint-Léger. Très peu de temps après (février 1970), la première section,

Etoile-La Défense, de la future ligne A était mise en service et progressivement prolongée en banlieue et à travers Paris, via Opéra, Châtelet, Gare de Lyon. Ce réseau s'étoffera jusqu'à nos jours, puisque nous arrivons maintenant à la cinquième ligne (ligne E, dite EOLE) qui bute actuellement à Saint-Lazare, mais qui, dans l'avenir, doit être raccordée à une ligne de banlieue pour former une deuxième transversale Est-Ouest. Pour le profane, il est facile de distinguer une ligne RER d'une ligne de métro. Electrification en 1 500 V (et non 750 V) ou 25 000 V monophasé par caténaire (et non rail latéral), circulation à gauche (et non à droite), grand gabarit du matériel et longueur des stations (deux à trois fois plus longues).

Pour terminer n'oublions pas de citer la création en 1998 de la quatorzième ligne de métro, purement parisienne pour le moment, et à petit gabarit, baptisée METEOR, première ligne de Paris entièrement automatique qui préfigure le métro de l'avenir. Comme citée plus haut cette ligne automatique fut précédée à Lyon par la ligne D dite MAGALY, mise au point avec difficultés, puisque à ses débuts les motrices avaient dû être équipées de postes de conduite.

Ultérieurement, la ligne 14 doit être raccordée, au nord, à la branche Gennevilliers de la ligne 13 et, au sud, à la branche Villejuif de la ligne 7. Toutes deux rendues automatiques et équipées pour le roulement sur pneus, permettant ainsi la suppression des deux lignes à branches du métro parisien.

Voici, rapidement résumés, près de deux siècles de transports urbains en France et dont le XXI<sup>e</sup> siècle naissant verra encore bien des évolutions.

*Jacques ROSSETTI, décembre 2002*

## **B - CRITERES D'APPRECIATIONS**

### **ELEMENTS D'APPRECIATION DES TRANSPORTS PUBLICS URBAINS ET SUBURBAINS**

Un mode de transport peut être défini par trois caractéristiques principales :

- la voie où il évolue
- la technologie utilisée
- le service réalisé.

#### ⇒ **LA VOIE**

On peut distinguer trois grands types de circulations.

#### Le site partagé intégral

Le véhicule de transport public partage la voie de circulation avec d'autres véhicules de catégorie et de technologies semblables ou différentes (par exemple, partage de la voie publique entre les véhicules particuliers, les camions, les bus, trolleybus, voire tramways.

#### Le site propre partiel

Le véhicule de transport public utilise sur une partie de son trajet un site d'évolution qui lui est propre et qui est séparé des autres usagers par des barrières plus ou moins marquées, mais il subsiste des lieux (croisements par exemple) où il partage la chaussée avec d'autres véhicules. Exemple, tramway de Nantes, Lyon... Trans Val de Marne...

#### Le site propre intégral

Le véhicule de transport public utilise une voie qui lui est spécifiquement dédiée. Cette voie ne présente pas de croisement à niveau avec d'autre voie et peut être entièrement close en dehors des gares ou stations qui sont des points d'accès bien délimités.

La voie d'un site propre intégral peut être implantée en aérien, au niveau du sol, en souterrain L'exemple le plus accompli de site intégral est représenté par le site d'évolution des réseaux de type métro, Val ou RER...

⇒ **LA TECHNOLOGIE**

La technologie des divers modes de transports publics fait référence aux spécificités techniques des véhicules de transport et des voies de roulement.

On pourra ainsi distinguer :

Le support de roulement

- voie routière classique,
- voie routière spécifique,
- voie ferrée classique appropriée à un roulement fer/fer,
- voie ferrée mixte appropriée à un roulement sur pneumatique,
- voie suspendue,

Le mode de guidage

- guidage par la voie : cas type du réseau ferré,
- guidage par le conducteur : cas type du pilotage des bus,
- guidage par un système : cas du Civis optique,
- guidage par des balises implantées sur la voie ou aux bords de la voie de circulation : cas de l'expérience de guidage sur une partie de l'autoroute San Diego - Los Angeles

Mode de propulsion

Propulsion thermomécanique:

- moteur à combustion interne (diesel, essence ou gaz) + transmission mécanique,
- moteur à combustion interne + transmission hydraulique.

Propulsion thermoélectrique

- moteur à combustion interne + alternateur + moteur électrique,
- turbine à gaz + alternateur + moteur électrique,
- piles à combustible + moteur électrique,
- plus des variantes associant aux convertisseurs thermoélectriques ou aux piles à combustibles, des éléments de stockage de l'électricité tels qu'accumulateurs électrochimiques et / ou supercondensateurs, ou d'énergie cinétique : volant d'inertie ou d'énergie de pression accumulateurs oléopneumatiques

Propulsion électrique pure

L'énergie électrique captée au niveau d'une ligne aérienne de contact ou à partir d'un troisième rail ou d'un système d'alimentation enterré et commutable est utilisé pour alimenter un moteur électrique. L'énergie électrique fournie par la source d'énergie est dans la quasi-totalité des cas modifiée et adaptée avant d'alimenter les moteurs électriques au moyen de convertisseurs statiques électroniques. Les moteurs peuvent être de type tournant (moteur à courant continu, moteur synchrone ou asynchrone) ou linéaire.

Mode de transfert de la force de traction

La force de traction peut être transférée du véhicule au support qui sert à la réaction par

- un système mettant en jeu les forces de friction et la capacité d'adhérence de la roue au support (rail ou piste de roulement d'un pneumatique),
- un système magnétique,
- un câble qui s'enroule et se déroule sur un touret.

Mode d'alimentation

Dans le cas des véhicules à propulsion électrique pure, l'énergie de traction peut être délivrée en

- courant continu 600 Vcc-750 Vcc, c'est la très grande majorité des cas lorsqu'on alimente des trolleybus, des tramways ou des métros.
  - courant continu 1500 Vcc, situation la plus fréquente pour les RER ou des métros lourds.
- Il existe des cas encore peu répandus où le courant de traction peut être du type alternatif, 15 kV 16 Hz 2/3 cas du tram train de Karlsruhe ou même 25 kV 50 Hz.

Mode de pilotage et de conduite du trafic

C'est le moyen de réguler la marche d'un ou de tous les véhicules du système de transport. Le mode de régulation le plus répandu consiste à contrôler l'espacement des véhicules sur le trajet. Ce type de conduite peut être réalisé de manière :

- manuelle et visuelle, à partir de signaux implantés à bord du véhicule ou sur la voie,
- entièrement automatique,
- ou selon une combinaison des diverses méthodes.

⇒ **LE SERVICE RENDU**

Il existe un grand nombre de manière d'assurer un service de transport public que l'on peut essayer de classer selon trois catégories :

Tout d'abord en tenant compte du type de desserte que l'on veut réaliser. Par exemple, on peut *définir des services de proximité*, assurés à basse vitesse à l'intérieur de surface relativement faible, par exemple à l'intérieur d'un quartier d'affaires, d'un aéroport, d'une foire commerciale. Dans ce genre de service, la fréquence de passage du système de transport en un point de desserte doit être élevée car la densité des passagers est élevée.

On peut envisager d'assurer *un service de transport urbain*. Il faut alors assurer l'exploitation d'un réseau hiérarchisé mettant en oeuvre des modes de transports complémentaires, différents les uns des autres et adaptés aux besoins spécifiques de la ville.

On peut envisager d'assurer *un service de transport public* à l'échelon d'une région.

Le deuxième critère de classification va porter sur le mode d'exploitation des véhicules.

On peut envisager un service de type desserte locale où tous les véhicules s'arrêtent à tous les arrêts ou à la demande des usagers.

On peut envisager un service où certains véhicules s'arrêtent à toutes les stations tandis que d'autres ne s'arrêtent qu'à quelques stations spécifiques.

On peut envisager enfin un service où les véhicules ne s'arrêtent qu'à des stations très espacées les unes des autres.

Le troisième critère de classification porte sur les temps d'exploitation.

On peut observer des services réguliers selon des horaires bien définis pendant tous les jours de la semaine et selon une plage horaire quotidienne quasi continue.

On peut observer des services qui offrent des fréquences de passage élevées à certaines heures de la journée (par exemple de 6 à 9 h le matin et de 16 h 30 à 19 h le soir alors que dans le reste de la journée la fréquence est très faible).

On peut observer des services spéciaux organisés uniquement à l'occasion d'événements particuliers culturels, sportifs, et ou pour des situations d'urgence (inondations, tempêtes de neige...).

#### ⇒ CARACTERISTIQUES D'UN SYSTEME DE TRANSPORT PUBLIC

Dans une agglomération de taille conséquente le voyageur moyen est amené très fréquemment à utiliser plusieurs modes de transport pour se rendre d'un point à un autre de la cité. De ce fait, il faut prendre en compte le temps de transfert entre deux lignes d'un même mode ou entre les divers modes utilisés pour connaître le temps total nécessaire pour aller du point de départ au point d'arrivée d'un voyage.

L'attrait d'un système de transport dépend :

- d'une part de la manière dont est résolue la relation :  
temps total du voyage = temps d'accès + temps d'attente + temps de transfert entre lignes + temps de parcours.

- d'autre part, de la sensation de confort et de sécurité qu'éprouve l'utilisateur lors de ses déplacements.

L'expérience montre que, pour des trajets importants, les systèmes de transport public évoluant en sites partagés ont très souvent des difficultés à être compétitifs, du point de vue temps total du trajet, avec les systèmes de transport individuel.

Pour renforcer l'attrait du transport public, les autorités organisatrices de transport s'efforcent

- de faire évoluer l'offre de transport en facilitant les déplacements au sein des agglomérations,
- d'éviter la congestion des hyper centres inadaptés à laisser passer d'importants flux de véhicules,
- de diminuer la pollution locale provoquée par un usage irrationnel de l'espace urbain disponible,
- de maîtriser le coût global des transports.

Pour arriver à leur fin, les autorités organisatrices de transport sont amenées à développer des modes de

transport sur voies réservées - (TCSP) dont les performances sont plus élevées que celles des modes de transports évoluant en sites banalisés, mais qui en contrepartie, nécessitent la mise en place d'infrastructures d'autant plus coûteuses que l'on multiplie les ouvrages d'art (viaduc, tunnel, voies spéciales) dans un tissu urbain déjà fort encombré.

#### Critères d'appréciation d'un système de transport

Les performances d'un système de transports peuvent s'apprécier selon des critères de performances, de services, d'impacts, de coûts.

En terme de performances on peut distinguer :

- *la fréquence des véhicules* : ce critère s'exprime par un nombre mesurant la quantité de passages en un point de la ligne de l'élément de transport qui la dessert.

- *la vitesse commerciale* : c'est la vitesse moyenne des véhicules qui transportent les passagers sur la ligne considérée,

- *la ponctualité* exprime le pourcentage des véhicules qui arrivent à l'heure ou dans un délai inférieur à un temps donné par rapport à l'horaire fixé,

- *la fiabilité* mesure le nombre d'incidents ramené à celui d'un produit (passagers x heure),

- *la sécurité* mesure le nombre d'accidents ramené à celui d'un produit (passagers x heure),

- *la capacité* de la ligne mesure le nombre maximal de places offertes que les véhicules affectés à la ligne peuvent écouler pendant une heure,

- *la capacité de production de la ligne*, c'est un indicateur composite égal au produit de la vitesse commerciale par la capacité de la ligne. Ce critère peut être utilisé pour comparer deux modes de transport.

- *la productivité de la ligne*. Ce critère permet de mesurer les performances de la ligne en fonction des ressources affectées. Par exemple : véhicule x km/par conducteur ; véhicule x km/par coût de fonctionnement ; véhicule x km/par coût d'énergie consommée ; véhicule x km/par espace urbain consommé,

- *le taux d'utilisation* : ce critère mesure, par exemple, le rapport (passagers x km /places offertes x km.)

#### Les critères de service

Ces critères intéressent directement les passagers. On peut ainsi définir, un niveau de service, élément de base qui permet de mesurer le potentiel d'attraction du système de transport vis-à-vis des usagers. Ce niveau de service dépend des critères de performances tels que la vitesse commerciale, la ponctualité, la régularité, mais aussi d'éléments qualitatifs comme la pertinence et la simplicité d'utilisation du système, la propreté, le confort, l'esthétique, le comportement des autres passagers, le sentiment de sécurité... et du prix que l'utilisateur doit acquitter pour sa course.

Les critères d'impacts

L'analyse d'un système de transport doit prendre en compte les retombées que peut avoir le système sur le voisinage de la zone qu'il dessert.

Ces retombées peuvent être positives ou négatives. Par exemple, à court terme :

- réduction de la congestion du centre urbain,
  - réduction de la pollution de l'air,
  - diminution des bruits,
  - amélioration de l'esthétique de la ville
- et, à long terme
- modification de la valeur des terrains avoisinants, des activités économiques, de la sociologie de la ville.

Les critères de coûts

Les coûts sont généralement décomposés en :

- coûts d'investissements qui correspondent aux coûts de mise en place des infrastructures et du matériel,
- coûts d'exploitation qui correspondent aux coûts de fonctionnement normal du système.

L'évaluation d'un système de transport doit prendre en compte les quatre types de critères et tendre à faire émerger au cas par cas la solution qui répond de manière optimale à ces critères.

⇒ **CAPACITE D'UN MODE DE TRANSPORT**

La capacité d'une ligne ferroviaire, d'une voie routière... mesure le flux maximal de passagers que peut absorber cette infrastructure dans un temps déterminé, l'heure par exemple.

En pratique, la capacité est limitée par le délai minimal de passages entre deux véhicules (train, bus...) et les performances techniques des véhicules de transports envisagés.

Dans le cas d'un mode de transport en site propre la capacité d'une voie peut s'exprimer simplement par la relation

$$C = F * L * P$$

où C exprime la capacité de la voie en passagers par heure.,

F exprime la fréquence maximale des véhicules (trains, par exemple)

L exprime le nombre de voitures associées (voitures d'un train par exemple)

P = nombre de passagers par voiture.

A titre d'exemple on peut calculer la capacité d'une voie de RER.

Si on admet un train de L = 9 voitures toutes les deux minutes (F = 30) et si chaque voiture peut admettre 200 personnes (P = 200), la capacité théorique de la ligne est:

$$C = 30 * 9 * 200 = 54\ 000$$

passagers par heure et par sens de circulation, dans le cas d'une ligne à deux voies de circulation.

*Jean BONAL , décembre 2002*



*Photographie 11 : CGO, automotrice à vapeur PURREY, place de la Bastille en 1898.*

# L'EVOLUTION DE L'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE EN TRACTION FERROVIAIRE

**Christian LECLERC**

Ingénieur d'études honoraire à la Direction du matériel et de la traction de la SNCF

*suite de la 3ème partie : L'ère des thyristors, les principes de la commutation forcée, fonctions permises*

Comme évoqué en C.2.2 (*La Revue 3EI n°30, p.72*), le thyristor est encore absent en traction à courant continu au début des années 1970. Avant d'aborder son arrivée dans ce domaine, il n'est peut-être pas inutile d'évoquer à nouveau les solutions techniques mises en oeuvre jusqu'alors et qui, dans leurs principes, n'avaient pas beaucoup changé depuis leurs origines. La partie 1500 V = des puissantes locomotives bi-courant CC 21000 de 1969 a été encore conçue selon ces techniques qui avaient fait leur preuve (voir la *figure 78 - La Revue 3EI n°29, p.72*) ; hormis quelques automotrices qui ont encore fait appel à un rhéostat de démarrage (séries Z 7300-7500, dites Z2, à système "JH"), la SNCF ne commandera plus de matériels 1500 V à réglage de tension purement électromécanique.

## C.2.2.1 - Rappel concernant le réglage de tension en traction à courant continu "traditionnelle"

Les locomotives et automotrices sont équipées du classique rhéostat dont les éléments résistifs (constitués de pièces moulées en fonte, pour les plus anciens, de feuilles gaufrées ou de treillis en alliage résistant) sont insérés en série avec les moteurs de traction pour maîtriser les énormes appels de courant au cours des démarrages ; ces éléments doivent, bien sûr, être puissamment ventilés.

Les engins étant, en général, équipés de 2 ou, mieux, de 4 moteurs de traction, on pratique les changements de couplage de ceux-ci, concurremment avec la réduction de la valeur résistive du rhéostat.

La séquence type suivante est le plus souvent utilisée au cours de chaque démarrage (exemple donné pour 4 moteurs) :

- les 4 moteurs sont couplés en série avec tous les éléments du rhéostat
- le rhéostat est éliminé progressivement au fur et à mesure de la montée en vitesse (mise en court-circuit ou non utilisation successive des éléments)
- les moteurs sont couplés en 2 groupes de 2 moteurs en série, le rhéostat total est réinséré par moitié dans chacune des branches
- les 2 parties du rhéostat sont, de nouveau, éliminées progressivement
- les moteurs sont rendus indépendants, le rhéostat total est partagé dans chacune des 4 branches
- les 4 parties du rhéostat sont simultanément éliminées progressivement

- chacun des 4 moteurs est alimenté sous la pleine tension caténaire (1500 V à la SNCF) et l'on peut alors pratiquer, en plusieurs étapes, la réduction de champ en insérant en dérivation sur les inducteurs des résistances dites de "shuntage" au moyen de contacteurs.

L'élimination du rhéostat se fait selon un nombre de "crans" plus ou moins importants, la "finesse" des démarrages dépendant de ce nombre. En régime permanent, on ne peut utiliser que les crans qui n'utilisent aucun élément du rhéostat, ils correspondent aux seuls couplages série, série-parallèle et parallèle des 4 moteurs mais aussi aux crans de shuntage ; cela pour des raisons évidentes d'économie d'énergie mais aussi parce que le dimensionnement thermique du rhéostat ne permet pas, très généralement, son utilisation permanente.

On imagine aisément la quantité d'organes électromécaniques nécessaires pour réaliser une séquence telle que celle décrite ci-dessus. Il s'agit très souvent de contacteurs indépendants commandés pneumatiquement (les dispositifs électromagnétiques sont plutôt réservés aux contacteurs de petits calibres), ils sont munis d'un dispositif électromagnétique de soufflage de l'arc de coupure.

Un dispositif ne faisant pas appel à des contacteurs indépendants a été conçu par la société JEUMONT-SCHNEIDER, il s'agit du célèbre système dit "JH" (JEUMONT-HEIDMAN), constitué principalement par un arbre à cames juxtaposées entraîné "pas à pas" par un système électromécanique (dit "servo-moteur"), assez complexe, mû par un moteur alimenté par la batterie ou manuellement en cas d'avarie ; chacune des cames (et elles peuvent être nombreuses) actionne directement l'équipage mobile d'un contacteur à soufflage électromagnétique. Toute la séquence de démarrage décrite ci-dessus est contenue dans le nombre et le profil des cames.

Les dispositifs "JH" ont été très utilisés à la SNCF sur l'ensemble des matériels à courant continu ou poly-courant (les locomotives quadri-courant CC 40100, mises en service en 1964, possédaient 3 arbres à cames "JH") tandis que les gradateurs des locomotives à redresseurs, qui ont précédé les engins monophasés à thyristors, étaient, eux aussi, entraînés par un servo-moteur de type "JH".

### C.2.2.2 - Le réglage statique de la tension des moteurs

Sauf exceptions, annotées en conséquence, toutes les figures, reproduites au cours des développements suivants, sont d'origine SNCF (DETE, puis MCE) et ont été extraites du cours "**Le hacheur en traction à courant continu**" rédigé par M. A. COSSIE à l'usage du "Cycle de perfectionnement des Attachés du Matériel et de la Traction", édition de 1977.

Il s'agit, ici, d'une conversion de tension "continu-continu". On part d'une source de tension de 1500 V continu et l'on veut l'abaisser à quelques dizaines de V pour pouvoir l'appliquer directement à un moteur de traction à collecteur au moment du démarrage, puis l'augmenter progressivement, de façon continue, tout en contrôlant l'intensité au fur et à mesure de la montée en vitesse de l'engin.

Le schéma de base de la *figure 102*, ci-dessous, que l'on ne peut faire plus simple, permet d'obtenir cet abaissement de tension ; il est évident que l'interrupteur, représenté symboliquement, ne sera pas l'appareil électromécanique classique mais un dispositif statique, plus ou moins complexe, à base de thyristors.

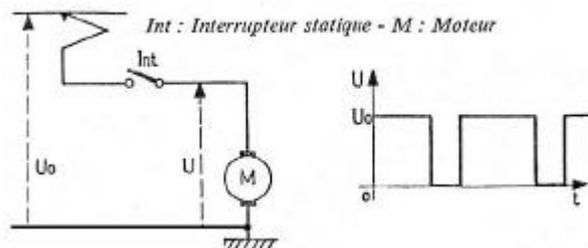


Schéma de principe très simplifié du réglage de tension par découpage cyclique.

**Figure 102**

Si l'on manoeuvre l'interrupteur de façon cyclique, on obtient aux bornes du moteur des créneaux de tension dont la valeur moyenne est donnée par la relation :  $U_{moy} = U_0 \frac{t}{T}$  où  $U_0$  est la tension de la source,  $t$  la durée de fermeture de l'interrupteur et  $T$  sa périodicité de manoeuvre. Le rapport  $t/T$  est souvent appelé "rapport cyclique" ou "taux de conduction" tandis que le convertisseur continu-continu, qui fonctionne selon ce principe, est nommé "hacheur".

La variation du rapport cyclique, donc le réglage de la tension moteur, peut s'effectuer selon les 2 modes suivants :

- temps de conduction,  $t$ , variable et fréquence de découpage constante ( $F = 1/T$ )
- temps de conduction constant et fréquence de découpage variable.

Le choix entre ces 2 modes de fonctionnement du hacheur dépendra de nombreux éléments tels que les circuits réellement utilisés pour réaliser l'interrupteur

"simpliste" du schéma de principe de la conception duquel découle la valeur du taux de conduction minimum que l'on pourra atteindre (donc la tension de démarrage appliquée au moteur) mais aussi de la nocivité des fréquences de découpage utilisées vis à vis des circuits extérieurs, circuits de télécommunications et, surtout, de signalisation (dits circuits de voie), car le courant "pulsé" appelé à la source n'est pas très "lisse" (sauf à utiliser des circuits de découplage lourds et encombrants comme nous allons le voir par la suite).

Les hacheurs à fréquence variable ne sont utilisés, en principe, que pour des petites puissances (convertisseurs auxiliaires) pour lesquelles les intensités perturbatrices résiduelles sont faibles mais des expérimentations de hacheurs de traction ont été réalisées, parmi d'autres dispositions, pour des puissances moyennes (Z 4203, automotrice expérimentale de 450 kW). En fréquence fixe, la fréquence de découpage peut être choisie de façon à ce qu'elle ne présente pas d'effet perturbateur sur les circuits de signalisation, c'est le cas de la fréquence d'ondulation de la tension continue 1500 V délivrée par les redresseurs des sous-stations de traction ; ces redresseurs, généralement hexaphasés, génèrent inévitablement une ondulation à 300 Hz (et ses composantes harmoniques) pour laquelle les circuits de voie sont déjà protégés.

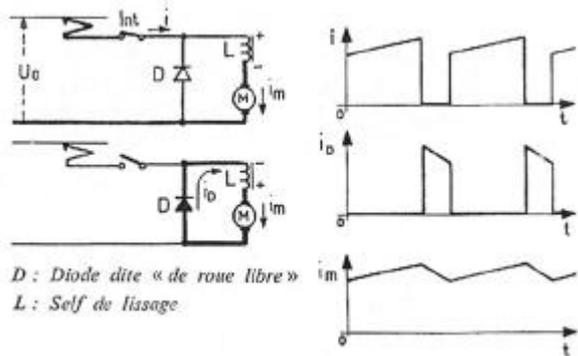
Le schéma du hacheur constitué d'un simple interrupteur ne peut, évidemment, fonctionner que sur des charges purement résistives, où le courant peut s'établir et disparaître instantanément et avec une source n'ayant aucune réactance susceptible de s'opposer à ces mêmes variations de son débit ; ce n'est le cas ni des moteurs de traction, ni des caténaires et sous-stations d'alimentation.

#### Self de lissage et diode de "roue libre" :

Un moteur de traction est assez réactif (inducteurs en particulier) et fonctionnerait très mal en courant impulsionnel, tant en ce qui concerne le couple, qui serait pulsatoire, que la commutation à laquelle nuit une trop forte ondulation du flux (fém statique de transformation) ; on a déjà rencontré cela pour les moteurs alimentés par des redresseurs où l'on est dans l'obligation de prévoir des selfs de lissage qui réduisent l'ondulation du courant.

Le schéma du hacheur, alimentant un moteur de traction, sera donc complété par une self de lissage et par une diode, dite de "roue libre" ou de décharge, qui, à l'instar de leur équivalence fonctionnelle en redressement monophasé par pont mixte, assure le relais de la circulation du courant [self de lissage-moteur] lorsque l'interrupteur est ouvert. L'ouverture de cet interrupteur ou extinction du "hacheur", se fait alors dans de bonnes conditions puisque le courant moteur, ayant trouvé un autre chemin, ne force plus son passage à travers lui.

Le schéma et les chronogrammes de la *figure 103* montrent cette disposition. On remarque aisément que la valeur moyenne du courant appelé à la source est inférieure à la valeur moyenne du courant moteur dans le rapport du taux de conduction du hacheur. On peut donc assimiler le hacheur à un "transformateur" à courant continu ; fonctionnellement, il se rapproche d'un système [transformateur - redresseur monophasé contrôlé - moteur de traction].



Formes des intensités dans le hacheur (*i*), dans la diode de "roue libre" (*i<sub>D</sub>*) et dans le moteur (*i<sub>m</sub>*).

**Figure 103**

Filtre d'entrée :

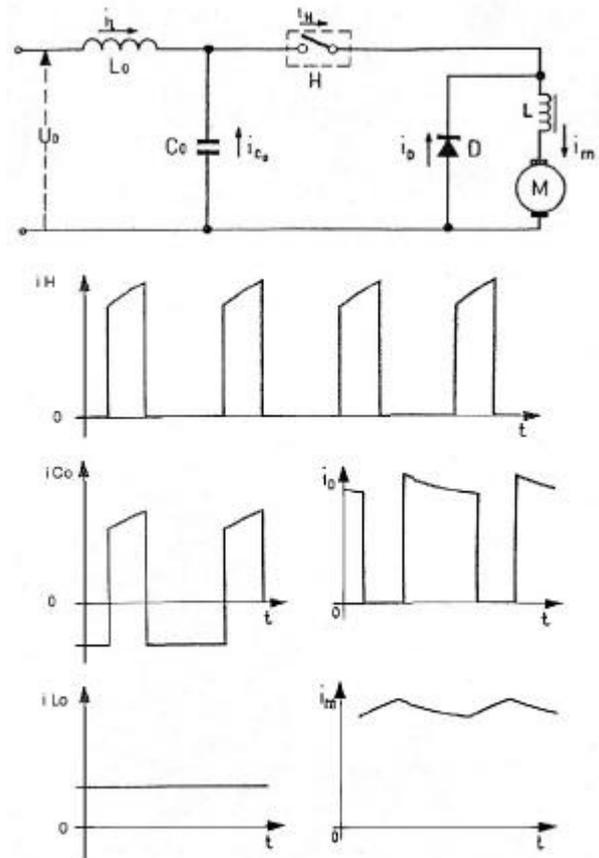
Le courant impulsionnel appelé à la source ne peut être extrait, comme tel, que d'une source dénuée d'inductance, il n'y a guère que les batteries d'accumulateurs qui répondent à cette condition. Or, les hacheurs de traction de la SNCF sont alimentés directement par la caténaire 1500 V qui présente une inductance propre de l'ordre de 0,75 mH au kilomètre (mesure faite à 50 Hz sur des caténaires en double voie avec mise en parallèle tous les 5 km, pour une caténaire de voie unique cette valeur atteint 1,25 mH), la distance entre le pantographe de l'engin moteur et les sous-stations encadrantes, qui alimentent cette caténaire, est essentiellement variable, les ensembles redresseurs-transformateurs des sous-stations ainsi que les lignes HT du réseau EDF présentent eux aussi des réactances.

Tous ces éléments réactifs variables, mis en série, s'opposent aux appels de courants impulsionnels et génèrent des surtensions lors de leurs disparitions. Par ailleurs, même si électriquement cela était rendu possible, il serait inadmissible de véhiculer des courants impulsionnels dans la caténaire, ceux-ci, comme déjà évoqué plus haut à propos du choix de la fréquence de découpe, sont beaucoup trop perturbateurs vis à vis des circuits de télécommunication et de signalisation ; ce qui circule dans la caténaire est susceptible d'influencer les lignes de télécommunications par couplage électromagnétique et les circuits de signalisation parce que les rails véhiculent à la fois les courants des circuits de voie et

les retours des courants de traction vers les sous-stations.

Il est donc indispensable de "lisser" les courants absorbés à la caténaire pour leur enlever de leur richesse harmonique, donc de leur pouvoir perturbateur, et de compenser les réactances qui s'opposent aux appels impulsionnels et génèrent des surtensions lors des blocages des hacheurs. Un filtre LC, dit "passe-bas", comportant donc une self et un condensateur, répondra à cette exigence et sera installé en entrée du hacheur.

La self devra être suffisamment importante devant les réactances propres au système d'alimentation afin de masquer leur irrégularité et bien "lisser" le courant, tandis que le condensateur devra constituer un réservoir énergétique suffisant pour fournir les forts appels de courants demandés à chaque fermeture de l'interrupteur "hacheur" et compenser ainsi la réactance totale de la source ( que l'on vient d'augmenter encore avec l'inductance du filtre ). Le schéma de principe d'un hacheur de traction se complète donc comme représenté à la *figure 104*.



Adjonction d'un filtre d'entrée au hacheur H  
( self *L<sub>0</sub>* et condensateur *C<sub>0</sub>* ).

Les chronogrammes représentent les courants dans les différentes branches du schéma ; on remarquera que le courant *i<sub>L0</sub>*, qui est le courant absorbé à la caténaire, est ici représenté parfaitement continu ( en réalité il présente une ondulation car la valeur de *L<sub>0</sub>* n'est pas infinie ).

**Figure 104**

Le dimensionnement du filtre, dont le produit LC (ou grandeur caractéristique) détermine la fréquence propre (fréquence d'accord ou de résonance) par la relation :  $F_0 = 1/2\pi\sqrt{LC}$ , n'est pas fait sans précaution.

En effet, la fréquence d'accord  $F_0$  doit être :

- nettement inférieure à la fréquence de découpage  $F$ , pour éviter que le hacheur excite le filtre à la résonance (il est même démontré qu'il faut  $F_0 < F/2$  si l'on veut éviter tout phénomène d'oscillation complète)
- différente de 50 Hz, qui est la fréquence de fonctionnement de nombreux circuits de voie utilisés sur les lignes électrifiées en 1500 V = puisque cette fréquence ne doit, *a priori*, pas se trouver présente dans les courants de traction qui retournent à la sous-station par les rails. Des dissymétries dans les circuits redresseurs de ces sous-stations pouvant créer une source de 50 Hz, il ne faudra surtout pas favoriser la circulation de ces courants par une résonance du filtre à cette fréquence.

En fait, la valeur de  $L$  est la somme des valeurs de la self du filtre  $L_0$ , des inductances de la caténaire et des inductances du système d'alimentation (sous-station et lignes EDF). Afin de ne pas risquer d'avoir une  $F_0$  égale à 50 Hz, même dans les cas où le véhicule moteur est au voisinage d'une sous-station (inductance additionnelle faible), on cherchera à obtenir une  $F_0$  franchement inférieure à 50 Hz uniquement avec la seule self de filtre  $L_0$ , ce qui conduit à un produit  $L_0C_0$  minimum.

Un produit  $L_0C_0$  important est aussi nécessaire pour que ce filtre assure son premier rôle qui, comme nous l'avons vu, est de "lisser" le courant appelé à la caténaire. On démontre que l'amplitude  $\Delta I$  de l'ondulation de ce courant (qui se superpose à sa valeur moyenne  $I_m$ ), est inversement proportionnelle à la fois au produit  $L_0C_0$  et au carré de la fréquence de découpage  $F$ .

Cette ondulation  $\Delta I$  est maximale pour un taux de conduction  $t/T$  de 1/2 et s'exprime alors par :

$$\Delta I = \frac{I_m}{32} \times \frac{1}{L_0 C_0} \times \frac{1}{F^2}$$

Les selfs et condensateurs sont des organes lourds et encombrants. La self doit être dimensionnée pour l'important courant moyen qui la traverse (tant en section de cuivre pour ce qui concerne l'échauffement, qu'en circuit magnétique, ou section de "fer", qui ne devra pas être saturé) et les condensateurs devront tenir la tension caténaire maximale, ainsi que les surtensions transitoires susceptibles d'apparaître, mais aussi être capables de débiter les fortes intensités impulsives appelées par le hacheur.

On peut éviter un dimensionnement trop important du filtre en augmentant la fréquence de découpage  $F$ , celle-ci intervenant par l'inverse de son carré, mais nous verrons que les caractéristiques dynamiques de

l'interrupteur (nous sommes encore "fictivement" au début des années 1970 et nous ne disposons alors que de thyristors) limitent cette fréquence vers 300 ou 400 Hz ; comme cela a déjà été mentionné plus haut, la fréquence de 300 Hz a été choisie à la SNCF pour les hacheurs de traction car elle est déjà présente dans l'ondulation de la tension caténaire et qu'en conséquence, les circuits de signalisation sont prévus pour coexister avec cette fréquence.

Par ailleurs, il ne faut pas perdre de vue la nécessité d'obtenir de faibles tensions de démarrage qui réclament de faibles taux de conduction. A 300 Hz, la période  $T$  est de 3,33 ms ce qui, pour un taux de 1/100 au démarrage (soit 15 V moyens appliqués au moteur), demande une durée de conduction de 33  $\mu$ s impossible à obtenir avec un "interrupteur" qui demande un temps de fermeture minimum de l'ordre de 200  $\mu$ s comme nous allons le voir plus loin.

On aura alors recours soit :

- au découpage à des sous-multiples du 300 Hz, fréquences qui, si elles sont choisies en fonction des contraintes imposées par les circuits de signalisation, ne demandent pas un surdimensionnement du filtre puisqu'elles ne sont utilisées que pour les démarrages donc à puissance relativement réduite.
- à un hacheur secondaire, dit hacheur vernier, placé en série avec le hacheur principal et dont le fonctionnement s'imbrique partiellement (fermeture retardée mais ouvertures simultanées) avec ce dernier comme il sera vu plus loin.

Une autre disposition, destinée à augmenter la fréquence de découpage vue du filtre, est très souvent utilisée pour les hacheurs de traction de forte puissance. Il s'agit du schéma à hacheurs multiphasés où l'on partage le courant moteur dans plusieurs hacheurs élémentaires (ou phases) dont les fermetures et ouvertures respectives sont régulièrement décalées les unes par rapport aux autres, d'où le terme "hacheurs entrelacés" fréquemment utilisé. Le schéma devient alors celui de la *figure 105*, ci-après.

Chaque phase de hacheur est dimensionnée pour le 1/3 du courant (courant  $i_H$ ) ce qui n'augmente pas le dimensionnement global de l'ensemble des 3 interrupteurs et diodes de roue libre. Par contre, pour un même produit  $L_0C_0$ , l'ondulation du courant d'entrée  $\Delta I$  est considérablement réduite (par le cube du nombre de hacheurs élémentaires) puisque son expression devient :

$$\Delta I = \frac{I_m}{32} \times \frac{1}{L_0 C_0} \times \frac{1}{F^2 \times n^3}$$

où  $F$  est la fréquence de découpage de chacun des hacheurs élémentaires et  $n$  le nombre de ceux-ci. La fréquence vue par le filtre est  $n \times F$ , tandis que l'amplitude du courant appelé à cette fréquence est  $n$  fois moindre que si l'on avait un seul hacheur.

Les chronogrammes des courants, représentés sous le schéma de la *figure 105*, montrent bien un tel fonctionnement.

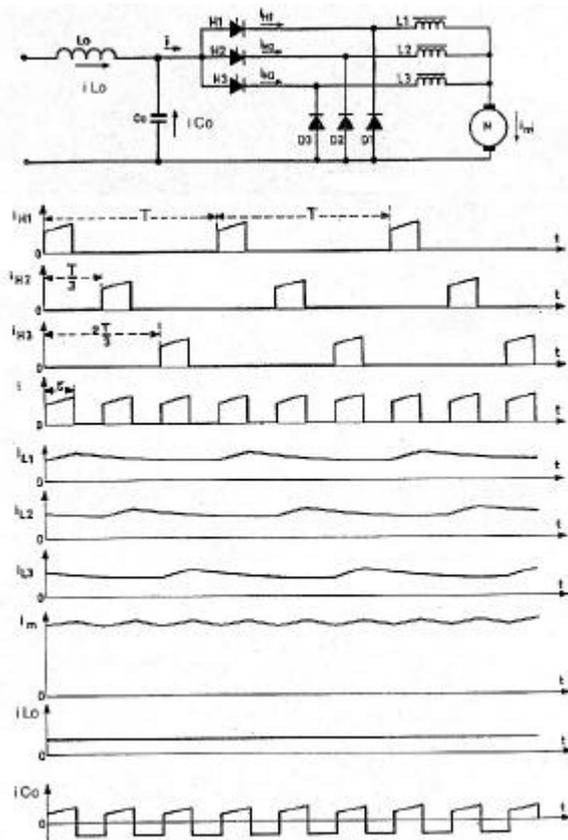


Schéma d'un hacheur principal constitué de 3 hacheurs élémentaires entrelacés et chronogrammes de représentation des courants dans les différentes branches.

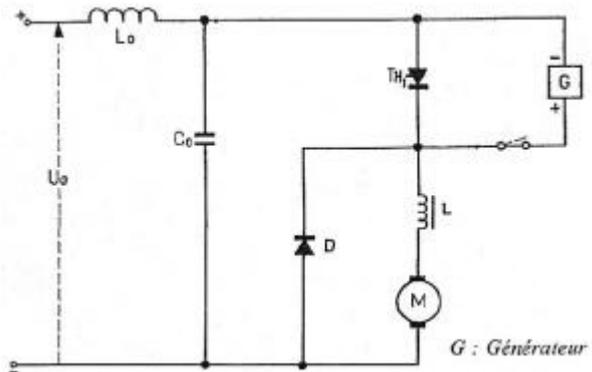
**Figure 105**

Réalisation de l'interrupteur du hacheur :

Si un simple thyristor est idéal pour constituer cet interrupteur, cette simplicité ne fonctionne qu'à son amorçage et s'arrête lorsque l'on veut procéder à son extinction puisque alors aucune inversion de polarité de la tension d'alimentation ne provoquera l'annulation du courant qui le traverse.

L'annulation du courant dans un thyristor hacheur ne peut se faire qu'en créant une source de tension annexe, suffisamment puissante, que l'on connectera aux bornes du thyristor, au moment souhaité pour son extinction, avec des polarités telles qu'elle provoquera le passage d'un courant inverse au moins égal au courant principal que l'on désire annuler, le blocage du thyristor n'ayant lieu qu'au moment de cette "annulation". On peut aussi considérer que la source annexe doit "dériver" le courant principal du thyristor (ce qui revient bien à l'annuler). Pour que l'extinction du thyristor soit totale et confirmée, il sera même nécessaire de lui appliquer une tension négative entre anode et cathode au minimum pendant son temps de recouvrement inverse.

Les schémas des figures 106 et 107, suivantes, représentent un système hacheur un peu plus réaliste que ceux rencontrés jusqu'à présent.



Dispositif d'extinction simplifié mais assez peu réaliste. Le générateur G étant indépendant de la source  $U_o$ , le contre-courant d'extinction qu'il génère est donc, lui aussi, indépendant des fluctuations de la tension d'alimentation.

**Figure 106**

On peut utiliser un générateur spécifique d'extinction "G", tel que représenté sur le schéma de la figure 106 ; il a bien les polarités susceptibles de lui faire débiter un "contre-courant" dans le thyristor (ou de "dériver" son courant direct) au moment de la fermeture de l'interrupteur qui lui est associé. En fait, l'installation d'un générateur d'extinction indépendant est, encore, assez peu réaliste, bien qu'ayant été réalisée expérimentalement (hacheur OERLIKON sur BB 17).

Il est plus aisé (et économique) de faire débiter le contre-courant nécessaire à la commutation par la source principale d'alimentation. La figure 107 représente le véritable schéma du dispositif d'extinction dont les étapes de fonctionnement se déroulent séquentiellement selon les schémas de la figure 108.

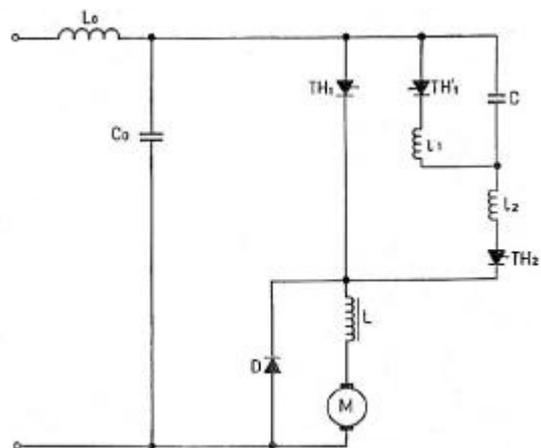
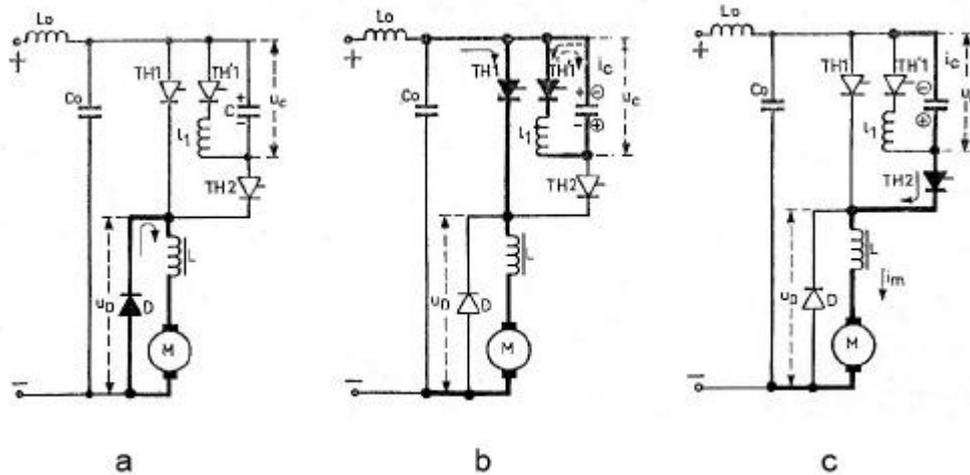


Schéma d'un circuit d'extinction "classique", à 2 thyristors auxiliaires TH'1 et TH2, très utilisé (sur les équipements JEUMONT-SCHNEIDER, en particulier). L'énergie nécessaire à la charge du condensateur de commutation C est fugitivement prélevée sur le courant moteur lorsque le thyristor principal est bloqué.

**Figure 107**



**Schémas de représentation du fonctionnement "séquentiel" du circuit d'extinction du thyristor principal TH1**  
 Le thyristor auxiliaire TH'1 est dit thyristor d'inversion car sa commande déclenche la demi-oscillation qui inverse les polarités de la charge de C ; quant à TH2, il est dit d'extinction, proprement dit, car son amorçage a pour effet de connecter C sur le thyristor principal TH1, C se décharge alors en inverse dans TH1 ce qui provoque son blocage immédiat.

Figure 108

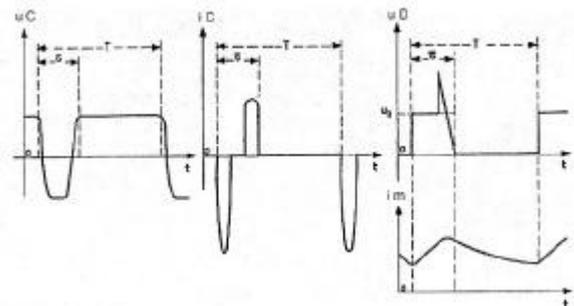
- En a), le thyristor hacheur TH1, que l'on nomme souvent "principal", a été bloqué (par le processus qui va être décrit en c) ci-dessous), on est en phase de "roue libre" dans la diode D) et l'on suppose le condensateur du circuit d'extinction chargé selon les polarités indiquées au cours de l'étape c) qui a précédé. A la mise en service du hacheur, la pré - charge de C sera obtenue par l'amorçage de TH2, préalablement à tout amorçage de TH1 bien entendu.

- En b), on amorce simultanément les thyristors TH1 et TH'1 (nommé thyristor d'"inversion"), ce qui conduit à la conduction du hacheur et à l'entrée en oscillation du circuit LIC d'extinction, laquelle oscillation se limite à une seule alternance du courant  $i_c$  puisque l'inversion de celui-ci provoque le blocage automatique de TH'1. Cette demi-oscillation a cependant permis l'inversion des polarités de la tension  $U_C$  ce qui était l'objectif à atteindre.

- En c), on déclenche l'extinction de TH1 en amorçant TH2 (thyristor dit d'"extinction"). La tension présente aux bornes du condensateur vient alors s'ajouter à la tension de la source ce qui dérive énergiquement le courant absorbé par la charge [ self de lissage - moteur ] en dehors du thyristor principal TH1. Ce dernier, privé de courant direct, se désamorce aussitôt et se voit appliquer en inverse la tension du condensateur qui lui fournit ainsi son courant inverse de recouvrement.

A l'issue de l'extinction de TH1, le condensateur continue sa décharge puis sa recharge sous la tension ligne via TH2 et le circuit [ self de lissage - moteur ], ce qui lui permet de retrouver les conditions initiales de la séquence a). Le blocage de TH2 s'opère à la fin de la recharge de C par annulation naturelle du

courant  $i_C$ , ce qui s'accompagne de la mise en conduction de la diode de "roue libre" D qui "rebouclera" le courant [ self de lissage - moteur ] jusqu'au prochain amorçage de TH1.



**Chronogrammes des tensions et courants théoriques** repérés à la figure 108. T est la période fixe de fonctionnement du hacheur, æ est le temps de conduction.

Figure 109

Les formes des tensions et courants :  $u_C$ ,  $i_C$ ,  $u_D$  et  $i_m$ , repérés sur les schémas de la figure 108, sont représentés à la figure 109. On remarquera que la diode de "roue libre" D est soumise à une pointe de tension inverse d'environ le double de la tension d'alimentation  $U_0$ , son calibre en tension devra en tenir compte ; quant au moteur, il est "protégé" par la self de lissage, aux bornes de laquelle se retrouveront la surtension transitoire de commutation et la composante alternative de l'ondulation de la tension de sortie du hacheur. Le moteur n'aura pratiquement, à ses bornes, que la composante continue, il ne supportera pas de contrainte diélectrique particulière.

Caractéristiques des semi-conducteurs utilisés :

L'extinction du thyristor principal TH1, explicitée ci-dessus, s'opère donc par la dérivation de son courant direct pendant toute la durée du blocage définie par sa caractéristique tq (ou toff).

Le condensateur d'extinction C doit donc posséder assez d'énergie pour ce faire. Cela s'exprime assez simplement par la relation :

$$CU \geq I_m t_q \text{ ou } C \geq \frac{I_m t_q}{U}$$

(où  $I_m$  est le courant maxi à couper,  $t_q$  le temps de blocage du thyristor et  $U$  la tension de charge inverse du condensateur).

L'obligation de limiter le nombre et la taille des condensateurs d'extinction (valeurs de  $C$  et de  $U$ ) donne, pour un courant  $I_m$  déterminé, une grande importance au  $t_q$  des thyristors hacheurs.

Si, en redressement, l'on peut utiliser sans difficulté des thyristors dits "lents", dont les  $t_q$  sont de l'ordre de quelques centaines de  $\mu s$ , il n'en est pas de même dans les applications en courant continu, du type "hacheurs", où la nécessité de  $t_q$  beaucoup plus faibles (environ dix fois moindres) est apparue immédiatement.

Toujours au sujet des thyristors, il faudra aussi veiller à ce que les vitesses de croissance des courants ( $di/dt$ ), qui apparaissent au moment de l'amorçage des thyristors, ne dépassent pas leurs possibilités ; des selfs spéciales de limitation de ces  $di/dt$ , utilisant des circuits magnétiques à base de "ferrites" seront parfois nécessaires. Les contraintes en  $dV/dt$  devront aussi rester dans les caractéristiques des thyristors, elles seront atténuées par les circuits RC de protection et d'équilibrage dynamique montés aux bornes de chaque thyristor d'une file.

En ce qui concerne les diodes de "roue libre", on constate qu'elles doivent supporter environ le double de la tension caténaire au moment où l'on déclenche l'extinction ; le dimensionnement en tension du bras devra tenir compte de cette contrainte propre au schéma utilisé pour assurer l'extinction des thyristors principaux. Là aussi les circuits RC seront mis à contribution pour équilibrer dynamiquement les tensions inverses appliquées et réduire les surtensions de commutation qui seront aussi minimisées par l'emploi de diodes "rapides", à faible  $qrr$ .

Au début des années 1970, les fabricants de semi-conducteurs, CDSW par exemple, ont proposé des thyristors "rapides" dont les  $t_q$  descendaient jusqu'à une vingtaine de  $\mu s$ . Cependant, ces thyristors "rapides" ne seront pas capables de performances en tension et en courant aussi élevées que leurs homologues "lents" de mêmes taille et technologie.

Ils ont permis la réalisation des premiers hacheurs de traction de la SNCF telles les expérimentations :

- JEUMONT-SCHNEIDER sur Z 4001 et 4002 (hacheurs de 375 kW)
- BBC-CEM sur Z 4203 (450 k)

- OERLIKON sur BB 17 (hacheur "multi-phases" de 1200 kW)
- JEUMONT-SCHNEIDER sur le couplage CC 20002/BB9252 (hacheur "multi-phases" de 4400 kW).

Ces hacheurs expérimentaux, tous installés sur des engins moteurs d'ancienne génération, seront décrits par la suite. Quant à la *figure 110*, elle montre un exemple de sous-ensemble de 2 thyristors utilisé par la suite sur des matériels de série.



Tiroir "standard" de 2 thyristors de 3" équipant le hacheur de traction des éléments "MI79" de la SNCF et de la RATP circulant, en particulier, sur la ligne B du RER Ile de France.

( cliché extrait de "technique CEM" n°109 - septembre 1980 )

**Figure 110**

Parallèlement aux études des premiers hacheurs de traction, les constructeurs ont travaillé sur des convertisseurs auxiliaires de relativement faible puissance (20 kW maxi), donc plus faciles à réaliser, dont on avait aussi grand besoin sur les matériels à courant continu pour charger correctement les batteries et alimenter avec souplesse, en fonction des besoins, donc économiquement, les indispensables moto-ventilateurs mais aussi les inducteurs des moteurs de traction lorsque l'on veut facilement contrôler le freinage électrique rhéostatique ou par récupération.

Obtention de faibles tensions au démarrage :

On a déjà évoqué assez sommairement cette question un peu plus haut où l'on a indiqué deux solutions possibles, à savoir :

- Le fonctionnement en sous-fréquences dans les cas, des hacheurs de fortes puissances en particulier, où l'on a une configuration "multi-phases".
- L'utilisation d'un hacheur "vernier", plutôt réservé aux faibles puissance ( automotrices ) quand les caractéristiques des moteurs sont telles que le courant de démarrage délivré par le hacheur principal à son ouverture minimale est inacceptable, pour des raisons de confort en particulier.

A titre indicatif, il faut savoir qu'un moteur de traction de 2200 kW (du type TAB 666 des BB 15000, par exemple) a une résistance interne de l'ordre de 20 mΩ ; si l'on souhaite ne pas dépasser 400 A aux vitesses très réduites (démarrages, accostages et autres manoeuvres), cela demande une tension minimum de 8 V qui, à une fréquence de découpage de 300 Hz et avec 1500 V à la caténaire, correspond à une mise sous tension impulsionnelle du moteur de 17μs. De telles durées de conduction minimum ne sont pas possibles à obtenir avec des circuits d'extinction, tels que celui du schéma étudié plus haut, dont la demi-période d'oscillation est d'environ 230 μs. Avec des temps minimum de conduction de cet ordre, pour un hacheur élémentaire, seule l'utilisation de fréquences de découpage sous-multiples du 300 Hz (F/27, F/9, F/3 par exemple) permettra le démarrage à faible tension ; le choix des diviseurs du 300 Hz doit, bien entendu, tenir compte du nombre de hacheurs élémentaires entrelacés qui, quel que soit leur mode d'entrelacement, ne doivent pas générer, même en situation dégradée (isolement de certaines phases), de fréquences interdites par les circuits de signalisation.

Dans le cas des matériels dont la relativement faible puissance ne justifie pas l'emploi de hacheurs de traction "multiphasés", la solution du hacheur "vernier" est une solution pour obtenir de faibles tensions de démarrage.

Schématiquement, il s'agit d'un simple thyristor HV, mis en série avec un hacheur principal classique HP, tel que le montre la *figure 111*.

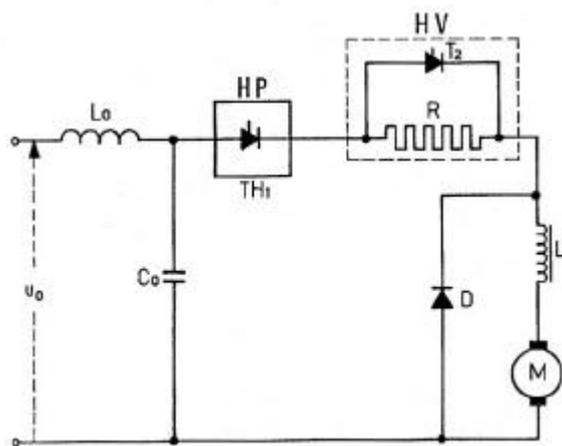


Schéma simplifié du dispositif à hacheur "vernier" HV à un seul thyristor T2. Le hacheur principal HP est représenté sous sa forme la plus dépouillée.

**Figure 111**

En fonctionnement classique, le thyristor T2 du vernier HV est amorcé en même temps que HP et il sera bloqué tout naturellement à l'extinction de HP ce qui le rend tout à fait "transparent".

A l'opposé, si l'on ne commande pas HV, la résistance R limitera considérablement le courant moteur mais permettra toutefois la recharge du condensateur d'extinction du hacheur principal et le

bon déroulement du cycle détaillé plus haut. L'amorçage de HV pourra se faire à tout moment durant le cycle de conduction de HP, même à un instant très proche de l'extinction, on pourra ainsi appliquer la pleine tension au moteur durant de brefs instants et obtenir ainsi les faibles tensions de démarrage souhaitées.

Une variante de ce schéma, mais sans résistance parallèle au thyristor vernier, est utilisée sur les 150 rames interconnexion "MI79" de la SNCF et de la RATP (*figure 112*), sorties entre 1980 et 1982, dont l'équipement électrique (moteurs, hacheur de traction, convertisseur auxiliaire, etc...) a été conçu et fabriqué par la Société T.C.O. (Traction CEM-OERLIKON).

D'une puissance de 2960 kW, ces éléments à 8 moteurs de traction fonctionnent sous 25 kV 50 Hz et 1500 V = ; le réglage de tension des moteurs est obtenu par un hacheur dans les 2 configurations, seul un ensemble transformateur-redresseur précède le hacheur en monophasé.



Vue de l'un des 150 éléments bi-courant "MI79" de 2960 kW de l'interconnexion SNCF-RATP. Ces rames circulent, en particulier, sur la ligne B du RER - Ile de France.

( cliché extrait d'une fiche d'origine T.C.O. )

**Figure 112**

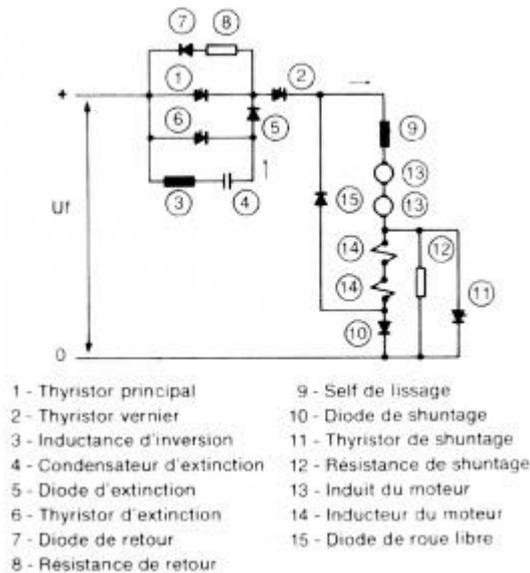
Le schéma de la partie hacheur de traction est représenté à la *figure 113*. Bien qu'anticipant sur la chronologie d'apparition des matériels, son intéressante description trouve, tout naturellement, sa place ici.

Le circuit d'extinction du hacheur principal est un peu différent de celui décrit précédemment puisqu'il ne comporte qu'un seul thyristor (6), dit d'extinction, mais qui fait aussi fonction de thyristor d'inversion de la charge du condensateur (4).

L'extinction du thyristor principal (1) survient tout de suite après cette inversion, donc à la fin de la première demi-période oscillatoire, le courant s'annule puis s'inverse à nouveau, il y a alors blocage du thyristor (6) puis l'oscillation se poursuit via la diode (5) et le circuit moteur [ self de lissage (9) - moteurs de

traction (13) ], dérivant ainsi le courant du thyristor principal qui se désamorce.

Lorsque le courant oscillatoire devient supérieur au courant moteur (la self de lissage s'opposant à une augmentation rapide), la demi-oscillation se poursuit par la diode (7), anti-parallèle au thyristor (1) et la résistance série (8) dont le rôle est de développer une tension inverse aux bornes du thyristor principal destinée à confirmer son blocage, supérieure à celle obtenue avec la seule diode (7).



**Schéma du hacheur principal TCO des rames "MI79" de 2960 kW.** Il s'agit d'un matériel commun SNCF-RATP exploité, en particulier, sur la ligne B du réseau RER d'Ile de France.

(extrait de "techniques CEM" n°109 - septembre 1980)

**Figure 113**

Le thyristor vernier (2) qui, lorsque le hacheur principal fonctionne comme tel, est amorcé en même temps que le thyristor principal, s'éteint naturellement lorsque la demi-oscillation de recharge du condensateur est terminée.

Au début du démarrage, on fonctionne en mode "vernier", le thyristor principal (1) ne sera pas allumé, mais on aura fait en sorte que le condensateur d'extinction ait bien été chargé initialement (en l'occurrence par amorçage du "vernier" (2), comme nous allons le voir).

Le thyristor (6) est amorcé pour inverser la charge du condensateur, la deuxième demi-oscillation provoque son extinction comme vu ci-dessus, se poursuit par (7) et (8), puis la recharge du condensateur se fait, au besoin, par amorçage du thyristor (2), et le circuit moteur ; le "vernier" se re-bloque dès que cette recharge, sous la tension  $U_f$ , est terminée.

Le courant moteur est, au minimum, le courant de compensation des pertes du circuit LC d'extinction provoquées par les cycles d'inversions successives de la charge du condensateur, il peut donc être relativement

très faible si l'on ne commande le vernier que pour cette compensation.

A l'opposé, le courant moteur augmente si le "vernier" (2) est amorcé plus tôt dans le cycle d'inversion donc si son amorçage se rapproche de celui du thyristor d'extinction (6). Cela est pratiqué progressivement au cours du démarrage, jusqu'à ce que l'on puisse commencer à allumer le thyristor principal (1) avec son temps de conduction minimal.

On quitte alors le mode "vernier" pour passer en hacheur classique à fréquence de découpage fixe et taux de conduction variable, les thyristors (1) et (2) sont alors amorcés simultanément.

Autres fonctions permises par les hacheurs de traction :

- La réduction de champ

Le schéma du hacheur des rames "MI79" (figure 111) comporte aussi un système statique de "shuntage" des inducteurs à variation continue. Il s'agit du thyristor (11), de la diode (10) et de la résistance de shuntage permanent (12) ; dispositif qui s'apparente à celui mis en oeuvre en redressement monophasé et qui a été développé antérieurement (*La Revue 3EI n°29, p.75*).

Le "shuntage" est mis en action lorsque le moteur est alimenté en pleine tension, donc à l'ouverture maximale du hacheur principal ; on peut, en principe, amorcer le thyristor (11), dit de "shuntage", dès que les thyristors hacheurs, (1) et (2), sont commandés.

Le courant moteur est alors dérivé des inducteurs jusqu'au blocage des thyristors hacheurs. En effet, lorsque le courant total [ self de lissage - moteur ] tente de se re-boucler par la diode de "roue libre" (15), la part de ce courant qui est dérivée par le thyristor (11) ne peut suivre car la diode (10) s'y oppose, le thyristor de shuntage se désamorce donc naturellement, pratiquement en même temps que les thyristors hacheurs.

Le taux de réduction de champ est fixé par le retard d'amorçage du thyristor de shuntage vis à vis de la mise en conduction des thyristors hacheurs.

- Le freinage rhéostatique modulé

L'ensemble des composants constituant le hacheur principal peut être déconnecté du filtre d'entrée, alimenté par la caténaire, et ramené au "pied" du circuit [ self de lissage - moteur ], tandis qu'une résistance de freinage est insérée dans le circuit de la diode de roue libre. Le schéma de la figure 114 représente cette disposition.

Lorsque le hacheur est passant, il court-circuite momentanément la résistance de freinage et fait donc monter le courant débité par le moteur de traction, lequel retombe à la valeur fixée par la résistance.

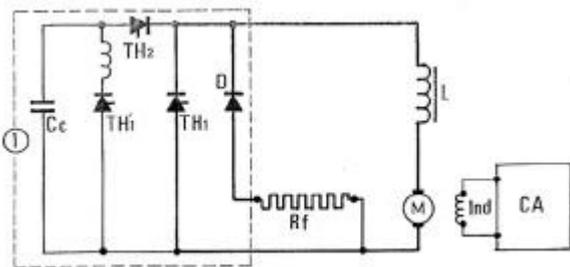


Schéma de principe du freinage rhéostatique avec hacheur de "modulation" de la résistance Rf. Le moteur fonctionne en excitation séparée, CA étant le convertisseur auxiliaire d'alimentation des inducteurs.

**Figure 114**

En valeur moyenne, tout se passe comme si la valeur de la résistance de freinage avait une valeur pouvant varier entre sa valeur nominale et une valeur très faible (déterminée par le taux d'ouverture maximum du hacheur). L'expression suivante en donne la valeur apparente :

$$R_a = R \frac{T - \tau}{T}$$

(où R est la valeur nominale de la résistance, T la période de découpage et  $\tau$  le temps de conduction )

**- Le freinage électrique par récupération**

Si en traction sous tension monophasée, on parvenait à créer une contre-tension variable, qui s'opposait à la tension continue développée par le moteur de traction fonctionnant en génératrice, en faisant fonctionner un redresseur à semi-conducteurs contrôlés en onduleur, il n'en est pas de même sous caténaire à courant continu. La récupération n'est, en effet, possible que si la tension du moteur générateur, vue par la caténaire, est supérieure à celle de cette dernière.

Sur les engins classiques à rhéostat, cela n'est pas réalisable facilement et en toute sécurité. Avec l'apparition des hacheurs de traction, on a pu imaginer des combinaisons de schémas où ces derniers fonctionnent en "hacheurs élévateurs" de tension. Le schéma représenté à la *figure 115* en est l'exemple typique.

On y retrouve l'ensemble hacheur, désormais classique, qui, lorsqu'il est amorcé, met en court-circuit le moteur de traction sur sa self de lissage L, le courant s'accroît alors et emmagasine de l'énergie (de freinage) dans cette self ; au moment de l'extinction du thyristor hacheur, le courant dans la self s'interrompt brutalement, celle-ci développera une tension qui, venant se mettre en série avec la tension de la source, permettra au courant moteur de se "re-boucler" par cette

source et la diode de roue libre D (avec interposition du filtre d'entrée Lo, Co).

Il y a bien fonctionnement du système en hacheur "élevateur" de tension et récupération de l'énergie de freinage, emmagasinée préalablement dans la self, par la caténaire.

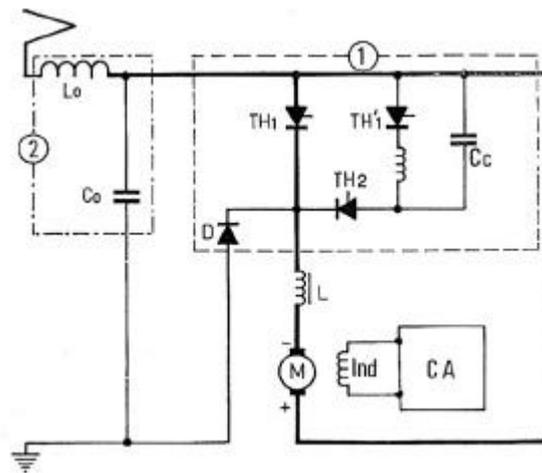


Schéma de principe du freinage par récupération avec hacheur fonctionnant en "élevateur" de tension. Comme en freinage rhéostatique, le moteur fonctionne avec excitation séparée ( inducteurs alimentés par le convertisseur CA )

**Figure 115**

Il reste à supposer, bien sûr, que les sous-stations d'alimentation de la ligne acceptent bien cette restitution d'énergie au réseau (sous-station équipée de redresseurs à thyristors fonctionnant en onduleurs, par exemple) ou, à la limite, que d'autres engins circulant, en traction obligatoirement et simultanément, sur la même ligne, absorbent cette énergie. Dans le cas contraire, des montées en tension incontrôlées de la caténaire sont très probables ; elles provoqueront le déclenchement de la protection en surtension de l'engin. Ce phénomène n'est bien sûr, pas à craindre en monophasé, où les simples transformateurs des sous-stations sont naturellement réversibles et le réseau de distribution, vu son importance, toujours à même, en principe, de pouvoir "récupérer".

**Bibliographie :**

- "Le hacheur en traction à courant continu" de A. COSSIE, SNCF - DETE, MCE - novembre 1977.
- "techniques CEM" n°109, septembre 1980.



Journées 2003 de la section Électrotechnique du Club EEA  
avec la participation des sections Électronique et Automatique

**Génie Électrique : réduction d'échelle et intégration**

12 et 13 mars 2003

Université de Picardie Jules Verne - AMIENS



*A l'heure où les systèmes deviennent de plus en plus compacts, il faut faire appel à des compétences pluridisciplinaires pour les concevoir, d'une part, et les réaliser d'autre part. Même à l'échelle micrométrique ou nano-métrique, les systèmes électromécaniques sont constitués d'éléments bénéficiant d'intégration à haute densité (VLSI), ils doivent être le plus autonome possible et surtout ils doivent être alimentés en énergie électrique. Le but de ces journées est de faire le point sur les technologies actuelles en terme d'intégration et de réduction d'échelle puis d'aborder des applications industrielles. La première journée est consacrée essentiellement à la réduction d'échelle en génie électrique avec les actionneurs linéaires ou rotatifs de l'échelle centimétrique à l'échelle moléculaire et même atomique ou cellulaire. La miniaturisation en électronique de puissance et en métrologie associée est également présentée sous l'aspect conversion statique. La seconde journée est consacrée à l'intégration en électronique de puissance et aux applications. Au-delà des aspects pluridisciplinaires du Génie Électrique, les journées Électrotechnique 2003 réunissent pour la première fois, les électrotechniciens, les électroniciens et les automaticiens. Nous osons espérer que cette manifestation suscitera des intérêts nouveaux et qu'elle permettra de nombreuses et fructueuses collaborations dans le domaine de l'EEA.*

**Une fois les détails d'organisation bouclés, les informations (détails, inscriptions...) seront disponibles sur le site Web du club EEA ([www.clubeea.org](http://www.clubeea.org))**

**Mercredi 12 mars**

- 10h15: "Un cas extrême de contact électrique miniature : l'AFM à pointe conductrice" -  
L. Boyer, P. Chrétien, F. Houzé, R. Meyer, O. Schneegans - LGEP - Gif sur yvette
- 10h45: "Microsystèmes à actionnement électrostatique: conception, modélisation et caractérisation"  
H. Camon, J.Y. Fourniols - LAAS - Toulouse
- 11h45: "Machines moléculaires : mécanique des molécules" - G. Rapenne - CEMES - Toulouse
- 12h15 : Déjeuner
- 14h15: "Contrôle d'élongation à l'échelle nanométrique d'un actionneur piézoélectrique de microscope à effet tunnel"  
D. Tonneau et al. - GPEC - Marseille
- 14h45: "Vers l'intégration de convertisseurs pour l'alimentation des micro-systèmes"  
J. L. Sanchez, C. Alonso, H. Camon, B. Estibal - LAAS - Toulouse
- 15h15: "Des mini-convertisseurs électromécaniques pour de nouvelles fonctionnalités"  
B. Nogarède - LEEI - Toulouse
- 16h15: "Macrocellule intégrée pour la mesure de courant avec isolation galvanique en technologie CMOS standard"  
L. Hébrard, V. Frick, P. Poure, F. Braun - LEPSI - Strasbourg
- 16h45: "Biopuces cellulaire"  
B. Le Pioufle, M. Frénéa, L. Griscom, A. Tixier - SATIE - Rennes
- 17h15 : Fin de la première journée et remise du trophée GUEDEFIN
- 18h30 : Réception et cocktail de bienvenue à l'Hôtel de Ville d'Amiens
- 20h30 : Départ en bus pour le repas de gala au Pré-Porus

**Jeudi 13 mars**

- 9h00 : "Évolution de l'intégration en électronique de puissance"  
F. Morancho, M. Breil - LAAS - Toulouse
- 9h30 : "Apport de la microthermie pour le refroidissement des systèmes"  
M. Ivanova, I. Avenas, C. Schaeffer - LEG / CIME - Grenoble
- 10h00 : "Remplacement des relais dans les voitures : contraintes et avantages du passage de la solution électromécanique à l'approche intégrée"  
L. Guillot - Motorola - Toulouse
- 11h00 : "Méthodologie d'intégration de commandes numériques pour dispositifs d'Électronique de Puissance basée sur l'utilisation du langage VHDL-AMS"  
P. Poure, R. Kadri, L. Hébrard, F. Braun - LEPSI - Strasbourg
- 11h30 : "Compatibilité électromagnétique et fonctions intégrées de puissance"  
D. Magnon - LMP/ST Microelectronics - Tours
- 12h00 : Déjeuner
- 14h00 : "Microrobotique : microrobots autonomes, intégration d'actionneurs / capteurs"  
A. Bourjault - LAB - Besançon
- 14h30 : "Problème de l'intégration de la puissance et de la transmission de données dans une microcapsule intestinale"  
R. Duffait - CTM - Besançon
- 15h00 : "Problèmes énergétiques pour les micromachines autonomes"  
P. Minotti - LMARC - Besançon
- 15h30 : "Endoscope à béquillage actif : intégration d'actionneurs / capteurs"  
P. Bidaud - LRP - Fontenay aux Roses
- 16h00 : Table ronde : Retombées en terme de filières d'enseignement
- 16h30 : Clôture des journées

**ORGANISATION**

**CREA - UPJV (UPRES EA 3299)**

Franck Béтин, Eric Brassart, Gérard-André Capolino, Laurent Delahoche, Richard Grisel, Humberto Henao, Bruno Mahric

**Secrétariat**

Université de Picardie - IUP GEII - 33 rue Saint Leu - 80 039 AMIENS Cedex 1

**Renseignements**

Gérard-André Capolino,

[Gerard.Capolino@u-picardie.fr](mailto:Gerard.Capolino@u-picardie.fr), Tél : 03-22-82-78-20

Richard Grisel,

[Richard.Grisel@u-picardie.fr](mailto:Richard.Grisel@u-picardie.fr), Tél : 03-22-82-70-55



**Ces journées sont organisées avec le soutien d'Amiens Métropole.**

# 3EI Enseigner l'Electrotechnique et l'Electronique Industrielle

c'est



- ❑ Une revue trimestrielle
- ❑ Un site web pour partager l'Enseignement du Génie Electrotechnique : <http://www.lesite3EI.com>

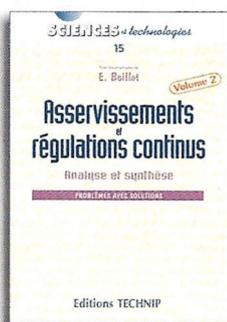
## Thèmes prévus pour l'année 2003

- ☞ **Micro-ondes de forte puissance - n° 32 (mars 2003)**
  - ☞ **L'électricité dans l'automobile - n° 33 (juin 2003)**
    - ☞ **Applications pédagogiques et réalités industrielles - n° 34 (septembre 2003)**
      - ☞ **L'énergie - n° 35 (décembre 2003)**

### Asservissements et régulations continus

#### Analyse et synthèse. Problèmes avec solutions

Des thèmes variés illustrés par des cas réels rencontrés dans l'industrie. Treize problèmes avec corrigés complets couvrent la majorité des sujets rencontrés en examen d'automatique dans les écoles d'ingénieurs. E. Boillot. *Broché*, 216 p. €32



### Asservissements et régulations continus

Vol. 2 **Nouveauté**

#### Analyse et synthèse. Problèmes avec solutions

Le second volume d'un ouvrage à succès.

Dix nouveaux problèmes d'automatique abordant des systèmes réels rencontrés dans l'industrie, avec leurs corrigés complets. E. Boillot. *Broché*, 240 p. €34

### Modélisation et commande de la machine asynchrone

Clair et rigoureux, l'ouvrage prend en compte les évolutions considérables de l'électrotechnique et permet d'appréhender les fondements du contrôle vectoriel.

J.-P. Caron, J.-P. Hautier. *Relié*, 304 p. €51

### Initiation à la programmation avec Scheme

Un langage de programmation dont la clarté des concepts et la simplicité de la syntaxe facilitent l'apprentissage, sans sacrifier rigueur ou puissance expressive. L. Bloch. *Broché*, 240 p. €32

### Estimation, prédiction

#### Éléments de cours et exercices résolus

Une présentation des méthodes et des exemples spécialement choisis en vue d'une application à des problèmes industriels.

E. Dufflos, Ph. Vanheegehe. *Broché*, 176 p. €27

**Nouveauté**

### Identification et commande numérique des procédés industriels

Les principales données théoriques et pratiques permettant de réussir l'application d'une commande numérique adaptative à un procédé industriel. R. Ben Abdennour, P. Borne, M. Ksouri, F. M'sahli. *Relié*, 256 p. €44

