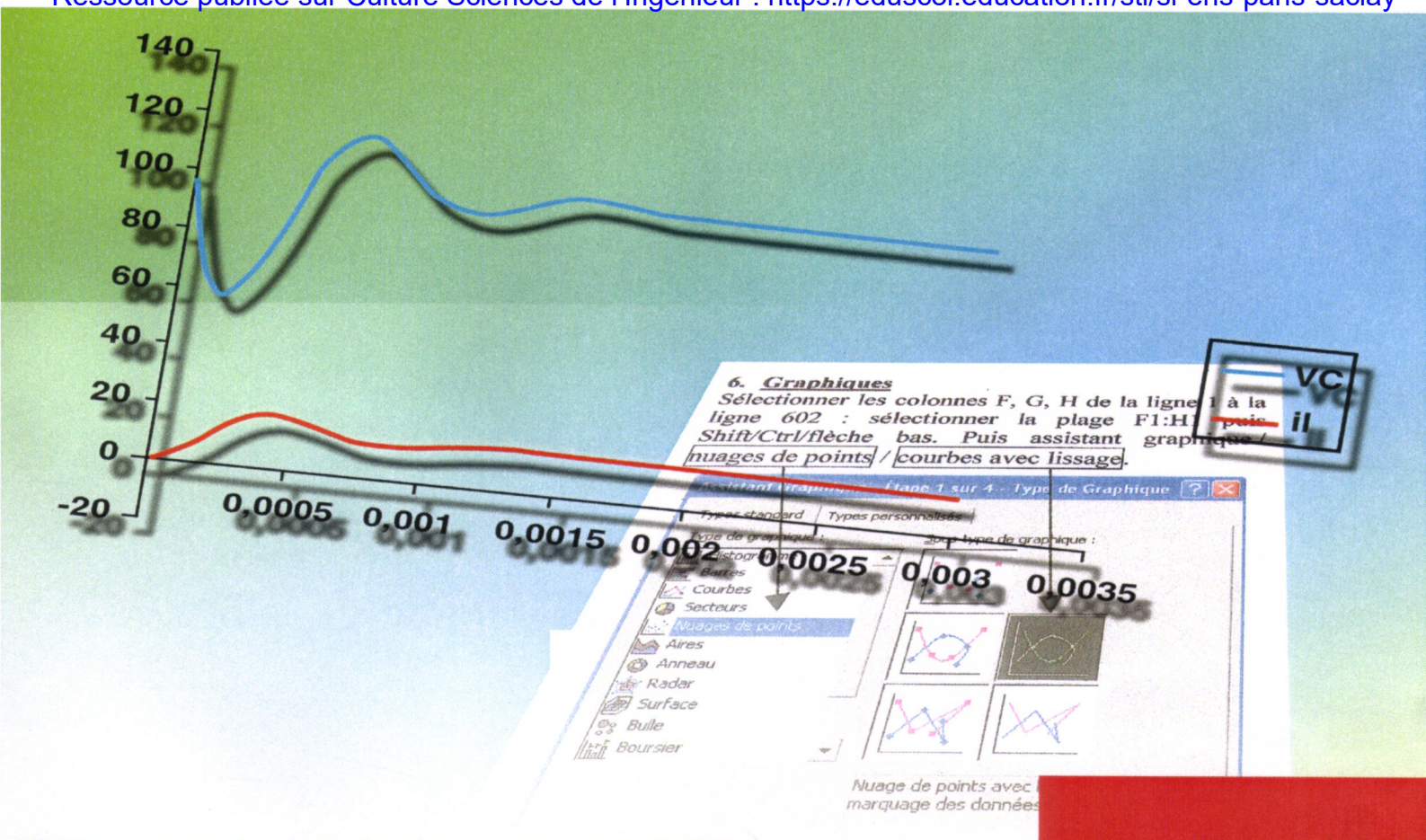
10e année

La Revue 3E.I

Ressource publiée sur Culture Sciences de l'Ingénieur : https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay



Suite de notre feuilleton !
L'évolution de l'électronique de puissance en traction ferroviaire

L'outil informatique dans l'Enseignement

Publication trimestrielle du Cercle Thématique 13.01 de la SEE

ENSEIGNER L'ELECTROTECHNIQUE ET L'ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE

see

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

N° 35 - Décembre 2003

Avion et électricité :
De l'électrotechnique haute performance

Université de Cergy-Pontoise
site de Neuville-sur-Oise, 18 et 19 mars 2004
Journées 2004 de la section électrotechnique du club EEA

A l'attention des enseignants, enseignants-chercheurs, industriels intéressés par les applications électrotechniques dans le domaine de l'avionique.

La part de l'énergie électrique au sein des avions est croissante. Les actionneurs hydrauliques sont remplacés par des actionneurs électriques plus performants et plus fiables. Cependant, l'accroissement des dispositifs électriques au sein des avions, outre les problèmes de conception des actionneurs et de l'électronique de puissance associée qu'il pose (fortes contraintes des systèmes embarqués : volume, poids, température, compatibilité électromagnétique…), génère également un important effort de recherche en matière de réseau de bord et ce, tant du point de vue de la génération de l'énergie électrique que de la gestion du réseau lui-même (stabilité, dépollution harmonique…).

Programme provisoire

Composant à semi-conducteur pour des applications à haute température de fonctionnement dans l'aviation
S. LEFEBVRE, Z. KHATIR**, L. DUPONT*, H. MOREL***, B. ALLARD***, D. PLANSON*** ; *SATIE, CNRS UMR 8029; **LTN INRETS; ***CEGELY, CNRS UMR 5005*

De l'avion plus électrique à l'avion tout électrique : état de l'art et prospective sur les réseaux de bord
O. LANGLOIS, E. FOCH*, X. ROBOAM**, H. PIQUET** ; *AIRBUS; **LEEI, CNRS UMR 5828*

Commande sans capteur mécanique des actionneurs embarqués
M. FADEL, JC HAPIOT*, G. GATEAU*, R. RUELLAND*, P. BRODEAU**, JM CARRION**, *LEEI, CNRS UMR 5828, **LIEBHERR AEROSPACE*

Actionneur linéaire pour pompe à carburant : conception, simulation et essais
B BONAFOS, F DUGUÉ**, M-C KARIMI*, J-C VANNIER*, P VIDAL* ; *Supélec ; **CSTM*

Contribution à l'étude de la stabilité des systèmes distribués - application au réseau de bord avion
R. MEURET, S. PIERFEDERICI**, F. MEIBODY-TABAR**, B. DAVAT** ; *HISPANO-SUIZA; **GREEN, CNRS UMR 7037*

Architectures segmentées d'alimentation à convertisseurs modulaires pour les actionneurs d'avion; fonctionnement en modes dégradés
*F. MEIBODY-TABAR *, R. MEURET ** ; * GREEN, CNRS UMR 7037 ; ** HISPANO-SUIZA*

Alternateur inertiel prévu pour être utilisé sur un véhicule de combat tout électrique
M. MARTINEZ, J.-Y. MIDY ; THALES AES

Actionneurs linéaires directs et indirects : performances limites
H. BEN AHMED, B. MULTON, P.E. CAVAREC ; SATIE Antenne de Bretagne, CNRS UMR 8029

Commande d'un système de génération électrique pour réseau de bord d'avion
F. KHATOUNIAN, E. MONMASSON*, F. BERTHEREAU**, J.P. LOUIS* ; *SATIE, CNRS UMR 8029 ; **Thales AES*

Influence des charges non linéaires dans les réseaux de bord: application aux réseaux d'avion
F. BARRUEL, J.L. SCHANEN, N. RETIERE, J. ROUDET; LEG, CNRS UMR 5529

Application d'un processeur dédié à la commande d'actionneurs électriques critiques en avionique
E. GILSON, J.P. CONARD*, F. LABRIQUE** ; *SABCA ;**UCL / LEI*

Protocole d'identification des sources équivalentes de mode commun dans les convertisseurs statiques
F. COSTA, C. VOLLAIRE**, R. MEURET*** ; *SATIE, CNRS UMR 8029 ; **CEGELY, CNRS UMR 5005 ; ***Hispano-Suiza*

Electronique de Puissance pour la Qualité de l'énergie des réseaux de bord d'avion
P. LADOUX, F. RICHARDEAU*, L. RAULIN** ;*LEEI, CNRS UMR 5828 ; **AIRBUS*

Machines polyphasées pour l'aéronautique : de la modélisation multimachine à la commande
E. SEMAIL, F. MEIBODY-TABAR**, M. BENKHORIS***, H. RAZIK**, M. PIETRZAK-DAVID****, E. MONMASSON*****, A. BOUSCAYROL*, B. DAVAT**, Ph. DELARUE*, B. de FORNEL****, J. P. HAUTIER*, J. P. LOUIS*****, S. PIEFEDERICI***
**L2EP Lille; **GREEN, CNRS UMR 7037, ***GE44 St-Nazaire, ****LEEI, CNRS UMR 5828, *****SATIE, CNRS UMR 8029*

Enjeu des actionneurs piézoélectriques faces aux applications aéronautiques
J.F. ROUCHON; LEEI, CNRS UMR 5828

Présentation d'une application de servo-actionneurs de commande de vol tout électrique
G. COTY; PRECILEC-LPMI

Organisation : IUP GEII de l'Université de Cergy-Pontoise avec le concours du Laboratoire SATIE (UMR 8029).
S. Allano, T. Beley, B. Busso, S. Lefebvre, J.Y. Le Huerou, J.P. Louis, E. Monmasson, S. Moreau, D. Vasic.
Les informations pratiques, le pré-programme détaillé ainsi que les bulletins d'inscription sont disponibles sur le site web des journées : **http://www.u-cergy.fr/jeltk_eea_2004**

Secrétariat : IUP GEII, rue d'Eragny, Neuville-sur-Oise, 95031 Cergy-Pontoise Cedex
Tel : 01 34 25 69 00, Fax : 01 34 25 69 01
Renseignements : Éric MONMASSON, **eric.monmasson@iupge.u-cergy.fr**, Tel : 01 34 25 68 91

La Revue 3EI

publication trimestrielle
du ***Cercle Thématique 13-01***
de la SEE

SOCIETE de l'ELECTRICITE, 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
site web : www.see.asso.fr

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

3EI : Enseigner l'Électrotechnique et l'Électronique Industrielle.

La Revue 3EI, Édition SEE,
17 rue Hamelin
75 783 PARIS CEDEX 16

Directeur de la publication
Jean-Gabriel REMY
Président de la SEE

Rédacteur en Chef
François BOUCHER

Adresser les propositions d'article à
F. Boucher : revue3ei.art@voila.fr

Publicité en Régie
MISTRAL MEDIA
Directeur commercial :
Luc LEHERICY
72 avenue du Dr Arnold NETTER
75 012 PARIS
Tel : 01 40 02 99 00
Fax : 01 40 02 99 01

Abonnement *(4 numéros par an)*
déc. 2003, mars, juin, sept. 2004.

tarifs TTC :

Individuel :
France et CEE……..32 €
Pays hors CEE……..42 €

Collectivités
France et CEE……48 €
Pays hors CEE……...63 €

Réalisation et impression
Repro-Systèmes
23, rue de Verdun 77 181 Le Pin

Routage et Expédition
Départ Presse
ZI les Richardets
93 966 Noisy le Grand

Dépôt Légal : décembre 2004

Commission Paritaire
1207 G 78028

ISSN 1252-770X

Sommaire du n°35

Thème : Utilisation de l'outil informatique dans l'enseignement

p. 2 Éditorial,
p. 3 Informations 3EI, Publications.

Thème

p.8 Utilisation des outils de simulation pour une approche pédagogique en électronique de puissance.
Philippe LADOUX, Hubert PIQUET,
F. RICHARDEAU, LEEI-ENSEEIHT, 31 071 Toulouse,
O. TOURY, POWERSYS, 13 650 MEYRARGUES.

p.16 Calcul de champ magnétique: Logiciel FEMM et méthode analytique.
S. CANAT, J. FAUCHER, LEEI-ENSEEIHT, 31 071 Toulouse.

p.23 Visualisation de courbes avec variation paramétrique active sous EXCEL.
C. MONTEIL, ENSAT-INP, 31 071 Toulouse,
M. METZ, ENSEEIHT-INP, 31 071 Toulouse.

p.27 Logiciels libres en section de TS Électrotechnique.
J.-Ph. ILARY, Lycée Jules FERRY, 78 000 Versailles.

Applications pédagogiques

p.31 La simulation en électrotechnique avec PSIM.
F. LEPLUS, Lycée CARNOT, 62 022 Arras.

p.38 Champs tournants.
M. MEUNIER, P. BASTARD, Supélec, 91 192 Gif sur Yvette.

p.39 Commande de convertisseur à modulation de largeur d'impulsion.
P. BASTARD, Supélec, 91 192 Gif sur Yvette.

p.40 Étude d'un variateur d'éclairage.
B. DOUINE, D. NETTER, GREEN-UHP, 54 506 Vandoeuvre ,
P.LOOS, Lycée STANISLAS, 54 600, Villers les Nancy.

p.45 Fiches de TP
1 Exemples d'utilisation du logiciel Pspice ; 2 Simulations avec Psim.
Ph. ABBO, Lycée JACQUARD, 75 019 Paris.

p.49 Projet pluridisciplinaire : traitement de la pollution azotée et carbonée dans le lisier de canards. Automatisation du procédé et utilisation d'un outil communicant.
P. DEREUMAUX, E. ALLENT, M. A. CAILLET, M. GUALANDI, 04 000 Digne les Bains ;
Ch. DRAKIDES, Lab. Hydroscience, Université Montpellier 2,Th. MOULIN, société Aquaétudes.

Recherche et développement

p.56 Le redresseur MLI en absorption sinusoidale de courant.
N. BERNARD, B. MULTON, A. BEN AMHED, ENS-CACHAN, Antenne de Bretagne, 35 170 Bruz.

Histoire des sciences et des techniques

p. 66 L'évolution de l'électronique de puissance en traction ferroviaire : l'ère des thyristors, leurs applications en traction à moteur sans collecteur.
Ch. LECLERC, Ingénieur Honoraire de la SNCF

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'oeuvre 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).

L'outil informatique dans l'enseignement, continuez à nous faire part de votre travail et de vos expériences.

La dixième année de parution de La Revue 3EI débute par ce numéro 35 dont le thème est consacré à l'utilisation de l'outil informatique dans l'enseignement. Nous espérons que la lecture des articles proposés incitera les lecteurs à nous faire part de leurs expériences, en nous rédigeant de futurs articles à publier (d'autres articles, sur ce thème, nous sont promis et paraîtront prochainement).

Adressez vos propositions d'articles à François BOUCHER, à l'adresse

Revue3ei.art@voila.fr

Journées " Électrotechnique" du club EEA.

Chaque année, le ***Club EEA****, organise* ***les journées "Électrotechnique"*** *; les prochaines se tiendront les 18 et 19 mars à Cergy (Val d'Oise) sur le thème "****l'avion et l'électricité****" ; le programme prévisionnel figure en page II de couverture. Vingt places sont réservées, à tarif préférentiel, aux professeurs de l'enseignement secondaire, les informations sont à lire en page 30.*

Pour sa dixième année de parution,

La Revue 3EI *fait évoluer sa présentation. Cette évolution continuera prochainement nous l'espérons, avec l'apport de la couleur dans quelques pages ; évolutions liées à la présence de publicité mais aussi au nombre d'abonnements individuels ; pour ce dernier point, vous pouvez aussi, cher lecteur, contribuer à la diffusion de votre revue, en la faisant connaître autour de vous ; nous vous en remercions par avance.*

La Revue 3EI

Comité de publication

Jean BONAL
François BOUCHER
Jean-Claude BOUDENOT
Gérard DELAVIER
Lucien DESCHAMPS
Jean FAUCHER
Gilles FELD
François FOREST
Brigitte GRELAUD
Jean-Philippe ILARY
Chérif LAROUCI
Michel LAVABRE
Marie Michèle LE BIHAN
Pascal LOOS
Michel MEUNIER
Bernard MULTON
Claude OBERLIN
Oviglio SALA
Jean-François SERGENT

Site WEB 3EI
(http://www.lesite3EI.com)

Responsable :
Philippe LE BRUN

Jean-Pierre TAREL
Jean-Philippe ILARY

Pour vos insertions publicitaires, contacter :

MISTRAL MÉDIA

Vivian FAVRO
72, Av^{e} du D^{r} Arnold NETTER
75 012 Paris
Tel : 01 40 02 99 00

Abonnement à la Revue 3EI, année 2003-2004 :
Numéros : 35 (décembre 2003), 36 (mars), 37 (juin) et 38 (septembre 2004).

Abonnement individuel :		***Abonnement collectif souscrit par bon de commande (bibliothèque, CDI, laboratoire, entreprise, etc.)***	
France et Pays de la CEE :	*32 €, TTC*	*France et Pays de la CEE :*	*48 €, TTC*
Pays hors CEE :	*42 €, TTC*	*Pays hors CEE :*	*63 €, TTC*

Une seule adresse :

La Revue 3EI - SEE,
17, rue Hamelin, 75 783 PARIS Cedex 16

pour nous contacter au sujet de votre abonnement écrivez à
revue3ei.cour@voila.fr

JEAN PICHOIR (1919-2002)

Monsieur Jean PICHOIR est mort le 21 août 2002. Avec lui disparaît une des figures marquantes de l'enseignement de l'électrotechnique en France. Il nous a semblé normal de rappeler ici quelques points de sa carrière et du rôle qu'il a joué dans notre enseignement.

Né en décembre 1919 à Chatillon-Bazois, dans la Nièvre, il est reçu au concours de l'ENSET en 1939. En raison de la guerre, il ne peut entrer immédiatement dans cette École et part enseigner la physique à l'École Nationale Professionnelle d'Armentières, près de Lille. Puis il entre à l'ENSET et en obtient le diplôme en 1942; il est nommé professeur à l'ENP de Nancy. Tout en enseignant, il suit les cours de l'Institut d'Électrotechnique et de Mécanique Appliquée de Nancy; il obtient le diplôme d'ingénieur IEN en 1944. En septembre 1945, il passe et réussit le concours de Professeur des Arts et Métiers, et, à sa demande, est nommé professeur d'électrotechnique à l'École Nationale Technique de Strasbourg.

Il devait faire toute sa carrière dans cette École qui s'est appelée ensuite École Nationale d'Ingénieurs Supérieure des Arts et Industries de Strasbourg. En 1971, il prend la direction de cet Établissement et l'assure jusqu'à son départ en retraite en 1983. Il a laissé à tous ses anciens élèves le souvenir d'un excellent pédagogue, très attentif à ses étudiants qui l'estimaient beaucoup, le souvenir d'un directeur compétent et efficace, sachant prendre des décisions, les expliquer et les mener à leur terme. Il a énormément apporté au renom de cette École dont il était si fier.

Si Jean PICHOIR a été une personnalité marquante de la région strasbourgeoise où il a été amené à prendre de nombreuses responsabilités il était aussi bien connu de tous les électrotechniciens français notamment pour ses ouvrages scientifiques et son rôle à l'Agrégation de Physique Appliquée.

Il a publié aux éditions Masson un cours d'électrotechnique destiné à l'Enseignement Technique Supérieur, composé de quatre volumes, l'un d'électricité générale, le second traitant des courants alternatifs, les deux derniers des machines électriques. Ces ouvrages ont longtemps servi de référence, notamment en ce qui concerne la caractérisation des machines polyphasées.

Il a été longtemps membre puis président du jury de l'Agrégation de Physique Appliquée. Les nombreux collègues qui l'ont connu à l'oral de ce concours ne sont pas près d'oublier ce bourguignon à la voix haute ne comprenant pas qu'on ne comprenne pas l'électrotechnique et le disant. Qu'ils sachent que de même qu'il faut se méfier des examinateurs trop gentils car les plus intraitables lors des délibérations, Monsieur PICHOIR était très attentif aux problèmes des candidats et compréhensif devant les difficultés à assimiler un programme très vaste.

C'était en effet un homme qui sous son franc parler cachait une grande bonté. Ceux qui ont eu la chance d'être ses amis ont toujours été touchés de sa fidélité et de la délicatesse de son attention.

Guy SEGUIER

La REE, revue professionnelle incontournable dans le domaine de l'***Électricité***, de l'***Électronique*** et des ***NTIC***, propose à ses lecteurs des articles diversifiés regroupés sous forme de "***Dossiers***" et "***Repères***", des entretiens, des rubriques pratiques, des analyses : une somme d'informations les plus actuelles, une ***matière éditoriale*** de haute tenue, une large partie ***magazine*** et ***nouveaux produits***.

10 numéros par an *(dont 1 numéro double)* **pour 10 "dossiers thématiques" et 10 "repères" de qualité, conçus pour ceux et par ceux qui font la profession.**

Revue de la SEE
17, rue Hamelin
75783 Paris Cedex 16 - FRANCE
Tél : 33 (0)1 56 90 37 12
Fax : 33 (0)1 56 90 37 19
www.see.asso.fr

Editeur :
EDP SCIENCES
17, av. du Hoggar - BP 112
91944 Les Ulis Cedex A - FRANCE
www.edpsciences.org/REE
Tél : 33 (0)1 69 18 75 75 -
Fax : 33 (0)1 69 86 06 78
Subscribers@edpsciences.org

Abonnement 2004
Coupon à retourner à EDP Sciences, 17 av. du Hoggar - BP 112 91944 Les Ulis Cedex A - France

Oui je m'abonne à la REE.
10 Numéros (dont un numéro double)
(ISSN : 1265-6534)
❒ France & UE 149 € (TVA 2,10% incluse)
❒ Reste du monde 155 € (Prix HT)

Nom et prénom (ou raison sociale) : .....
Service/département : .....
Activité (facultatif) : .....
Adresse : .....
Code postal : .....
Ville : .....
Pays : .....
e-mail : .....
Je règle par : ❒ chèque à l'ordre de la SEE/Revue 3 E.I.
❒ carte bancaire (visa, Eurocard, American Express)
N° carte : |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_|
Date de validité : |_|_| |_|_| |_|_|
Signature et cachet : Date : |_|_| |_|_| |_|_|

Conformément à la Loi Informatique et Libertés du 06/01/1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux informations qui vous concernent. Contacter le Service Gestion des Adhésions de la SEE (adhesion@see.asso.fr ou Tél. : 01 56 90 37 12).

SUPÉLEC, FORMATION CONTINUE, STAGES DE MARS - AVRIL 2004

SCIENCES DE L'INFORMATION ET DE L'ÉNERGIE : ÉLECTROTECHNIQUE ET GÉNIE ÉLECTRIQUE

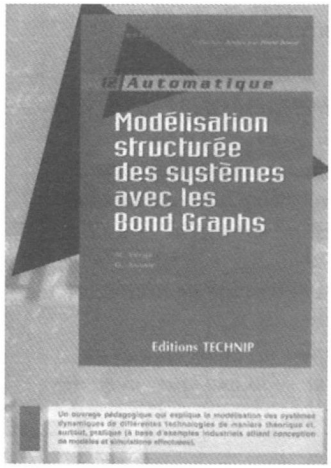
STAGE PRÉPARATOIRE : BASES DE L'ÉLECTROTECHNIQUE			**GIF-SUR-YVETTE**
Étude des fonctions et des composants essentiels de l'électrotechnique : systèmes magnétiques, systèmes triphasés équilibrés, champs tournants, transformateurs monophasés et triphasés, machines tournantes (à courant continu, à courant alternatif), moteurs pas à pas et à réluctance variable, notions d'électronique de puissance. **Responsable** : B. BONAFOS **Référence** : PG 334	10 jours	du 1er au 5 mars et du 15 au 19 mars 2004	2194 € HT
ALIMENTATIONS À DÉCOUPAGE : ÉTAT DE L'ART ET PERSPECTIVES			**GIF-SUR-YVETTE**
Point sur la théorie et les techniques de conversion, les structures et familles de convertisseurs existants et envisageables, les technologies appropriées, les méthodes d'analyse, de conception et de dimensionnement ; perspectives. **Responsable :** D. SADARNAC **Référence :** BG 415	5 jours	du 29 mars au 2 avr.04	1 386 € HT

SCIENCES DE L'INFORMATION ET DE L'ÉNERGIE : ÉLECTRONIQUE - MICROÉLECTRONIQUE – OPTOÉLECTRONIQUE

BASES DE L'ÉLECTRONIQUE			**GIF-SUR-YVETTE**
Étude des fonctions et des composants essentiels de l'électronique ; l'accent est particulièrement mis sur les objectifs, les techniques et les aspects pratiques. Les principales fonctions de l'électronique analogique et numérique sont discutées. Applications à la conversion, à l'alimentation, aux hautes fréquences et à l'optoélectronique. **Responsable** : Z. TOFFANO **Référence** : BG 186	5 jours	du 15 au 19 mars 2004	1 368 € HT
SYSTÈMES NUMÉRIQUES : ARCHITECTURE ET CONCEPTION			**RENNES**
Présentation des différentes familles logiques et des circuits logiques élémentaires, étude de l'architecture des systèmes programmés et des microprocesseurs, présentation des différentes méthodes de conception. **Responsables** : M. MATHIEU - P. LERAY **Référence** : ER 113	5 jours	du 8 au 12 mars 2004	1 349 € HT
NOUVELLES TENDANCES EN ÉLECTRONIQUE ANALOGIQUE			**GIF-SUR-YVETTE**
Vue d'ensemble sur les techniques de pointe de l'électronique analogique : potentialités des technologies silicium, des technologies AsGa, nouvelles structures en électronique analogique, ASIC analogiques et mixtes, circuits micropuissance, circuits"smart power"... **Responsable** : A. GAUTHIER **Référence** : EG 112	4 jours	du 16 au 19 mars 2004	1 252 € HT
LES COMPOSANTS ÉLECTRONIQUES ET LEUR FIABILITÉ			**GIF-SUR-YVETTE**
Étude de l'origine des défaillances des composants et des méthodes de contrôle de qualité et d'essais qui en découlent. Présentation des propriétés spécifiques à chaque famille de composants, des méthodes de traitement statistique des résultats et des méthodes de calcul de fiabilité des systèmes. Aspect normatif. **Responsables** : J-C. GOURDON – A. BONNOIT **Référence** : EG 238	5 jours	du 22 au 26 mars 2004	1 420 € HT
CONCEPTION AVANCÉE DE SYSTÈMES NUMÉRIQUES			**GIF-SUR-YVETTE**
Présentation des méthodes de conception, de simulation et de test des systèmes numériques (FPGA, ASIC, cartes). Une part importante du stage est consacrée à un mini-projet mettant en oeuvre les différentes étapes de la conception d'un circuit en langage VHDL. **Responsable** : PH. BÉNABÈS **Référence** : EG 507	5 jours	du 26 au 30 avril 2004	1 396 € HT

SCIENCES DE L'INFORMATION ET DE L'ÉNERGIE : AUTOMATIQUE ET INFORMATIQUE INDUSTRIELLE

INTRODUCTION AUX SYSTÈMES ASSERVIS - ASSERVISSEMENTS ET RÉGULATION			**GIF-SUR-YVETTE**
Développement des outils de base (analyse et synthèse) nécessaires à la bonne compréhension du fonctionnement des systèr Les techniques sont essentiellement appliquées à l'étude des servomécanismes et des régulations industrielles. **Responsable** : D. BEAUVOIS **Référence** : CG 039	5 jours	du 22 au 26 mars 2004	1 349 € HT
MÉTHODES DE COMMANDE - COMPARAISONS			**GIF-SUR-YVETTE**
Bilan comparatif des différentes méthodes existantes ; les outils relatifs aux différentes approches sont présentés au plan thé mise en oeuvre est illustrée par des applications. **Responsable** : P. BOUCHER **Référence** : CG 515	5 jours	du 29 mars au 2 avril 2004	1 411 € HT
INTRODUCTION À LA COMMANDE DES SYSTÈMES DYNAMIQUES NON LINÉAIRES			**GIF-SUR-YVETTE**
Présentation des méthodes non linéaires pour la commande des systèmes dynamiques non linéaires. Évaluation du d'applicabilité de ces méthodes. **Responsable** : H. SIGUERDIDJANE **Référence** : CG 704	2 jours	Les 18 et 19 mars 2004	1 210 € HT
OUTILS D'ÉTUDE DE LA STABILITÉ DES SYSTÈMES DYNAMIQUES NON LINÉAIRES			**GIF-SUR-YVETTE**
Présentation de méthodes permettant l'étude de la stabilité des systèmes dynamiques non linéaires et rappels sur les principales techniques d'analyse de stabilité des systèmes linéaires. **Responsable** : H. SIGUERDIDJANE **Référence** : TG 101	2 jours	Les 16 et 17 mars 2004	1 210 € HT



Modélisation structurée des systèmes avec les Bond Graphs.

Michel VERGÉ, *professeur des universités, ENSAM Paris,*
Daniel JAUME, *professeur des universités, CNAM Paris.*
Éditions TECHNIP, 400 p., 59 € TTC.

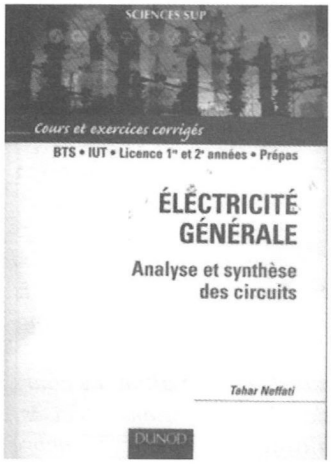
La création de produits nouveaux nécessite la connaissance des phénomènes physiques mis en jeu. A partir de modèles dont la conception est délicate, des simulations simples sont indispensables avant les premières réalisations.

Cet ouvrage explique la modélisation des systèmes dynamiques de différentes technologies : mécanique, électrique, thermique. La modélisation proposée repose sur l'approche Bond Graphs, ou graphes de liaison, qui traduit la conservation de puissance.

Cette approche permet de concevoir le modèle comme l'encapsulation de plusieurs modèles élémentaires échangeant de l'énergie. L'efficacité des logiciels et la volonté de créer des bibliothèques de modèles contribuent à sa diffusion rapide dans le milieu industriel.

Après une partie théorique, la seconde partie du livre présente des exemples industriels où la conception des modèles est intégralement détaillée et les simulations sont effectuées.

Cet ouvrage pédagogique intéressera les étudiants, ingénieurs et physiciens désirant construire des modèles adaptés aux besoins industriels.



ELECTRICITE GENERALE : Analyse et synthèse des circuits

Cours et exercices corrigés.

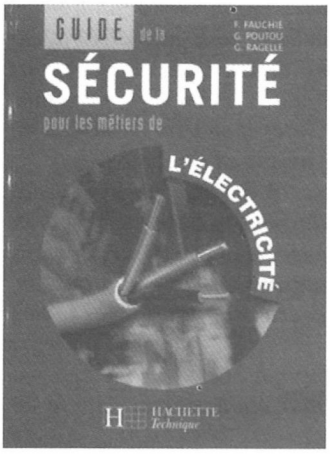
BTS, IUT, Licence 1ère et 2e années, Prépas.
Tahar NEFFATI*, Maître de Conférences à l'IUT de Cergy Pontoise.*
Éditions DUNOD, 264 p., 19,90 € TTC.

L'analyse et la synthèse des circuits électriques s'imposent à tous les niveaux du génie électrique, conception de circuits électroniques, étude de la stabilité et de la régulation des systèmes automatiques jusqu'à la mise au point des machines tournantes et des systèmes électrotechniques.

Cette partie que tout ingénieur et technicien doit maîtriser est exposée en un seul volume clair et concis qui fait le point sur l'ensemble du sujet : notions de base sur les circuits, réseaux linéaires en régime statique, analyse harmonique, quadripôles électriques et fonctions de transfert, réseaux linéaires en régime quelconque et circuits à transistors et à amplificateurs opérationnels.

Cet ouvrage s'adresse aux étudiants en IUVT, STS, IUP, licence, classes préparatoires et en formation continue.

De très nombreux exercices corrigés et commentés permettent aux lecteurs de mieux surmonter les difficultés rencontrées et de maîtriser cette matière.



Guide de la sécurité pour les métiers de l'électricité

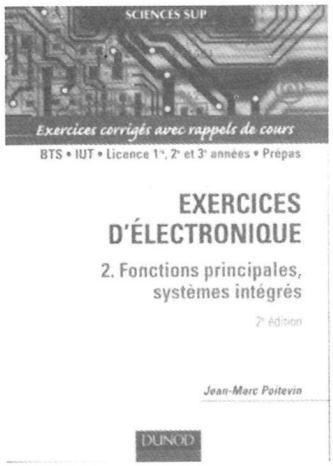
Éditions HACHETTE Technique, Éducation, 192 p., 15€ TTC.
F. FAUCHER, G. POUTOU, G. RAGELLE.

Le Guide de la sécurité pour les métiers de l'électricité est un ouvrage de référence, qui présente toutes les mesures de sécurité liées aux risques électriques. Conformément au référentiel de formation à la prévention des risques électriques, l'ouvrage décrit les procédures de mise en conformité et en sécurité des installations et des personnes. Il présente également les textes réglementaires et les institutions qui relèvent de ces questions. Ce guide répond aux besoins induits par le système d'habilitation des formations industrielles.

L'ouvrage est constitué de deux parties :

- Généralités : la médecine du travail, l'inspection du travail, les méthodes d'analyse des risques, le C.H.S.C.T., le sauvetage-secourisme, la protection individuelle, etc. ;

- La sécurité électrique dans les installations basse tension : normes et textes réglementaires, notions sur l'électricité, schémas des liaisons à la terre, définitions sur l'habilitation électrique, travaux au voisinage de pièces nues sous tension, etc. .



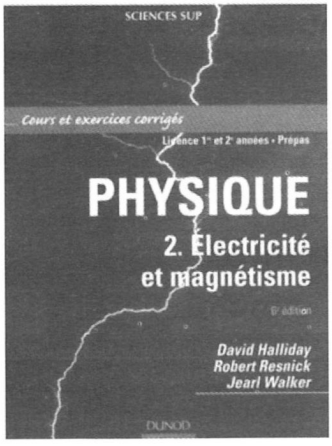
EXERCICES D'ELECTRONIQUE Tome 2 : Fonctions principales, systèmes intégrés.

BTS, IUT, Licence 1ère, 2e et 3e années, Prépas.
***Jean-Marc POITEVIN**, Maître de Conférences à l'université de Nantes.*
Éditions DUNOD, 276 p., 19.90 € TTC.

Destiné aux étudiants des filières scientifiques et technologiques (BTS, IUT, licence 1re, 2e et 3e années), cet ouvrage est un recueil de près de 140 exercices avec des solutions détaillées couvrant l'ensemble du programme d'électronique. De difficulté croissante, les exercices permettent de contrôler les connaissances, d'assimiler les méthodes et de déjouer les pièges classiques. Chaque chapitre débute par des rappels de cours présentant les résultats fondamentaux. Cette nouvelle édition est une refonte complète, actualisée et enrichie de nouveaux exercices.

Ce second tome présente les fonctions complexes de l'électronique et du traitement du signal, les techniques alliant analogique et numérique, avec des circuit de base, des composants discrets. Le premier tome comporte l'étude des circuits de base, des composants discrets et des amplificateurs opérationnels. Il insiste sur les problèmes de stabilité, dans les différents domaines d'amplification et dans celui des commutations.

Dans la même collection, par François MANNEVILLE et Jacques ESQUIEU : Électronique, cours et exercices corrigés (2e édition). Vol. 1 : théorie du signal et composants. Vol. 2 : Systèmes bouclés linéaires, de communication et de filtrage.



PHYSIQUE tome 2 : Électricité et magnétisme, 6e édition

Cours et exercices corrigés
licence 1ère et 2e années, Prépas.
***David HALLIDAY**, University of Pittsburg,*
***Robert RESNICK**, Rensselaer Polytechnic Institute,*
***Jearl WALKER**, Cleveland State University.*
Éditions DUNOD, 320 p., 39,90 € TTC

Cet ouvrage est la référence incontournable de tout étudiant en physique. Il s'agit d'un cours complet renforcé de plus de 3000 exercices se découpant en trois volumes : Mécanique, Électricité et magnétisme, Ondes optique et physique moderne.

Vous trouverez au début de chaque chapitre un texte de présentation. Le cours qui suit offre un formalisme mathématique réduit, des démonstrations précises, simples et accessibles. Il est remarquablement bien illustré en couleurs : nombre de figures apportent la lumière nécessaire à la compréhension du texte, des photos souvent exceptionnelles montrent la physique au quotidien.

Des exercices d'applications résolus accompagnés de points de méthodes permettent au lecteur de garder un contact permanent avec la réalité concrète et de mieux comprendre au fur et à mesure les notions qu'il aborde. Chaque chapitre se conclut par un bref résumé avec les points essentiels à retenir, les définitions et propriétés importantes, ce qui constitue un excellent aide-mémoire avant d'attaquer les exercices. Le résumé est suivi d'un questionnaire très complet pour vous permettre d'évaluer votre compréhension du cours. Pour terminer, une centaine d'exercices par chapitre sont organisés par sujet et suivant un niveau de difficulté croissant ; la réponse à tous les exercices se trouve en fin d'ouvrage.

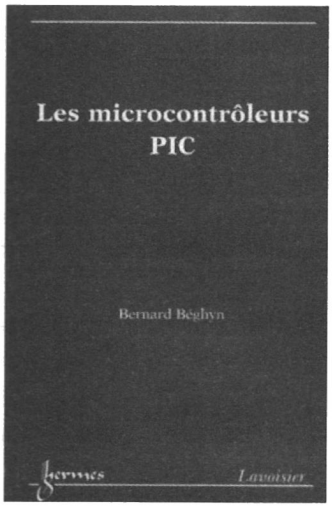
Les sujets traités dans ce deuxième volume consacré à l'électromagnétisme sont : la charge électrique, les champs électriques, la loi de Gauss, le potentiel électrique, les condensateurs, le courant et la résistance, les circuits, les champs magnétiques, l'induction et l'inductance, le magnétisme et les équations de Maxwell, les oscillations électromagnétiques et le courant alternatif, les ondes électromagnétiques.

Tant par son contenu que par son approche pédagogique, cet ouvrage célèbre dans le monde entier est le compagnon idéal de tout étudiant qui débute en physique.

Circuits et systèmes électroniques

Jimmie J. CATHEY, *professeur d'électronique à l'université du Kentucky (USA)*
Editions SCHAUM'S, EDISCIENCE, 347 p., 27 € TTC.
Licences 1ère et 2e années, BTS, IUT, Écoles d'ingénieurs, Professionnels en formation continue.

Cet ouvrage présente l'ensemble des notions de base utilisées en électronique : analyse des circuits électriques, systèmes électroniques à transistors, amplificateurs opérationnels... 350 exercices et problèmes résolus illustrent les concepts étudiés et des programmes SPICE permettent au lecteur de simuler le fonctionnement de circuits étudiés. L'ouvrage s'adresse à tous ceux qui souhaitent aborder l'électronique d'un point de vue pratique et simple.



Les microcontrôleurs PIC

Bernard BÉGHYN, *professeur en section de BTS électronique.*
Éditions HERMES Sciences Publications, 192 p, 40 € TTC.

Fabriqués et commercialisés depuis de nombreuses années, les microcontrôleurs PIC sont reconnus pour leur rapidité et pour leur facilité de programmation in situ.

La série FLASH permet entre autres de nombreux essais et reprogrammations lors de la phase d'étude. Leur architecture permet des opérations rapides, les instructions sont peu nombreuses et leur interfaçage est complet : ports parallèles, convertisseurs analogiques-numériques, temporisateurs et liaisons série synchrone et asynchrone. Ils sont déclinés en de très nombreuses versions et chaque application trouve un modèle adéquat.

Cet ouvrage contient une étude complète du 16F84 afin de se familiariser avec l'architecture PIC et sa programmation, une étude succincte des interfaces du 16F877, une étude plus approfondie des interfaces série synchrone et asynchrone (SPI et 12C) de plus en plus employées dans l'interfaçage électronique et une prise en main du simulateur du logiciel de développement MPLAB.

Les microcontrôleurs PIC *s'adresse aux élèves et aux enseignants des lycées techniques et professionnels, étudiants des IUT et BTS génie électrique et électronique, aux élèves des grandes écoles d'ingénieurs. Il sera aussi très utile à tous les utilisateurs professionnels de ce type de matériel.*

Vente dans les librairies spécialisées et à la
Librairie Lavoisier, 11 rue Lavoisier, 75 008 Paris (www.lavoisier.fr).

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 2003 / 2004 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) :*

- un tarif ***d'abonnement à la REE à 86 €*** *au lieu de 149 €*
- une ***remise de 20% sur l'achat des recueils*** *des conférences SEE des années 2000 / 2001 / 2002 /2003;*
- 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
- sur visite du ***site de la SEE : 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.

Utilisation des outils de simulation pour une approche pédagogique en électronique de puissance.

Philippe LADOUX(*), Hubert PIQUET(*), Frédéric RICHARDEAU(*)
Olivier TOURY (**)

(*) Enseignants au Département Génie Électrique et Automatique de l'ENSEEIHT
Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique Industrielle
Unité Mixte de Recherche INPT-ENSEEIHT / CNRS
BP 7122 - 2 rue Camichel - 31071 TOULOUSE Cedex 7 - France

(**) POWERSYS – Les Grandes Terres 13650 MEYRARGUES - France – www.powersys.fr

1 Introduction

Les outils de simulation numérique sont depuis longtemps largement utilisés pour la conception et la mise au point des structures de convertisseurs et de leurs lois de commandes dans les laboratoires de recherche et d'industrie. Ils permettent de réduire considérablement la durée du cycle de conception et de limiter, sans les remplacer, les phases de validation expérimentales.

Cependant, leur utilisation à but pédagogique dans le cadre de programmes d'enseignement, est plus récente car plus délicate. En effet, si l'intérêt pédagogique de la simulation numérique pour la visualisation et la compréhension des phénomènes physiques intervenant dans le comportement des systèmes électrotechniques se conçoit aisément, la réalité de sa mise en oeuvre dans le cadre d'un module d'enseignement est plus délicate.

La difficulté majeure provient du temps, forcément limité, du module d'enseignement qui doit être réparti entre la prise en main de l'outil de simulation numérique et l'objet pédagogique.

La plupart des logiciels ne sont pas simples à appréhender pour des étudiants qui n'ont souvent aucune expérience pratique de ce type d'outil. Le temps de formation nécessaire limite alors forcément le champ d'utilisation dans le cadre d'un module d'enseignement.

Cependant il existe désormais des outils de simulation spécialisés pour l'électronique de puissance très adaptés à l'approche pédagogique car conçus pour permettre de réaliser de façon « intuitive » la simulation de structures de convertisseurs et de boucles de contrôle.

Le logiciel PSIM utilisé dans l'étude présentée permet la mise en oeuvre des simulations numériques de convertisseurs (schémas, calcul, visualisation) de façon simple, robuste rapide et quasi immédiate pour les étudiants.

Dans ce projet, la simulation numérique est utilisée pour l'ensemble des composantes du dimensionnement d'un convertisseur:

- Calcul de valeurs de composants d'une structure de puissance ;
- Calcul et visualisation des formes d'onde ;
- Calcul de contraintes électriques sur les composants du circuit de puissance ;
- Calcul de correcteurs de boucles de régulation ;
- Validation de performances statiques ;
- Validation de performances dynamiques ;
- Test de charge non-linéaire.

Les étudiants peuvent ainsi, dans le cadre de leur module d'enseignement, appréhender, au moyen d'une démarche itérative de calcul-validation, les différents aspects du dimensionnement d'une « fonction » de conversion d'énergie composée de plusieurs modules (puissance + commande) interfacés entre eux de façon à répondre à un cahier des charges « global ».

La simulation numérique devient dans ces conditions un véritable outil de calcul, d'apprentissage et de communication pour les étudiants et les professeurs, tout en restant toujours « l'outil » et jamais la finalité de la formation.

L'émergence d'outils adaptés à l'électronique de puissance ouvre donc des perspectives très intéressantes en matière de pédagogie en proposant une voie d'apprentissage par l'expérimentation-validation, à mi-chemin entre la théorie et la pratique, très adaptée à la compréhension des phénomènes physiques de l'électronique de puissance et beaucoup moins contraignante que les travaux pratiques conventionnels.

2 Approche système du dispositif étudié, objectifs et organisation

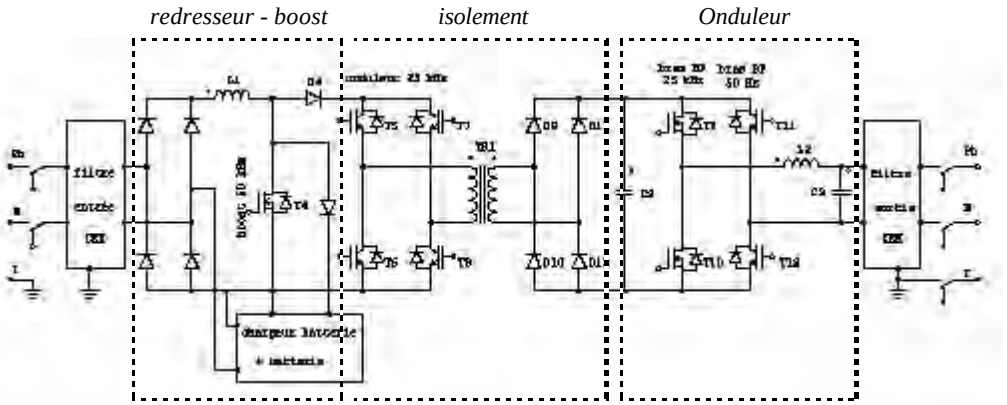


***Figure 2.1** : Alimentation Sans Interruption*

L'étude proposée aux étudiants utilise comme support la chaîne de conversion d'une alimentation sans interruption (ASI) monophasée de 2 kVA (modèle PULSAR PSX20 – Merlin-Gérin) (Fig 2.1) ; cette installation est caractérisée par un fonctionnement « toujours en ligne » et permet :

- l'absorption d'un courant sinusoidal sur le réseau,
- la mise en place d'un isolement galvanique,
- la génération d'une tension de sortie régulée, même en présence de charges perturbatrices non-linéaires.

Le chargeur de batterie et la gestion de l'énergie stockée dans cette dernière ne sont pas abordés au cours de cette étude

Les caractéristiques des fonctions assurées par l'ASI sont analysées pour justifier et construire le cahier des charges permettant le dimensionnement des trois étages qui effectuent la transformation et le transfert d'énergie :

- le redresseur-boost, qui règle la forme d'onde du courant absorbé et régule la tension de l'étage continu (capacité C2) ;
- l'étage d'isolement galvanique, qui permet l'introduction d'un transformateur haute fréquence et repose sur l'association d'un onduleur de courant commutant à courant nul et d'un redresseur à diodes ;
- l'onduleur de tension, associé à un filtre passif, produit une tension de sortie sinusoidale régulée, conférant à l'équipement une caractéristique vue des bornes de type « source de tension ».

Modalités pédagogiques

Chacun de ces trois éléments est confié à un groupe de 3 à 4 étudiants, qui reçoit (sur un ensemble de 5 séances de 4 heures) pour objectif :

- l'étude de la fonction réalisée, par l'analyse de la structure du convertisseur et de son mode de commande,
- le dimensionnement de ses composants,
- le choix et la détermination des paramètres des régulateurs.

Pour chaque groupe, ces analyses sont validées par simulation et/ou mesures expérimentales sur un exemplaire « didactisé » (points de mesure fiabilisés ramenés en face avant) du modèle d'ASI étudié. Le travail de ces trois groupes nécessite de leur part une certaine collaboration pour le choix des degrés de liberté qui ne sont pas explicitement fixés (tension du bus continu, valeur de C2, par exemple). A l'issue des études menées dans chaque groupe, les résultats sont mis en commun et les performances de l'ensemble, obtenues en simulation, sont confrontées au cahier des charges global ; les valeurs issues des 3 études de dimensionnement sont comparées à celles retenues sur l'installation industrielle.

Dans les quatre parties qui suivent sont présentés des résultats de travaux menés par des étudiants de l'option de 3ème année TAEE (Traitement Avancé de l'Energie Electrique) du département Génie Electrique et Automatique de l'ENSEEIHT. Les supports visuels de ces travaux sont essentiellement des résultats de simulation obtenus à l'aide du logiciel PSIM.

3 Redresseur monophasé à absorption de courant sinusoidal

L'enjeu de la conversion réalisée par cet étage est l'absorption d'énergie sur le réseau à facteur de puissance unitaire, avec un faible taux de distorsion harmonique. L'inductance L1 est donc le siège d'un courant dont le terme basse fréquence présente l'allure d'un sinus redressé. A travers l'étage d'isolement galvanique, l'énergie prélevée alimente l'étage continu (capacité C2) et doit réaliser la régulation de la tension *Vbus*. La commande du convertisseur *boost* (interrupteur T4) est donc organisée autour de deux boucles imbriquées : la première, rapide, contrôle le courant absorbé, afin d'en garantir la qualité de la forme d'onde ; la seconde, lente, définit l'amplitude de ce courant, pour régler la tension de l'étage continu.

Le cahier des charges à remplir est le suivant :

- ondulation résiduelle du courant dans L1 inférieur à 2A,
- boucle d'asservissement du courant présentant une erreur de traînage nulle ;
- boucle de régulation de la tension garantissant une erreur statique nulle et une bonne robustesse vis-à-vis des variations de charge, avec un dépassement en régime transitoire inférieur à 5% ;
- butées contraignant le rapport cyclique de T4 entre 0,1 et 0,75.

3.1 Dimensionnement de l'inductance L1

L'ondulation du courant dans L1 s'exprime classiquement par la relation :

$$\Delta iL1 = \frac{\alpha(1-\alpha)Vbus}{L1\,fdéc}$$

α est le rapport cyclique de T4,
fdec sa fréquence de découpage (50 kHz) ;
Vbus est la tension de l'étage continu, choisie à l'étape (3), de l'ordre de 380 V.

On en déduit la valeur de L1 satisfaisant le cahier des charges : L1 = 1 mH.

3.2 Asservissement du courant absorbé

Il s'agit d'effectuer l'asservissement du courant absorbé sur le réseau ; ceci est obtenu par le contrôle du courant IL1. Vred étant la tension délivrée en sortie du redresseur d'entrée, on a :

$$Vred = L_1 \frac{dIL_1}{dt} + VT_4$$

En considérant cette relation en valeur moyenne à l'échelle du 50 kHz :

$$Vred = L_1 \frac{dIL_1}{dt} + (1-\alpha)Vbus$$

En considérant les variations de IL1 et α, on a :

$$L_1 \times \frac{d\Delta IL_1}{dt} = Vbus \times \Delta\alpha$$

d'où, en passant aux fonctions de Laplace, la fonction de transfert du système à contrôler est de la forme :

$$\frac{IL_1(p)}{\alpha(p)} = \frac{Vbus}{L_1 p}$$

Vue la forme de cette fonction de transfert, un correcteur de type proportionnel intégral permet de garantir les performances recherchées pour la boucle de courant. Ses paramètres sont déterminés afin de garantir une bande passante en boucle fermée de 5 kHz (valeur choisie en fonction de la fréquence de découpage) et une marge de phase de 60°.

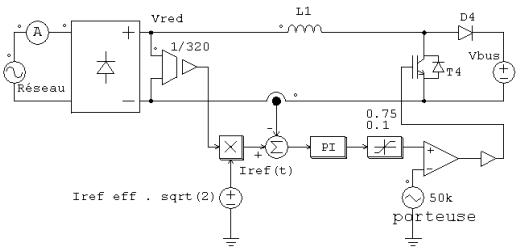


***Figure 3.1** : asservissement du courant*

La figure 3.1 présente le principe de l'asservissement du courant : l'amplitude instantanée de la référence de courant est déterminée en multipliant la valeur crête choisie, par la mesure normalisée de la tension redressée Vred. La prise en compte des limitations du rapport cyclique conduit à une perte du contrôle au voisinage des passages par zéro du courant, qu'un correcteur muni d'un dispositif d'anti-saturation (Fig. 3.2) permet de limiter.

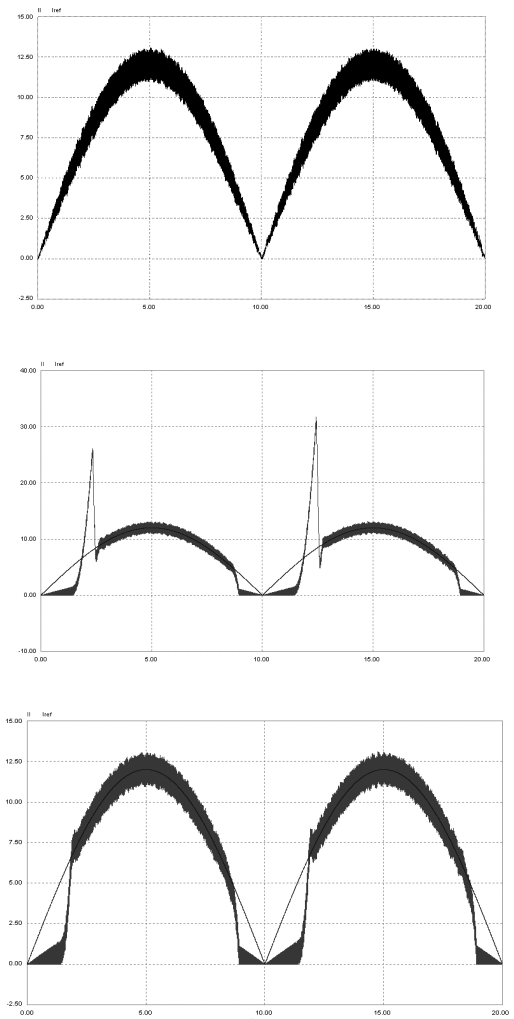


***Figure 3.2 :** asservissement du courant IL1 : correcteur PI sans butées, de rapport cyclique / perturbations dues aux limitations / correcteur avec limitations et dispositif d'anti-saturation.*

3.3 Contrôle de la tension Vbus

Valeur du condensateur C2 (bus continu)

On effectue un bilan des puissances instantanées au niveau de la capacité C2 (Fig. 3.3).

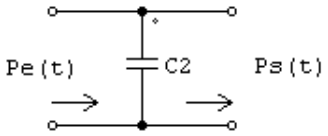


Figure 3.3 : *bilan des puissances instantanées au niveau du bus continu*

En négligeant les pertes dans tous les étages amont, la puissance prélevée sur le réseau s'exprime par :

$$P_e(t)=V_{red}(t) \times IL_1(t)=\sqrt{2}\, V_{res}.sin(\omega t)\times\sqrt{2}\, IL_1.sin(\omega t)$$

$$P_e(t) = V_{res}.IL_1.(1 - \cos 2\omega t)$$

Au niveau de l'étage onduleur, on fournit une tension identique à la tension réseau ; nous supposerons que nous alimentons une charge (courant efficace Is) dont le facteur de puissance est compris entre 0,7 et 1. La puissance fournie à la sortie s'exprime donc :

$$P_s(t) = V_{res}.I_s.(\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)$$

En exprimant l'égalité des valeurs moyennes de Pe(t) et Ps(t), on obtient :

$$IL_1 = I_s \times \cos \varphi$$

La capacité C2 est donc le siège de la circulation d'un courant à 100 Hz qui correspond à la partie fluctuante de Pe(t)-Ps(t) :

$$i_{C2}(t) = \frac{V_{res}\, Is.\sin \varphi}{Vbus} \sin 2\omega t$$

En acceptant une ondulation résiduelle à 100 Hz de 2 % pour une puissance transmise de 2 kW, on calcule : C_2 2 mF

Régulation de Vbus

Il s'agit de réguler Vbus à 380V, quelque soit la puissance absorbée par la charge ; les étudiants font ici l'hypothèse qu'il est possible de modéliser les étages d'isolement et d'ondulation MLI par une résistance équivalente R qui vient en parallèle de C2. L'expression de l'égalité entre la puissance prélevée sur le réseau et celle délivrée en sortie du boost donne :

$$Vred \times iL1_{ref} = Vbus \times iD_4 \text{ avec :}$$

$$iD_4 = C_2 \frac{dVbus}{dt} + \frac{Vbus}{R} \text{ ; avec : } x = Vbus^2 :$$

$$Vred \times iL1ref = \frac{C_2}{2}\frac{dx}{dt} + \frac{x}{R}$$

Cette relation permet de mettre en place le réglage de Vbus (par l'intermédiaire de la variable x), par action sur iL1ref (la valeur efficace du courant qui sera absorbé sur le réseau, c'est à dire la grandeur Iref présente sur la figure 3.1). La correction est effectuée à l'aide d'un correcteur de type PI, avec un choix de la bande passante de quelques Hz, de façon à ne pas induire, par la définition de la référence iL1ref, de distorsion harmonique sur le courant absorbé sur le réseau. On cherchera également à conférer au contrôle la meilleure robustesse vis-à-vis des variations de charge et de la tension réseau

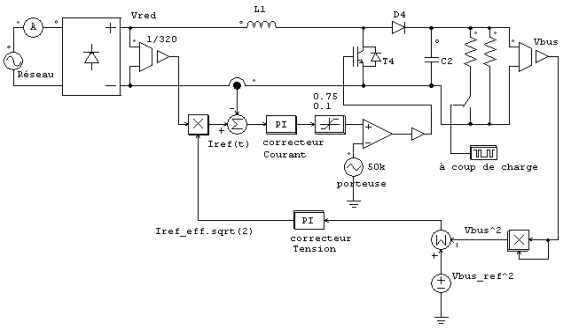


Figure 3.4 *: régulation de la tension Vbus*

La figure 3.4 présente la structure du dispositif de contrôle de la tension Vbus. On notera la représentation résistive de la charge de cet étage, permettant de simuler des à-coups, comme l'illustre la figure 3.5.

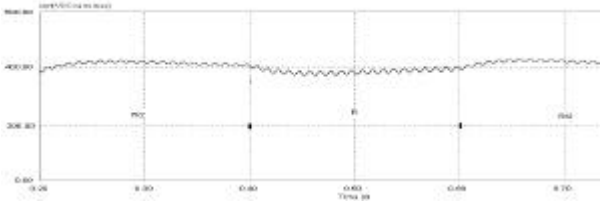


Figure : 3.5 *: réponse de la régulation de Vbus, vis-à-vis de variations de charge (référence de 400 V)*

4 Isolement galvanique

Pour préserver le même régime de neutre entre l'entrée et la sortie de l'ASI, la continuité du fil de neutre doit être assurée. Pour une ASI monophasée, cette exigence implique l'introduction d'un étage d'isolement galvanique par transformateur. Dans certaine topologie, ce transformateur joue un rôle supplémentaire en permettant une adaptation de tension entre le bus basse tension batterie (quelques dizaines de volts) et le bus onduleur (350 à 400 V). Ce degré de liberté *a priori* très intéressant n'est pas exploité ici. Néanmoins, pour préserver un haut niveau d'intégration et minimiser la masse du produit fini, il est important d'introduire un transformateur à flux haute fréquence.

Comme le montre la figure 4.1, la solution retenue par le constructeur est originale et se démarque très nettement des solutions que nous aurions pu imaginer initialement avant de connaître l'architecture exacte de la chaîne. Le transformateur (Tr1) est intercalé entre l'étage redresseur-boost décrit précédemment et l'étage onduleur qui sera exposé dans le paragraphe suivant. Notons que la forme d'onde du courant en sortie du boost (iD4) fait clairement apparaître une composante continue (image de la puissance active) et une composante à la fréquence double du réseau (image de

la puissance fluctuante monophasée). Le raccordement direct du transformateur n'est donc pas souhaitable, c'est la raison pour laquelle un onduleur de courant en pont complet à haute fréquence de découpage est inséré entre la sortie du boost et l'enroulement primaire du transformateur. Cet onduleur permet ainsi d'utiliser le circuit magnétique à haute fréquence selon un cycle magnétique symétrique et centré dans le plan B(H), opération avantageuse en termes d'optimisation de volume. L'enroulement secondaire du transformateur est ensuite simplement raccordé à un redresseur de courant à diodes dans la mesure où la réversibilité en puissance n'est pas requise ici. Le redresseur étant lui-même raccordé au bus continu de l'ASI.

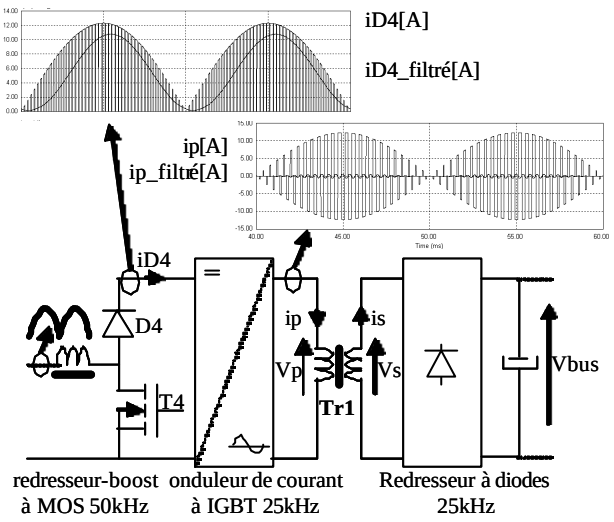


***Figure 4.1** : Schéma de principe de l'étage d'isolement. (pour plus de lisibilité, la simulation PSIM a été réalisée à 2,5 kHz)*

Sans entrer dans les détails, précisons juste que cette solution permet, en plus de l'isolement haute fréquence, un raccordement courant-tension "transparent" sans inductance supplémentaire. Le schéma SimCad de cette solution est donné en figure 4.2. L'inductance magnétisante du transformateur est arbitrairement placée au primaire.

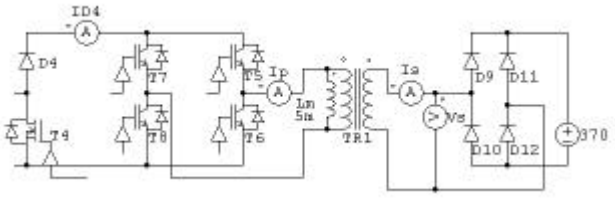


***Figure 4.2 :** Onduleur de courant à IGBT 25 kHz et isolement galvanique.*

Outre l'intérêt "brut" que représente l'étude de cette association originale, l'objectif de cette partie est plutôt d'initier les étudiants à une démarche méthodique et générique de dimensionnement d'un transformateur utilisé dans un circuit particulier, lequel sort de tout cas d'étude type présenté en cours …ou dans la littérature.

4.1 Principe de la commande de l'onduleur de courant

La forme d'onde du courant iD4(t) a une propriété importante : au courant magnétisant près du transformateur, iD4(t) s'annule périodiquement sur une durée αTdec. Il est donc judicieux de profiter de cet intervalle de temps pour commuter les transistors de l'onduleur à "courant nul" et minimiser les pertes. Cela implique une synchronisation de la commande des diagonales T5-T8 et T6-T7 de l'onduleur de courant sur la rampe de découpage de boost. Le principe de cette commande est donné en figure 4.3.

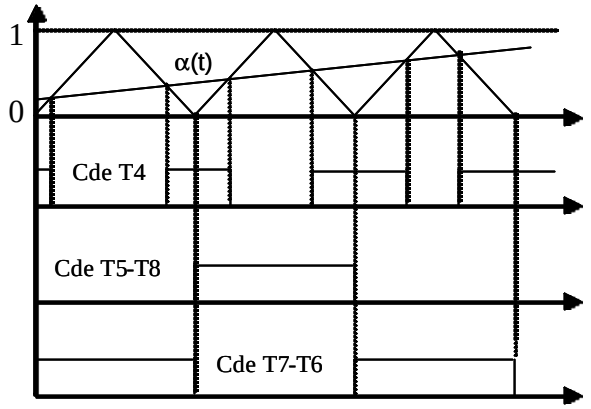


***Figure 4.3** : Principe de la génération des ordres de commande de l'onduleur de courant à IGBT 25 kHz.*

4.2 Formes d'ondes

Les formes d'ondes simulées par PSIM et tracées par SimView sont données en figure 4.4 sur quelques périodes de découpage. Le fonctionnement de l'onduleur de courant est bien conforme à la commande décrite précédemment. Le courant magnétisant est tracé également et montre bien que le flux est à haute fréquence, i.e. ici 25 kHz.

Cette simulation permet en outre de bien comprendre la façon dont est utilisé le transformateur, en particulier au niveau des phases de magnétisation ($|\varphi|$ croissant) et de démagnétisation ($|\varphi|$ décroissant) du circuit magnétique.

La magnétisation se produit durant la phase de transfert du courant iD4 au travers d'une des diagonales, pendant une durée (1-α).Tdec. Par contre, à la fermeture du transistor T4, le courant iD4 transféré à l'étage d'isolement s'annule théoriquement. La question est de savoir par quel chemin circule le courant magnétisant du transformateur ? Sans entrer dans le détail de l'analyse complète, on montre que le chemin de moindre résistance électrique est celui formé par la maille T4-D4-T5-T8 pour un courant magnétisant positif et par la maille T4-D4-T6-T7 pour un courant magnétisant négatif. Cela signifie que le courant magnétisant circule en "sens inverse" dans le MOS du boost (ou dans sa diode de corps si le courant total est trop faible). Durant cette séquence, sorte de "roue libre", la tension résultante de la maille correspond à la somme algébrique des chutes de tension des composants IGBT et du MOS, i.e. quelques volts tout au plus. Le courant magnétisant est donc pratiquement constant sur la figure, soit un flux quasi-constant. Lors

de la commutation des diagonales de l'onduleur, les chemins de roue-libre précités laissent place une phase de démagnétisation par le redresseur au secondaire pendant une durée (α / 2).Tdec.

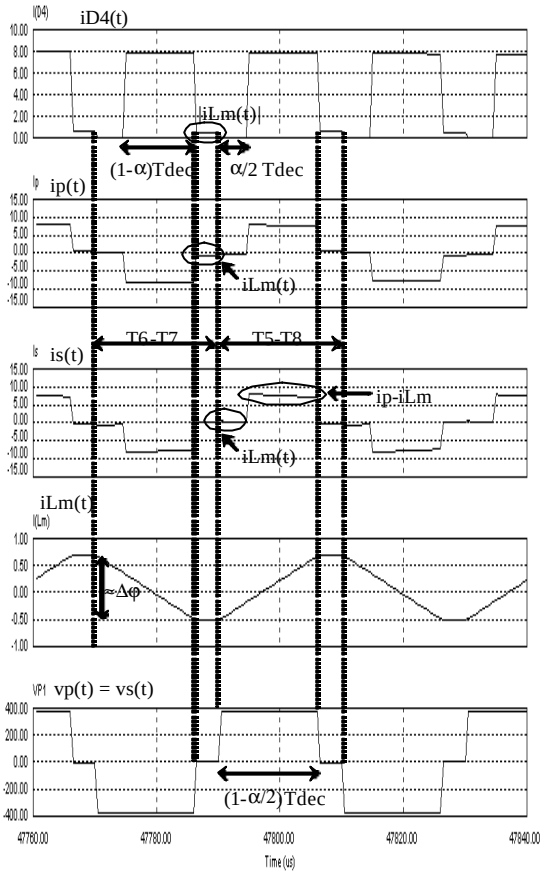


Figure 4.4 : *Formes d'ondes des courants et tension du transformateur sur quelques périodes de découpage HF.*

4.3 Principe du dimensionnement du transformateur

Sur la base des formes d'ondes que nous venons d'analyser, il s'agit maintenant de dimensionner le circuit magnétique et le bobinage du transformateur pour le point nominal. L'objectif consiste bien sûr à minimiser le volume global en s'assurant que le circuit magnétique n'est pas saturé et que le double bobinage (primaire et secondaire) est compatible avec la fenêtre du circuit magnétique. La figure 4.5 donne un exemple typique de circuit en "E" de section magnétique Ae et de surface de bobinage S_b. La relation (1) correspond au critère de non saturation dans le pire cas de magnétisation, i.e. pour une durée de (1-α_{min}/2).Tdec. La relation (2) correspond au critère d'encombrement maximum de la section totale de bobinage dans une fenêtre.

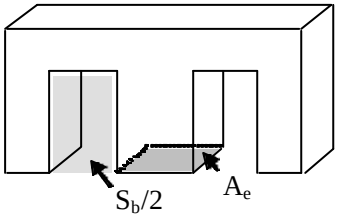


Figure 4.5 : *Forme d'une des deux parties du circuit magnétique.*

$$\frac{Vbus}{2nA_eF_{dec}}\left(1-\frac{\alpha_{min}}{2}\right) < B_{sat} \qquad (1)$$

$$2nK_f\frac{I_{eff}}{J} < S_b \qquad (2)$$

avec :

n : nombre des spires (identiques entre primaire et secondaire) ;

A_e : section de la jambe centrale du circuit magnétique ;

B_{sat} : champ à saturation (200mT pour un matériau ferrite) ;

J : densité de courant nominale (6 à 8 A/mm² en utilisant du fil de Litz) ;

K_f : coefficient de foisonnement total (relation entre la surface d'un brin et la surface réelle occupée par le fil multibrin gainé, valeur de 3 à 4).

Il y a donc deux relations de base et trois inconnues : n, A_e, S_b. Le produit des relations (1) et (2) permet de faire disparaître l'inconnue "n" et de choisir sur catalogue le circuit magnétique ayant un produit $A_e.S_b$ immédiatement supérieur à celui calculé. Une fois le circuit choisi, l'étape suivante consiste à "choisir" le nombre de spires conformément à l'encadrement suivant :

$$\frac{Vbus}{2B_{sat}A_eF_{dec}}\left(1-\frac{\alpha_{min}}{2}\right) < n < \frac{J}{I_{eff}}\frac{S_b}{2K_f} \quad (3)$$

Si cet encadrement n'est pas vérifié en pratique, il faut alors prendre le circuit de dimension supérieur (augmenter S_b et A_e). Le choix de "n" résulte, entre autre, d'un compromis entre pertes joule et pertes fer. La valeur de "n" permet ensuite de choisir sur catalogue le type de fil de Litz (nombre de brins, section apparente du fil multibrin gainé, résistance par unité de longueur) et d'évaluer l'encombrement réel du bobinage. Cet étape est importante et peut remettre en cause le choix initial du circuit magnétique. Une fois le choix stabilisé, il peut être intéressant d'évaluer les pertes dans le bobinage et dans le circuit magnétique, et enfin le rendement.

5 Onduleur de tension monophasé

5.1 Cahier des charges de l'onduleur.

Point nominal **:**
230 V – 2 kVA - cos φ 0,7 – 50 Hz

Spécifications Basse Fréquence (50 Hz) :

- Courant capacitif 10 % In
- Chute de tension Inductive 5 % de Vn
- Chute de tension en boucle fermée 2 % de Vn

Spécifications Haute Fréquence (25 kHz) :

- Ondulation de tension en sortie 2 % de Vn crête ;
- Atténuation dans un rapport 100 de l'harmonique produit par l'onduleur à la fréquence de découpage ;
- Ondulation du courant dans l'inductance du filtre de sortie 30 % In crête.

5.2 Étude de la commande MLI.

L'onduleur de sortie a la particularité de posséder un bras à transistors IGBT fonctionnant en basse fréquence à rapport cyclique 0,5 et un bras à transistors MOS fonctionnant en haute fréquence et commandé en Modulation de Largeur d'Impulsion. Les étudiants doivent intégrer cette spécificité pour réaliser la commande de l'onduleur et déterminer ensuite la valeur de la tension du bus continu nécessaire pour remplir le cahier des charges. La figure 4.1 illustre le principe de commande des bras de l'onduleur MLI (les interrupteurs sont supposés idéaux, il n'y a pas de temps mort dans la commande).

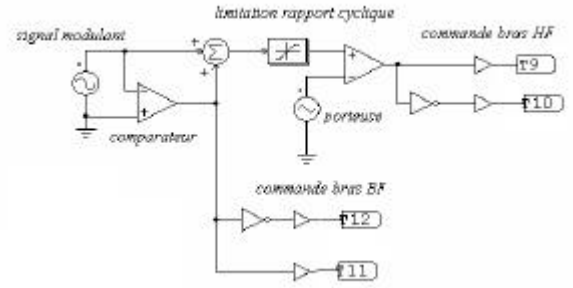


Figure 5.1 : *Schéma PSIM du circuit de commande de l'onduleur.*

La figure 5.2 présente les résultats de simulation obtenus : la fréquence de la porteuse a été ici volontairement réduite à 1800 Hz afin de visualiser correctement les formes d'ondes.

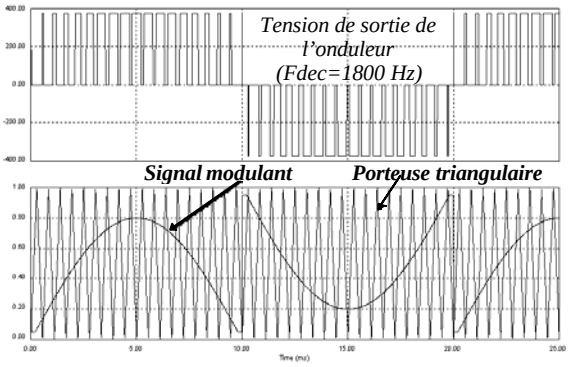


Figure 5.2 : *Commande MLI du bras HF*

L'analyse fréquentielle de la tension de sortie de l'onduleur (Figure 5.3) permet aux étudiants de vérifier que les harmoniques de rang bas sont effectivement éliminés. L'analyse fréquentielle permet aussi de relier l'amplitude de la raie fondamentale à 50 Hz à l'amplitude du signal modulant et à la tension du bus continu et donc de valider le modèle moyen à 50 Hz de l'onduleur.

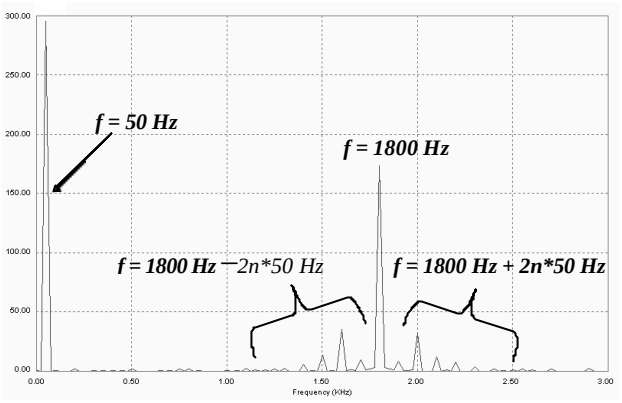


Figure 5.3 : *Analyse spectrale de la tension de sortie de l'onduleur.*

Compte tenu de la chute de tension dans l'inductance de sortie et des butées sur le rapport cyclique du bras haute fréquence, la tension Vbus est fixée à 380 V.

5.3 Dimensionnement du filtre de sortie.

Les données fournies dans le cahier des charges permettent un encadrement des valeurs de L et de C conformément à la figure 5.4.

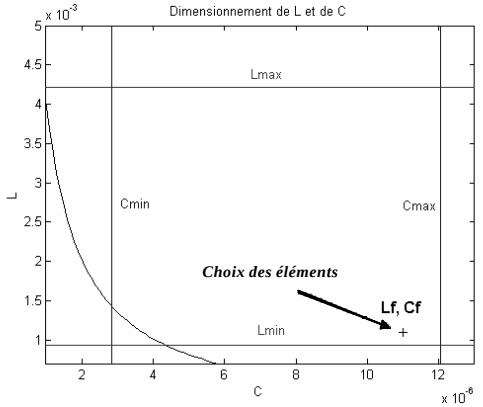


Figure 5.4 : *Choix des éléments du filtre de sortie.*

La simulation permet ensuite aux étudiants de vérifier de manière quasi instantanée l'exactitude de leur calcul. Ainsi, la figure 5.5 présente un zoom sur les formes d'ondes à l'échelle de la période de découpage (f_{dec} = 25 kHz) pour un rapport cyclique de commande voisin de 0,5. Il est alors facile de déterminer ΔI et ΔV.

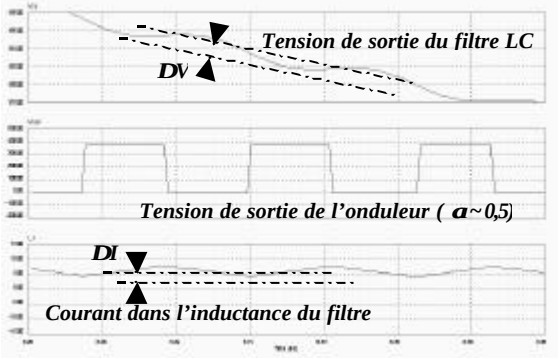


Figure 5.5 : *Simulation PSIM ; zoom à l'échelle de la période de commutation de l'onduleur.*

5.4 Régulation de la tension de sortie.

La boucle de régulation de la tension de sortie utilise un correcteur PID. Les étudiants ayant jusqu'à présent à leur disposition la version 5 du logiciel PSIM, ils préfèrent dimensionner les éléments de ce correcteur à l'aide de MATLAB / SIMULINK où ils implantent le modèle moyen du convertisseur et de sa commande. Une fois le fonctionnement de la commande validé (réponse fréquentielle et réponse temporelle), ils « câblent » le correcteur PID dans PSIM, ce qui permet de prendre en compte l'influence du découpage et de vérifier notamment qu'il n'y a pas de surmodulation dans la tension délivrée par l'onduleur. La version 6.0 de PSIM permettant de tracer des diagrammes de Bode devrait éviter, dans des cas simples comme celui-ci, le passage par MATLAB / SIMULINK. Le fonctionnement sur charge linéaire étant validé, il est aisé par la suite de modifier le schéma PSIM et de considérer le cas d'une charge non linéaire du type redresseur monophasé avec condensateur en tête.

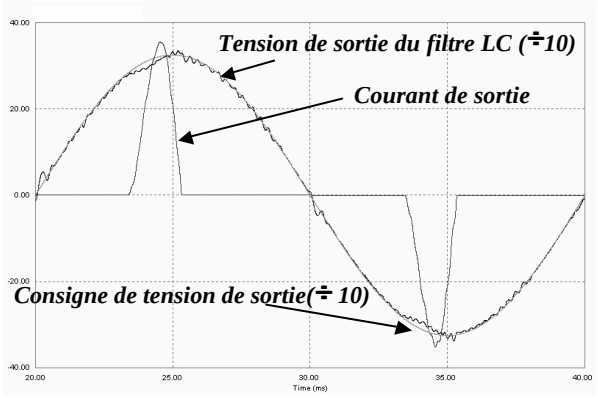


Figure 5.5 : *Fonctionnement en boucle fermée sur charge non linéaire.*

6 Conclusion

Une fois l'étude de chaque étage terminée, les groupes de travail mettent en commun leurs résultats et testent les performances globales de la chaîne de conversion. Généralement, l'outil de simulation PSIM est pris en main rapidement par les étudiants. Les erreurs principales sont liées au mauvais choix du pas de calcul, ce qui conduit parfois à des résultats erronés. Il est donc important pour les étudiants de connaître à l'avance l'allure des formes d'ondes. Vis-à-vis des étudiants, le logiciel PSIM est donc plus pertinent en tant qu'outil de validation que comme outil d'investigation (ce qui est vrai aussi pour d'autres outils de simulation). Mise en place depuis quelques années au Département Génie Electrique et Automatique de l'ENSEEIHT, cette approche pédagogique au travers de thèmes d'étude semi-encadrés est dans l'ensemble très appréciée par les étudiants.

BIBLIOGRAPHIE

P. Ladoux, M. Metz : « Utilisation de l'onduleur de tension MLI pour la correction du facteur de puissance »,
La Revue 3EI n°28, mars 2002.

H. Foch, F. Forest : « Onduleurs de tension : éléments sur la mise en oeuvre et les multiples applications d'une fonction fondamentale de l'électronique de puissance ». Journées 3EI 1997.

H. Foch, J. Arches, Y. Chéron, B. Escaut, P. Marty : « Alimentations à Découpage ». Techniques de l'Ingénieur. Volume DAB

H. Foch, F. Forest, T. Meynard : « Onduleurs de tension ». Techniques de l'Ingénieur volume DAB.

H. Bülher : "Réglage de systèmes d'électronique de puissance, volume 3" Collection Electricité, Presses Polytechniques Romandes.

Mohan, Undeland, Robbins : "Power Electronics" Editions Wiley.

CALCUL DE CHAMP MAGNETIQUE : LOGICIEL FEMM (FINITE ELEMENT MAGNETICS MODEL) ET MÉTHODE ANALYTIQUE (CIRCUITS MAGNÉTIQUES)

Sylvain CANAT
LEEI / ENSEEIHT / INP Toulouse
BP 7122 – 2, Rue Camichel
31071 Toulouse Cedex 7
canat@leei.enseeiht.fr

Jean FAUCHER
LEEI / ENSEEIHT / INP Toulouse
BP 7122 – 2, Rue Camichel
31071 Toulouse Cedex 7
faucher@leei.enseeiht.fr

Résumé :
l'objectif de cet article est de présenter un logiciel de calcul de champs par la méthode des éléments finis, qui allie interface graphique conviviale, prise en main simplifiée et gratuité. L'enseignant peut ainsi disposer d'un outil simple d'utilisation et susceptible d'illustrer son cours sur les convertisseurs électromécaniques. Nous proposons la modélisation de deux actionneurs et comparons les résultats issus de FEMM avec l'étude théorique simplifiée par circuits magnétiques équivalents.

INTRODUCTION

Le logiciel FEMM est disponible et téléchargeable gratuitement sur le site internet : "**http://femm.foster-miller.net/download.htm**". FEMM est développé et maintenu par David Meeker. Il s'agit d'un logiciel libre soumis à une licence AFPL (Aladdin Free Public License) qui permet à l'utilisateur de copier et de distribuer le code source littéral. Cette licence permet également de réaliser ou modifier des modélisations basées sur ce programme et de les distribuer gratuitement. La principale restriction réside dans l'interdiction de commercialiser tout logiciel construit ou utilisant FEMM.
FEMM se présente sous la forme d'une suite de programmes dédiés à la résolution de problèmes magnétiques, en conditions statiques et en basse fréquence (hypothèse d'état quasi-stationnaire). Cette suite logicielle traite uniquement les problèmes en deux dimensions (invariance par rotation ou translation). FEMM se compose de trois parties distinctes:

1. Préprocesseur **(femme.exe):** permet de définir la structure de l'objet d'étude. Le dessin et les propriétés des matériaux constitutifs ainsi que les conditions aux limites y sont définis.
2. Solveur **(fkern.exe):** résout les équations de Maxwell discrétisées et détermine les valeurs du potentiel en chaque maille.
3. Postprocesseur **(femmview.exe):** exploite les résultats obtenus à l'aide du Solveur pour calculer: flux, inductances, forces ...

Afin d'illustrer le fonctionnement de ce logiciel, nous développons deux exemples en proposant pour chacun d'eux une résolution par FEMM et une résolution simplifiée par la méthode des circuits magnétiques équivalents. Le premier cas traité concerne un électroaimant tel que ceux utilisés comme actionneurs d'électrovannes. Il s'agit d'une structure invariante par rotation. Le second exemple est nettement plus ambitieux en exploitant l'invariance par translation sur une machine asynchrone.

CALCUL DE LA FORCE ÉLECTROMAGNÉTIQUE DÉVELOPPÉE PAR UN ÉLECTROAIMANT

Étude analytique simplifiée

L'objet considéré est un électroaimant cylindrique qui se présente extérieurement sous forme d'un petit cylindre métallique duquel sort un doigt mobile suivant l'axe. La force électromagnétique d'action mise en jeu sur la partie mobile tend à minimiser l'entrefer et est liée au courant qui parcourt la bobine. La figure (Fig 1) présente l'électroaimant décrit sous forme volontairement simplifiée. Nous n'avons pas représenté, entre autres, le ressort de rappel, indispensable pour ramener le noyau à sa position de repos lorsque le courant dans la bobine s'annule. L'objectif est de déterminer la force d'origine magnétique qui s'exerce sur la partie mobile. Cette force dépend du courant, mais également de la position x du noyau

mobile. Nous avons choisi d'étudier l'évolution de cette force en fonction de la position x. Par conséquent, la valeur du courant est constante et produit une force magnétomotrice de *10 A.trs.*

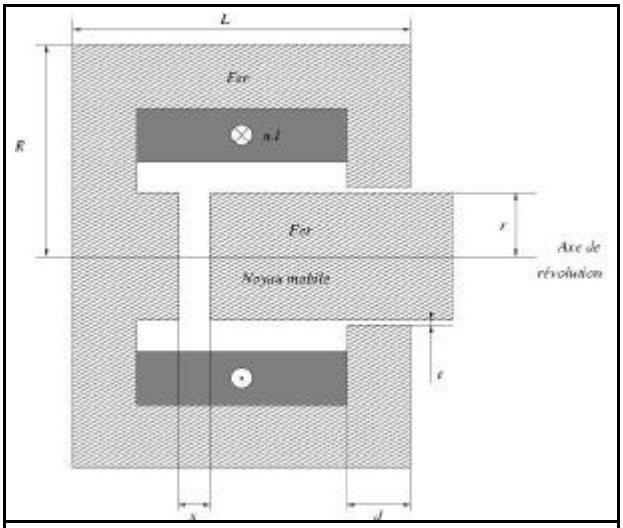


Figure 1 : *Architecture de l'électroaimant*

Pour effectuer l'étude théorique simplifiée, nous considérons que la perméabilité du fer est infinie et que les lignes de champ dans l'entrefer restent parallèles à l'axe. L'entrefer *(e = 0,4 mm)* reste faible devant les autres dimensions. Les lignes de fuites peuvent être négligées. Les réluctances sont alors aisées à calculées:

$$R_e = \frac{1}{\mu_0}\frac{e}{2\pi r d} \quad \text{et} \quad R_x = \frac{1}{\mu_0}\frac{x}{\pi r^2} \qquad (1)$$

Cette modélisation par calcul de réluctances nous permet de représenter le circuit magnétique sous forme de circuit électrique équivalent, dans lequel φ représente le flux d'induction magnétique et $\mathcal{E}$ la force magnétomotrice.

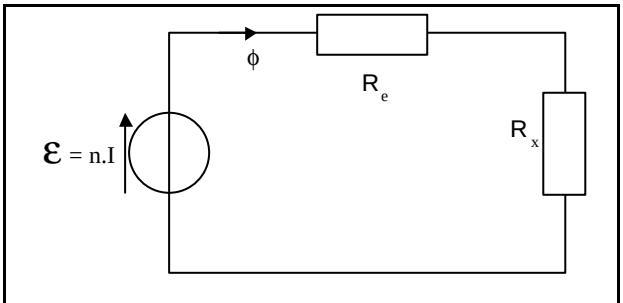


Figure 2*: Circuit magnétique équivalent.*

La force d'origine magnétique s'obtient par dérivation de la coénergie W'(x):

$$F(x) = \frac{\partial W'}{\partial x} \qquad (2)$$

La coénergie est calculée à partir du flux et de la force magnétomotrice:

$$W' = \frac{1}{2}E\varphi = \frac{1}{2}\frac{(n.I)^2}{R_x + R_e} \qquad (3)$$

Soit une force:

$$F(x) = -2\mu_0\pi d^2 r^2 \frac{(n.I)^2}{(2.d.x + r.e)^2} \qquad (4)$$

Simulation avec FEMM

La première étape consiste à entrer les données définissant le système d'étude: dessin de la structure et données magnétiques concernant les matériaux. Cette manipulation s'effectue dans le préprocesseur **femme.exe.** Pour le dessin de la structure, et en particulier pour les points qui délimitent le contour, le logiciel offre le choix entre deux méthodes:

1. Utiliser la souris et placer les points essentiels sur l'écran. Cette méthode s'avère laborieuse à l'usage.
2. Utiliser la touche "tab" qui permet de donner les coordonnées des points après avoir choisi le type de coordonnées: polaires ou cartésiennes (icône **"grid size"** situé sur le côté gauche de l'écran).

L' électroaimant étant cylindrique et invariant par rotation, il est nécessaire de le préciser au logiciel. Cette propriété est indiquée dans la fenêtre **"problem"** en choisissant **"Axisymmetric"** (Fig 3)**.**

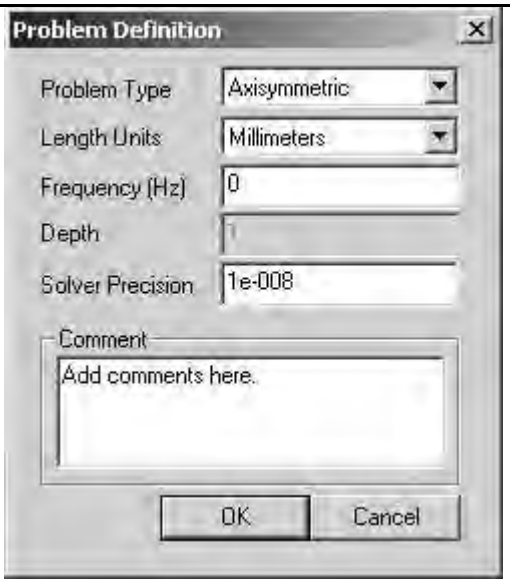


Figure 3: *Paramètrage du type de problème.*

Une fois la structure dessinée, il convient de décrire les matériaux constitutifs (air, fer et cuivre) en sélectionnant ceux-ci dans la bibliothèque **"Properties ® Materials Library".** Noter qu'il est possible de définir soit même les matériaux ou de modifier des matériaux existants **("Properties ® Materials").** Une source de courant unique est définie **("Properties ® Materials Circuits")** en indiquant le nombre d'Ampères-tours. Enfin, il est nécessaire de préciser les conditions aux limites **("Properties ® Boundary")** : conditions de Dirichlet A=0 .
La figure (Fig 4) présente la structure maillée finale

telle qu'elle a été définie par le préprocesseur et prête pour le calcul.

Le calcul de la force sera effectuée pour plusieurs positions du noyau. Il faut donc indiquer au logiciel que celui-ci se déplace d'un bloc, c'est à dire que ses éléments constitutifs restent solidaires et indéformables. Les délimitations du noyau sont indiquées en regroupant tous les points, segments ... sous une dénomination unique autre que **"groupe 0"** (qui est le groupe par défaut et n'est pas sélectionnable).

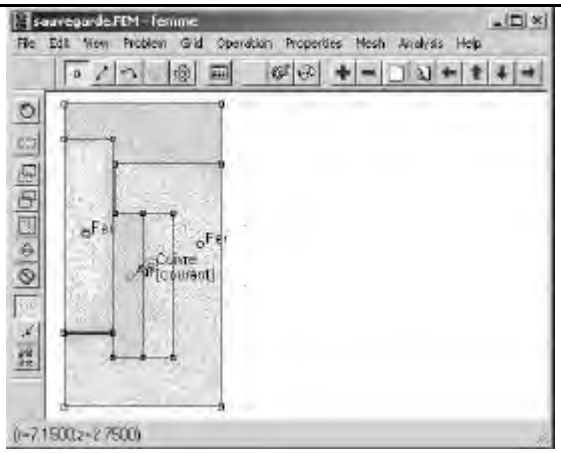


Figure 4: *Structure sous "**femme.exe**".*

Le logiciel propose de faire automatiquement un ensemble de simulations pour diverses positions du noyau. Cette opération s'effectue en suivant un "script" (programme) écrit dans un langage particulier: "**lua**" lancé directement à partir du préprocesseur **"File ® Open Lua Script".**

```
1  -- Ouverture du fichier
2  openFemmFile("electrovanne.FEM")
3
4  -- Initialisation des fichiers de
5  -- sauvegardes de données
6     handle = openfile("resultats.txt","w")
7     closefile(handle)
8
9  xmin=0.02     -- Valeur min de l'entrefer
10 xmax=0.4      -- Valeur max de l'entrefer
11 dX=(xmax-xmin)/100   -- pas de déplacement
12
13 for i=1,101 do
14    handle = openfile("iteration.txt","w")
15    write(handle,i)
16    closefile(handle)
17    analyse(0)
18    runpost("post-boucle.lua")
19    dX=(xmax-xmin)/100
20    selectgroup(1)
21    movetranslate(0,dX)
22    clearselected()
23 end
24
25 -- Retour en position initiale
26    dX=(xmax-xmin)/100
27    selectgroup(1)
28    movetranslate(0,-101*dX)
29    clearselected()
```

Script 1

Le manuel explicatif pour l'écriture de scripts en "lua" est accessible sur le site :

"http://www.lua.org/docs.html".

Les lignes allant de 14 à 16 servent à écrire l'itération dans un fichier qui sera lu dans le Postprocesseur et permettra de connaître avec exactitude la longueur de l'entrefer x. L'expression à la ligne 17 exécute le maillage et les calculs par éléments finis. De la ligne 19 à la ligne 22, nous réalisons le déplacement du noyau (augmentation de l'entrefer x). Enfin la commande de la ligne 18 exécute le script lua suivant et permet les calculs de forces dans le Postprocesseur.

La force électromagnétique est calculée par le logiciel à partir du tenseur de maxwell. Nous rappelons qu'il s'agit de sommer un vecteur "densité surfacique de force" sur une surface toute entière dans l'air et entourant la partie mobile (Fig 5).

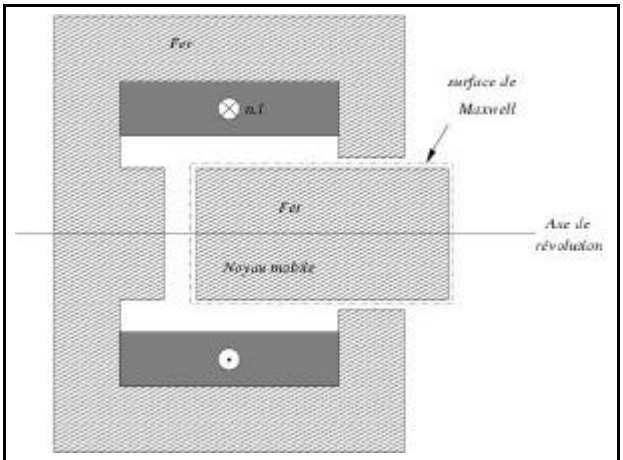


Figure 5: *Surface du tenseur de Maxwell.*

La surface est orientée de l'intérieur vers l'extérieur. Cette orientation est indiquée au logiciel en décrivant la surface du tenseur de Maxwell dans le sens des aiguilles d'une montre (ligne en 2D).

```
      -- post-boucle.lua --
1  -- Récupération de l'itération
2     handle = openfile("iteration.txt","r")
3     i=read(handle,"*n")
4     closefile(handle)
5
6  -- Selection de la surface d'intégration
7     Xmin = 0.02
8     Xmax = 0.4
9     X=1.22*(i-1)*(Xmax-Xmin)/100
10
11 -- Contour dans le sens des aiguilles
12 -- d'une montre.
13    addcontour(0,X+3.2)
14    addcontour(0.8,X+3.2)
15    addcontour(0.8,X)
16    addcontour(0,X)
17    addcontour(0,X+3.2)
18
19 -- Calcul et écriture de la force dans le
20 -- fichier "resultats.txt"
21    Fx_re,Fx_im,Fy_re,Fy_im = lineintegral(3)
22    handle = openfile("resultats.txt","a+")
23    write(handle,Fy_re,"\n")
24    closefile(handle)
25
26    exitpost()
```

Script 2

La figure (Fig 6) présente les équipotentiels vecteur (lignes de champ) affichés à partir du Postprocesseur. Cette figure exprime également la concentration du champ magnétique dans les différents matériaux par un effet de couleur (densité de gris en N&B).

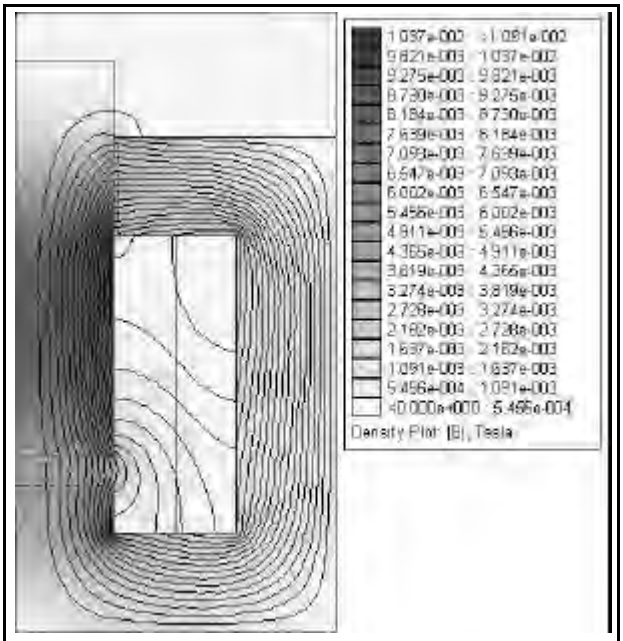


Figure 6: *Représentation des lignes de champ dans le post-processeur.*

La figure (Fig 7) présente une comparaison entre les résultats obtenus par FEMM et par le calcul analytique simplifié. Nous constatons que les deux résultats sont proches l'un de l'autre.

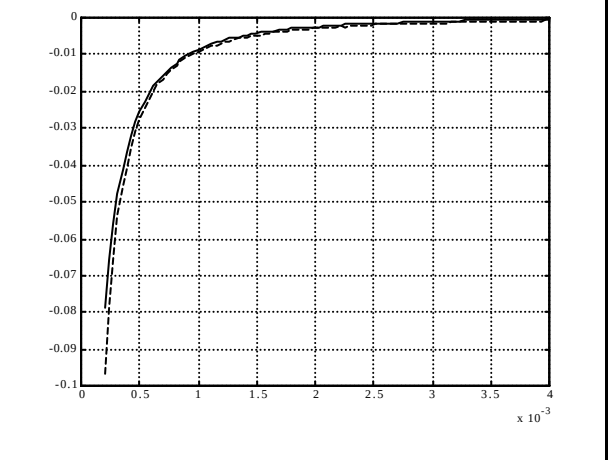


Figure 7: *Comparaison entre calcul analytique et FEMM*

DÉTERMINATION DES INDUCTANCES D'UNE MACHINE ASYNCHRONE

Le système d'étude est une machine asynchrone d'induction considérée comme un système invariant par translation. Ceci revient à négliger les effets d'extrémités (têtes de bobines). Nous nous intéressons à la détermination des inductances propres par phase.

Étude analytique simplifiée

Nous considérons une machine industrielle qui comporte 2 paires de pôles avec 4 encoches par pôle et par phase au stator et 28 barres au rotor. La figure (Fig 8) représente un quart de machine.

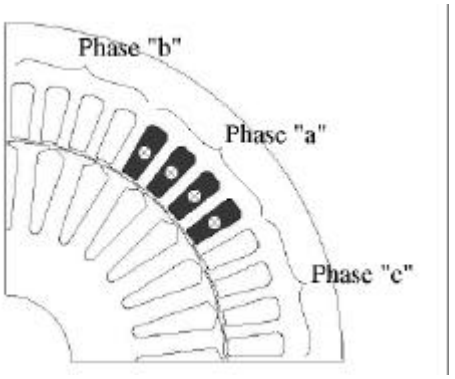


Figure 8: *Architecture d'un quart de machine.*

Chaque encoche est constituée d'un bobinage de 20 spires. En imposant un courant de 1 ampère, nous pouvons aisément tracer la force magnétomotrice E_{mma} créée par la phase "a" en fonction de l'angle mécanique (θ_m).

Pour effectuer l'étude théorique simplifiée, nous considérons que la perméabilité du fer est infinie et que les lignes de champs dans l'entrefer restent radiales. Dans un premier temps, nous considérons l'entrefer comme constant et égal à 0,4 *mm* sur toute la périphérie (nous négligeons donc les effets d'encoches). La première hypothèse permet d'écrire que la totalité de la force magnétomotrice (Fig 9) est « consommée » dans l'entrefer.

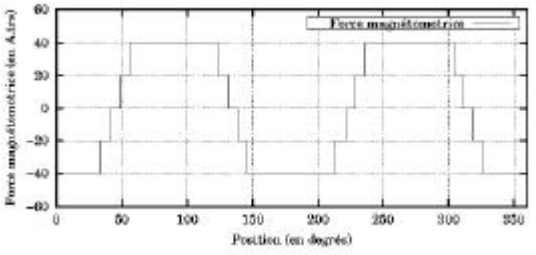


Figure 9 : *Force magnétomotrice.*

Le fait de supposer l'entrefer constant sur tout le pourtour permet de calculer l'excitation magnétique H_e $E_{mma}(\theta_m)$ et donc le champ magnétique $B(\theta_m)$ comme simplement proportionnel à la force magnétomotrice.

$$B(\theta_m) = \mu_0 . H_e(\theta_m) = \mu_0 \frac{E_{mma}(\theta_m)}{e} \qquad (5)$$

Le flux s'obtient par intégration du champ magnétique sur une surface cylindrique de longueur d = 15 *cm* (longueur axiale Du stator actif) et de rayon *r* = 54.8 *mm* (rayon moyen d'entrefer).

$$\varphi = \frac{\mu_0 . r . d}{e}\left(\left[n.I.\theta_m \right]_{\frac{13\pi}{48}}^{\frac{15\pi}{48}} + \left[2n.I.\theta_m \right]_{\frac{15\pi}{48}}^{\frac{33\pi}{48}} + \left[n.I.\theta_m \right]_{\frac{33\pi}{48}}^{\frac{35\pi}{48}} + \left[n.I.\theta_m \right]_{\frac{61\pi}{48}}^{\frac{63\pi}{48}} + \left[2n.I.\theta_m \right]_{\frac{63\pi}{48}}^{\frac{81\pi}{48}} + \left[n.I.\theta_m \right]_{\frac{81\pi}{48}}^{\frac{83\pi}{48}} \right) \quad (6)$$

Il convient de souligner que cette expression analytique est moins complexe qu'il ne paraît. On obtient finalement :

$$\varphi = 4n \frac{\mu_0 . r . d}{e} \frac{5\pi}{12} I \quad (7)$$

Le flux étant produit par 4 bobines de 20 spires chacune. Nous pouvons alors en déduire la valeur de l'inductance propre de la phase:

$$L_{sa} = 4n \frac{\varphi}{I} \quad (8)$$

On obtient :

$$L_{sa} = 216\,mH \quad (9)$$

Simulation avec FEMM

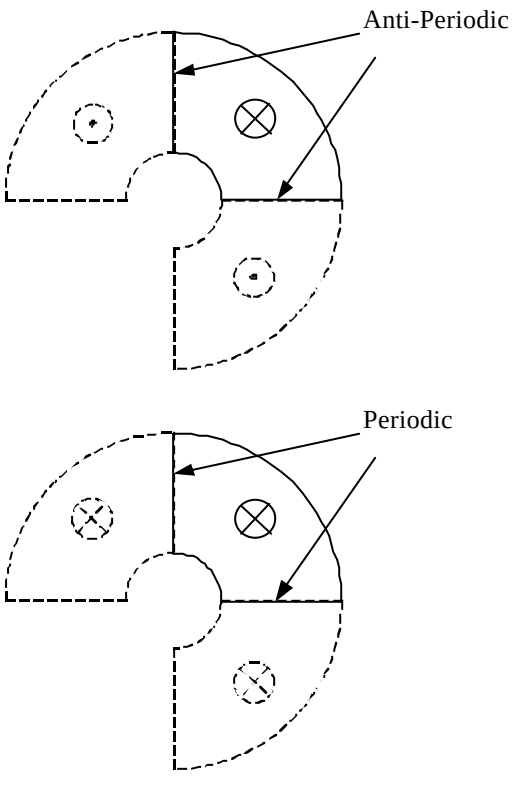


Figure 10 : *Conditions de répétition aux limites*

La première étape consiste à analyser la structure mise en oeuvre. Dans notre cas, nous savons que la machine est constituée de 2 paires de pôles. Il n'est donc pas nécessaire de simuler la machine entière: un quart suffit. Les limites aux frontières doivent être fixées de manière adéquate. **FEMM** met à notre disposition 2 types de conditions aux limites permettant de réduire le modèle: **"periodic"** et **"antiperiodic".** La première consiste, comme son nom l'indique, à la reproduction exacte de la structure et des sens des courants sur les côtés adjacents. La seconde reproduit la structure, mais inverse le signe des courants, tensions, potentiels vecteurs, ... (Fig 10)**.**

Pour la machine considérée, nous utilisons la propriété **"anti-periodic".**

Il convient maintenant de définir ce que les mathématiciens appellent « les conditions aux frontières », à savoir dans notre cas les frontières non concernées par l'antipériodicité. Ces conditions permettent de préciser le potentiel sur ces frontières. La figure suivante (Fig 11) représente la fenêtre **"Properties ® Boundary"** dans laquelle sont précisées ces conditions. La nature physique aux frontières : limite fer-air, nous conduit à proposer un potentiel vecteur constant et nul. Ce qui conduit à des lignes de champs qui seront parallèles aux frontières concernées en leur voisinage.

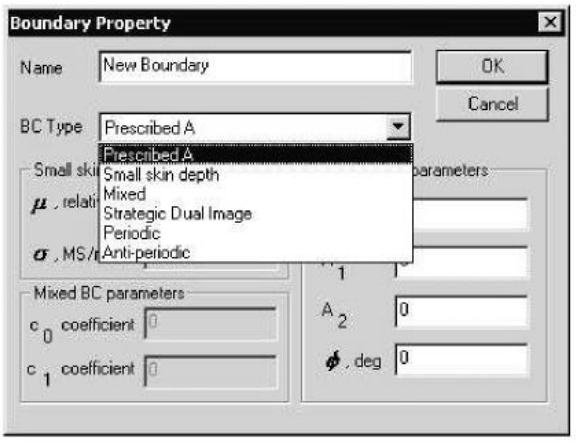


Figure 11 : *Conditions de potentiel aux limites.*

La résolution peut maintenant être lancée, il reste à récupérer les résultats qui, sous forme brute sont les valeurs du potentiel vecteur aux nœuds du maillage. Nous proposons d'utiliser le Postprocesseur pour exploiter ces résultats sous plusieurs formes : tracé des lignes de champ, calcul de l'inductance propre d'une phase et examen du champ dans l'entrefer.

Lignes équipotentielles

La figure (Fig 12) présente les lignes équipotentielles (lignes de champ) ainsi que l'intensité du champ magnétique (plus ou moins grisé). Il faut remarquer que les valeurs du potentiel attachées aux lignes tracées sont équidistantes, donc que l'intervalle entre 2 lignes « porte » la même valeur du flux (lignes équiflux).

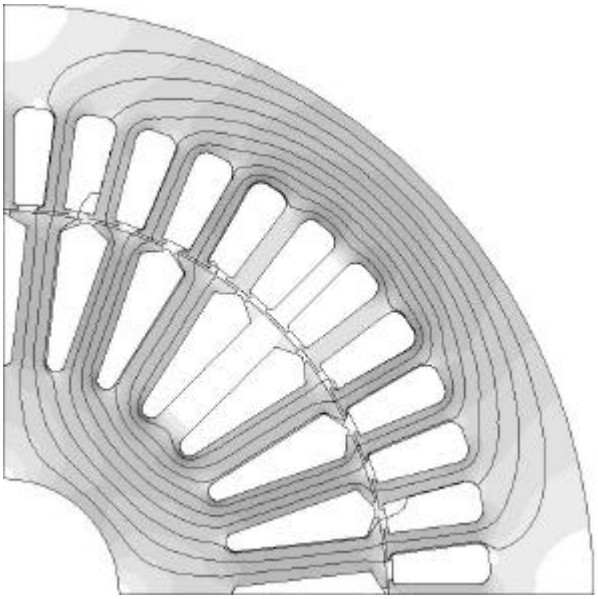


Figure 12: *Lignes équipotentielles*

Calcul de l'inductance propre

Pour le calcul de l'inductance propre, nous avons le choix entre deux méthodes :

a) Utilisation de la fonction « *line integral* »:

$$j = 4\left(\int_{\frac{9p}{48}}^{\frac{p}{2}} B\mathrm{d}S + \int_{\frac{11p}{48}}^{\frac{p}{2}} B\mathrm{d}S + \int_{\frac{13p}{48}}^{\frac{p}{2}} B\mathrm{d}S + \int_{\frac{15p}{48}}^{\frac{p}{2}} B\mathrm{d}S\right) \quad (10)$$

Et :

$$\mathrm{L_{sa}} = 4\mathrm{n}\frac{\varphi}{\mathrm{I}} = 146,2\,\mathrm{mH} \quad (11)$$

b) Utilisation de la fonction «*bloc integral* » (formulation énergétique):

$$\begin{aligned}(LI)I &= LI^2 = \int BdS.\int JdS \\ &= \int Adl.\int JdS = \int AJdV\end{aligned} \quad (12)$$

De la même façon que précédemment, il faut multiplier par 4 (seul un quart de machine est représentée). Par cette méthode, le résultat obtenu est de ***147,6 mH .***

Les deux valeurs obtenues sont bien entendu très proches l'une de l'autre, aux erreurs numériques près de la résolution. Ce résultat s'avère très éloigné du résultat obtenu à partir du calcul simplifié basé sur un entrefer constant : ***L = 216 mH***.

Champ dans l'entrefer et effets d'encoche

Nous nous proposons de rechercher l'origine de cette si grande différence en examinant la valeur du champ dans l'entrefer obtenue à partir de FEMM et en la comparant à celle issue du calcul simplifié. La fonction Femmplot.exe nous permet de tracer l'évolution de la valeur du champ dans l'entrefer en fonction de l'angle θ_m. Pour ce faire, il est nécessaire de préciser le contour le long duquel nous désirons obtenir la valeur du champ. La description de ce contour est faite soit par un script *lua* :

```
rayon = 54.8
----------------------------------------------------------
        for angle=0,90,0.1 do
                x = rayon*cos(angle)
                y = rayon*sin(angle)
                addcontour(x,y)
        end
                x = rayon*cos(90)
                y = rayon*sin(90)
                addcontour(x,y)
----------------------------------------------------------
```

Script 3

ou en utilisant directement la fonction « *add-contour* » du Postprocesseur. Nous obtenons le tracé de la figure (Fig 13).

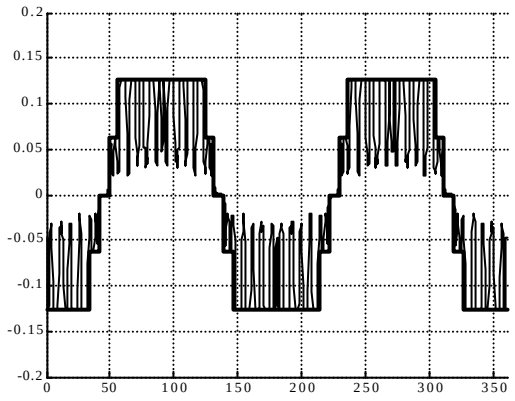


Figure 13 : *champ dans l'entrefer FEMM et calcul analytique à entrefer lisse*

Nous voyons que l'hypothèse simplificatrice d'un entrefer constant est loin de la réalité, mais, lueur d'espoir, la valeur maximale du champ suit correctement la valeur théorique.

Nous pouvons donc tenter d'améliorer la précision du calcul analytique en considérant un entrefer fonction de l'angle mécanique θ_m. Cette « fonction d'entrefer » tient alors compte des ouvertures d'encoches, aussi bien au niveau du stator que du rotor. Pour cela, les lignes de champ sont toujours considérées radiales au niveau de l'entrefer minimal mais sont supposées décrire un quart de cercle au niveau des ouvertures d'encoches. La figure suivante (Fig 14) illustre cette hypothèse. Nous déterminons alors la fonction entrefer en fonction de l'angle θ_m et, par intégration, nous en déduisons la valeur de l'inductance propre. Nous obtenons une valeur de **140 mH** pour l'inductance propre. Valeur très proche du résultat issu du calcul numérique du champ (**146 mH).**

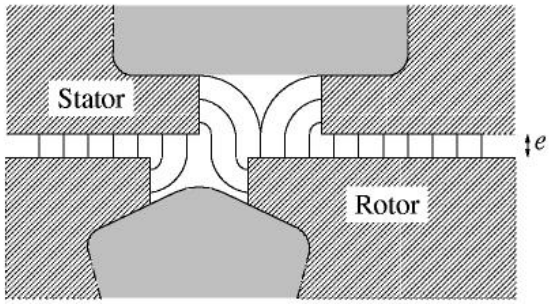


Figure 14 : *calcul analytique approché avec effets d'encoches*

CONCLUSION

Ce papier avait pour but de présenter un logiciel de calcul de champ magnétique qui soit à la fois peu cher (il est gratuit), performant et convivial. Pour l'utiliser dans notre recherche et en enseignement depuis plusieurs années, nous considérons que FEMM remplit bien ces fonctions. Loin de nous l'idée de présenter un « livret d'utilisation », mais seulement inciter le lecteur à le charger sur sa machine et à l'utiliser. Nous avons présenté deux exemples dont le premier est suffisamment simple pour être considéré comme un exemple d'initiation et le second nettement plus complexe. Nous avons trouvé intéressant de mettre en parallèle le calcul analytique par circuits magnétiques de réluctances qui est excellent sur le plan pédagogique (et technique) mais demande à être affiné lorsqu'il s'agit d'obtenir des résultats quantitativement corrects. L'utilisation du logiciel s'effectue au travers d'une ergonomie intuitive bien faite (en anglais cependant) avec une aide. L'utilisation du logiciel demande tout de même d'avoir de bonnes notions d'électromagnétisme.

RÉFÉRENCES

[1] M. Jufer : *Electromécanique (traité d'électricité, d'électronique et d'électrotechnique).* Editions Géorgie, 1979

[2] J.Ph. Perez, R. Carles & R. Fleckinger : *Electromagnétisme: vide et milieux matériels.* Masson, Paris, 1991.

[3] S. Canat, J. Faucher : *Fractional order: frequential parametric identification of the skin effect in the rotor bar of squirrel cage induction machine.* ASME DETC2003NIB-48393. (september 2-6, 2003)

[4] J. Chatelain : *Machines électriques - Tome 1.* Traité d'électricité, d'électronique et d'électrotechnique. DUNOD. (1983)

[5] D. Meeker : *Induction motor example.* *http://femm.foster-miller.net/examples/InductionMotorExample.pdf* (september 26, 2002)

[5] D. Meeker : *Finite Element Method Magnetic: User's manual.* *http://femm.foster-miller.net* (september 26, 2002)

Visualisation de courbes avec variation paramétrique interactive sous EXCEL

Claude MONTEIL, ENSAT, INP Toulouse
Michel METZ, ENSEEIHT, INP Toulouse
Institut National Polytechnique de Toulouse
6 allée Emile Monso - bp 4038 - 31029 Toulouse Cedex 4

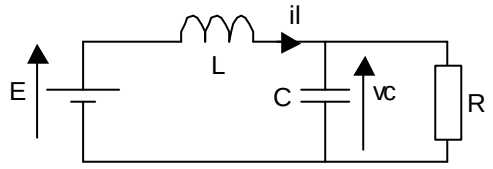
1. Introduction.

Pouvoir visualiser en temps réel la modification de courbes en fonction de paramètres, présente un intérêt pédagogique évident. La plupart des gens ignorent que cela peut se faire très facilement sans programmation avec un simple tableur tel que Excel (2000). L'objectif de cet article est de montrer sur un exemple, les quelques étapes à réaliser pour obtenir un tel résultat. L'approche proposée se veut très pragmatique, de façon à ce que les lecteurs puissent facilement transposer cette méthode aux exemples de leur choix. A la fin de l'article est indiquée l'adresse d'un site présentant plusieurs exemples dans divers domaines.

2. Analyse du problème.

Quel que soit le dispositif étudié, il faut pouvoir le décrire soit, sous la forme d'une solution analytique (lorsqu'on la connaît), soit sous la forme d'un système différentiel.

Considérant ainsi le circuit RLC ci-dessous :



on peut lui faire correspondre le système :

$$dvc/dt = (il-vc/R)/C$$
$$dil/dt = (E-vc)/L$$

L'analyse du problème se résume à cette seule écriture. Il faut également connaître les valeurs des conditions initiales vco et ilo.

3. Paramètres.

Ouvrir une feuille de calcul et la remplir avec une présentation en 5 colonnes comme indiqué ci-dessous :

	A	B	C	D	E
1		min	max	val	
2	E				
3	R				
4	L				
5	C				
6	vco				
7	ilo				
8	pas				

La première colonne contient les noms attribués aux paramètres. Les 2 colonnes suivantes (min et max) recevront respectivement les valeurs minimales et maximales des paramètres variables. La 4ème colonne (val) recevra les valeurs fixes ou variables des paramètres. Enfin la 5ème colonne sera réservée aux curseurs qui permettent la variation des paramètres.

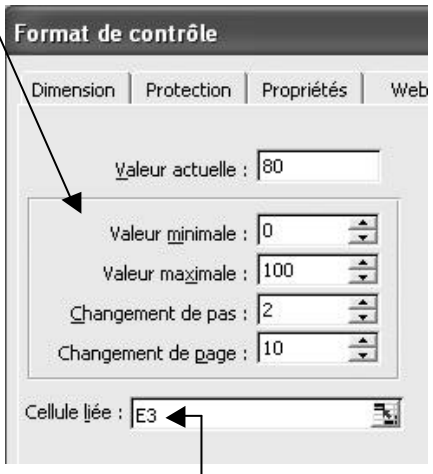
3.1 Curseurs : mise en place et réglages.

On convient dans cet exercice de faire varier 3 paramètres : R, L et vco. 3 curseurs seront ainsi placés respectivement dans les cellules E3, E4, E6.

Procédure.
Clic droit sur barre "standard" ; clic sur "formulaires" ; dans la barre des formulaires (figure ci-contre), clic sur le curseur.

Une petite croix apparaît ; placez la dans un coin de la cellule choisie (par ex. E3) : clic gauche et faites glisser en maintenant appuyé jusqu'à ce que le rectangle ait la taille de la cellule. On peut agrandir ou diminuer la taille du curseur avec les poignées. On peut le déplacer avec les flèches du clavier.

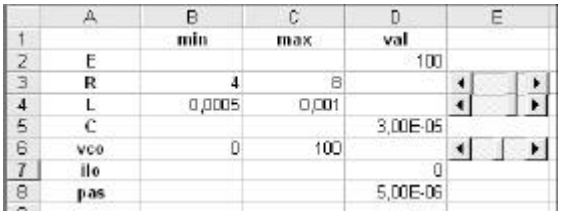
Pour le réglage des valeurs : clic droit sur le curseur / clic sur "format de contrôle". La boîte de dialogue ci-dessous apparaît. Recopier les valeurs de l'encadré.



Remplir la case cellule liée avec le nom de la cellule sur laquelle se trouve le curseur (E3).
La "valeur actuelle" qui est liée à la position du curseur, devient alors la valeur de cette cellule.
Copier ce curseur dans les autres cellules (E4, E6), en modifiant pour chacun dans "format de contrôle", le nom de la cellule liée.

3.2 Valeurs des paramètres.

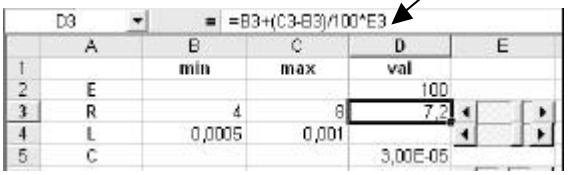
Les 3 curseurs ayant ainsi été placés dans la 5ème colonne, écrire directement les valeurs des paramètres fixes, ainsi que les valeurs min et max des paramètres variables (valeurs proposées sur la figure ci-dessous).



	A	B	C	D	E
1		min	max	val	
2	E			100	
3	R	4	8		
4	L	0,0005	0,001		
5	C			3,00E-05	
6	vco	0	100		
7	ilo			0	
8	pas			5,00E-06	

Il reste maintenant à écrire dans les cellules D3, D4 et D6 de la colonne "val" les expressions donnant la valeur des paramètres variables en fonction d'une part de leur valeurs min et max, d'autre part en fonction de la valeur des curseurs contenus dans les cellules E3, E4 et E6.

Sélectionner la cellule D3. Écrire dans la barre de formule : =B3+(C3-B3)/100*E3



D3 = =B3+(C3-B3)/100*E3

	A	B	C	D	E
1		min	max	val	
2	E			100	
3	R	4	8	7,2	
4	L	0,0005	0,001		
5	C			3,00E-05	

Touche "entrée" puis utiliser le curseur de la cellule E3 pour voir la modification de la valeur contenue dans la cellule D3.

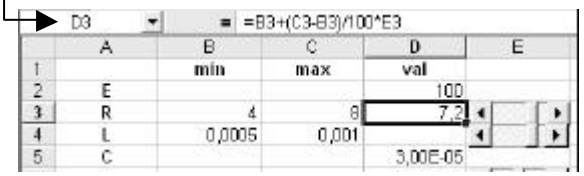
Attention. Cette expression tient compte des valeurs 0 et 100 utilisées comme valeurs min et max du "format de contrôle".

Recopier ensuite la cellule D3 dans les cellules D4 et D6 : les curseurs sont prêts.

3.3 Nommage des paramètres.

Il est intéressant de "nommer" ces paramètres de façon à les utiliser comme des variables. Cela permet de ne travailler que sur des expressions explicites et non pas sur des expressions faisant intervenir des noms de cellule.

La zone de nommage qui contient par défaut le nom de la cellule sélectionnée permet d'affecter à cette cellule un nom de variable.



D3 = =B3+(C3-B3)/100*E3

	A	B	C	D	E
1		min	max	val	
2	E			100	
3	R	4	8	7,2	
4	L	0,0005	0,001		
5	C			3,00E-05	

Clic sur D3 puis dans cette zone ; le nom de la cellule se retrouve à gauche (en bleu) ; écrire le nom du paramètre (R pour D3) ; touche "entrée", le nom du paramètre se retrouve au centre de cette zone.

Sélectionner à nouveau cette cellule pour vérifier que la zone de nommage fait bien apparaître "R".

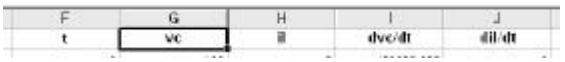
Attention : certains noms ne sont pas valides, en particulier ceux qui incluent des opérateurs (*,+,/…) : un message d'erreur apparaît et la zone de nommage garde le nom de la cellule.

Ne sont pas valides non plus les noms qui correspondent à des noms de cellule (ex. R1, C4…), de lignes (L) de colonne (C) : on peut alors prendre par exemple R_1 pour R1, C_4 pour C4, Le pour L, Ce pour C, etc…

En tenant compte de ces remarques, nommer ainsi toutes les constantes et les paramètres dans les cellules allant de D2 à D8. A l'exception de L et C (pour les quelles nous avons pris Le et Ce), ils peuvent être nommés exactement comme dans la 1ère colonne. Cliquer sur la flèche située à droite de la zone de nommage : un menu déroulant apparaît qui montre tous les paramètres introduits.

4. Variables

Il s'agit ici des variables d'état, il, vc, de leurs dérivées dvc/dt, dil/dt et du temps t. Ecrire le nom de ces variables dans les cellules F1 ➔ J1.



F	G	H	I	J
t	vc	il	dvc/dt	dil/dt

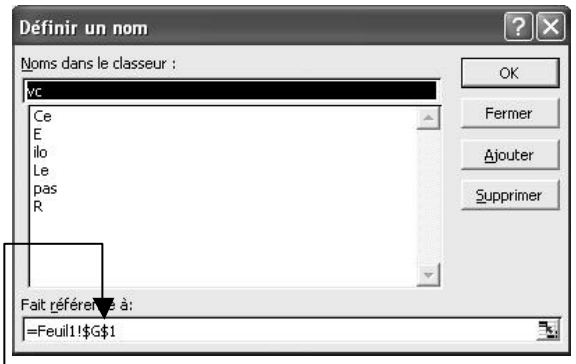
4.1 Nommage des variables.

Sélectionner par exemple la cellule (G1) correspondant à vc.

Menu insertion / nom / définir.

La boîte de dialogue "définir un nom" apparaît. On y retrouve les noms déjà attribués aux constantes et aux paramètres.

De plus on voit dans la barre supérieure (noire), le nom de la variable sélectionnée (vc) et dans la barre inférieure le nom de la cellule correspondante (G1).



Supprimer alors le 2ème "$" / clic sur "ajouter".

NOTA : **références absolues, références relatives**

Le symbole "$" définit une référence absolue. Ainsi, lorsque l'on remplace G1 par $G1, la référence reste absolue sur la colonne (G) mais devient relative sur la ligne (1). Cela signifie que lorsqu'on utilisera la variable vc dans une formule au sein d'une cellule appartenant à une ligne quelconque, vc désignera la cellule de la **même ligne** et de la colonne G. Ainsi, il suffira recopier chaque formule à l'identique dans les autres cellules de la même colonne (cf. plus bas : 5.Résolution).

On peut vérifier l'effet d'une variable relative en sélectionnant n'importe quelle cellule de la colonne G (G5 par exemple). Menu insertion / nom / définir ; dans la boîte de dialogue, sélectionner vc (la ligne devient bleue) : la cellule de référence est alors $G5 : le 2ème "$" étant bien supprimé, cela signifie que la variable vc est effectivement affectée à n'importe quelle cellule de la colonne G.

Remarque. Cette boîte de dialogue est accessible directement par le raccourci Ctrl F3.

Il faut maintenant affecter les autres variables aux autres colonnes, c'est à dire les variables t, il, dvc, dil (les noms dvc/dt, dil/dt ne sont pas valides à cause du symbole "/"). Rouvrir la boîte de dialogue ; écrire le nom de la variable dans la barre supérieure ; lui associer la bonne colonne ; "ajouter" puis passer à une autre variable.

Remarque. En cas d'erreur dans la saisie du nom d'une variable, le changement de nom n'est pas directement géré : il faut définir le nouveau nom avec la même référence (Ctrl F3, sélectionner l'ancien nom, puis écrire le nouveau dans la zone "Noms dans le classeur" et cliquer sur "Ajouter"), puis détruire l'ancien nom (le sélectionner et cliquer sur "Supprimer", puis refermer la fenêtre "Définir un nom").

4.2 Variables x *et* xprec

Résoudre un système à l'aide d'un tableur en vue de tracer des courbes, revient à remplir un tableau dont les colonnes correspondent aux variables et les lignes aux différentes valeurs de ces variables à chaque pas de calcul. Puisque l'on part d'un système différentiel, il faut utiliser une méthode d'intégration qui permet de calculer les valeurs des variables au pas n, situées dans une ligne donnée, en fonction des valeurs de ces mêmes variables au pas n-1 et qui sont donc situées dans la ligne au dessus. Considérant la variable x, on convient par commodité, d'appeler xprec, la même variable au pas précédent. Cela signifie alors que, pour un pas donné, la cellule où se trouve xprec est située juste au dessus de celle où se trouve x. Ainsi, pour définir xprec, il suffit de retirer une unité au numéro de la ligne.

Procédure. Clic sur J8 (par exemple) / Ctrl F3 / sélectionner dil : la barre inférieure indique $J8. Dans la barre supérieure "Noms", écrire dilprec / dans la zone inférieure "Référence", conserver $J et changer le 8 en 7 / bouton "ajouter". Faire de même pour toutes les autres variables, y compris t (tprec). Vérifier que toutes ces variables ont bien été rentrées avec les bonnes références (ex. il : $H8, ilprec : $H7).

5. Résolution.

Ligne 2

écrire 0 dans F2 (temps initial nul)
rentrer les conditions initiales :
dans G2 : =vco
dans H2 : =ilo

Remarque. On peut coller directement un nom de variable dans la barre de formule en utilisant la touche F3 puis en double-cliquant sur cette variable dans la liste qui apparaît.

Ecrire les équations du système :
dans I2 : =(il-vc/R)/Ce
dans J2 : =(E-vc)/Le

Ligne 3

écrire dans F3 : =tprec+pas
écrire la méthode d'intégration (ici Euler simple) :
dans G3 : =vcprec+dvcprec*pas
dans H3 : =ilprec+dilprec*pas
recopier les cellules I2 et J2 dans I3 et J3 par copier/coller ou poignée de recopie (sélectionner I2 et J2 et faire glisser la poignée en bas à droite de la sélection).

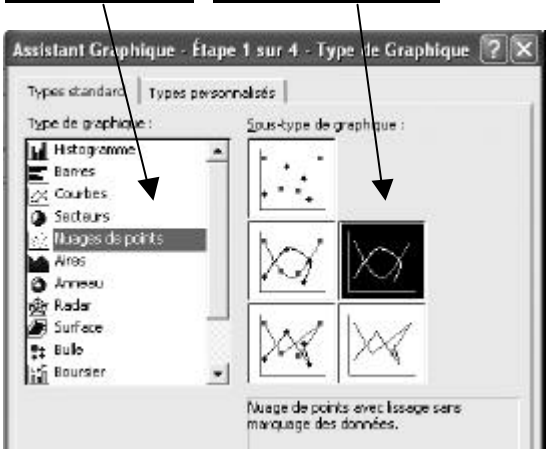
Autres lignes : tableau de valeurs

Recopie vers le bas de la ligne 3 à la ligne 602 (600 pas de calcul) : sélectionner la plage F3:J3 puis utiliser la poignée de recopie (en bas à droite de la sélection jusqu'à la ligne 602 (si on descend trop loin, on peut remonter avant de relâcher la souris) : le tableau est rempli, la résolution est achevée.

Attention. La recopie ne doit pas commencer à la ligne 2 sinon les conditions initiales écrasent les équations.

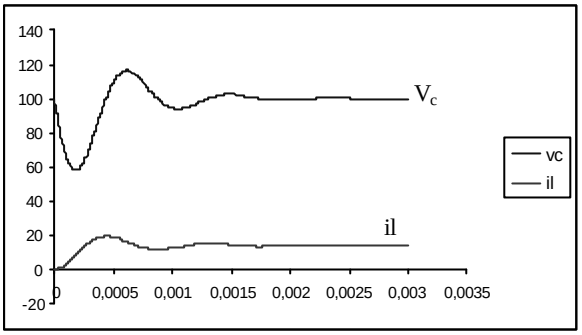
6. Graphiques

Sélectionner les colonnes F, G, H de la ligne 1 à la ligne 602 : sélectionner la plage F1:H1 puis Shift/Ctrl/flèche bas. Puis assistant graphique / nuages de points / courbes avec lissage.



On obtient alors les diagrammes de la figure ci-dessous mais pouvant en différer par la présentation (voire annexes pour modifications).

On peut faire glisser ce graphique vers le haut de la feuille, par exemple à droite des curseurs et en dessous des noms des colonnes.



7. Activation des graphiques avec les curseurs

L'utilisation des curseurs modifie la valeur des paramètres, ce qui provoque une modification quasi immédiate du tableau de valeurs. Il faut que le graphique soit placé sur ce tableau de valeurs pour qu'il soit "rafraîchi" à chaque changement de la valeur du paramètre, ce qui donne bien l'impression de variation paramétrique temps réel. Si cette précaution n'est pas prise, le graphique n'est rafraîchi qu'au moment où on relâche le bouton de la souris. Si le graphique est "à cheval" sur le tableau, on voit alors apparaître une partie qui se rafraîchit et l'autre non.

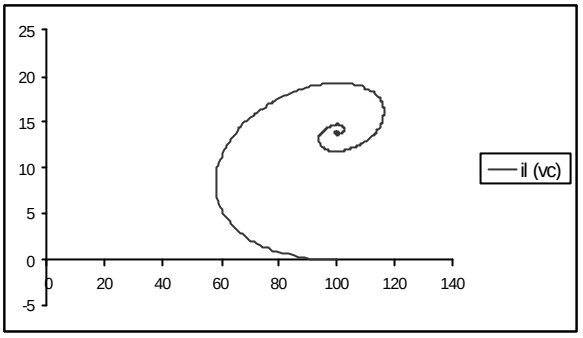
8. Curseurs et échelles automatiques

Lorsque l'on modifie les curseurs, la mise à l'échelle automatique des axes (qui existe par défaut) est gênante car elle provoque des "sauts" assez désagréables et qui font perdre de vue la dynamique de variation des grandeurs.

Pour éviter ce défaut, il faut verrouiller ces échelles après avoir agi sur les curseurs pour obtenir les plus fortes amplitudes qui conduisent donc – automatiquement – aux échelles les plus grandes : double clic sur l'axe des ordonnées ➔ boîte de dialogue "format de l'axe" / échelle / décocher les cases "Minimum" et "Maximum". On peut également forcer les valeurs présentes dans ces cases.

9. Représentation dans le plan d'état il (vc)

Clic droit sur le graphique / Données source… / onglet "série". Dans la case "nom", écrire "il (vc)", puis dans la case "Valeurs X" remplacer F par G (colonne vc) et enfin dans la case "Valeurs Y" remplacer G par H (colonne il). Dans le cartouche "série", clic sur "il" / supprimer. On obtient la courbe ci-après :



Annexes

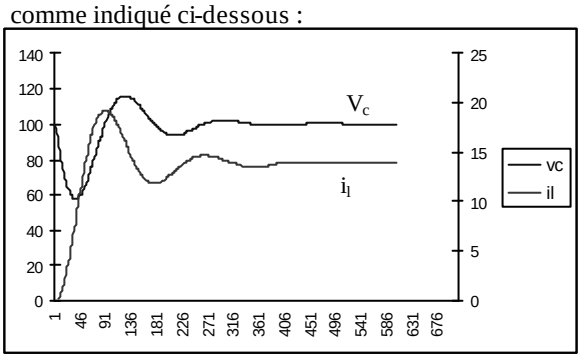
Pour modifier la présentation d'une courbe : double clic sur cette courbe ➔ boîte de dialogue "format de la série de données".

Pour modifier la zone de traçage : la zone de traçage correspond à la surface où se trouvent les courbes ; double clic sur cette surface ➔ boîte de dialogue "format de la zone de traçage".

Pour modifier la zone de graphique : la zone de graphique correspond à la surface qui entoure la zone de traçage ; double clic sur cette surface ➔ boîte de dialogue "format de la zone de graphique".

Pour modifier les séries de données : clic droit sur le graphique / Données source… / onglet "série".

Pour mettre à l'échelle 2 courbes : on peut améliorer la présentation en affectant un facteur d'échelle au courant (en le multipliant par 4 par exemple). On peut utiliser également une option d'Excel permettant de représenter un graphique à 2 axes, comme indiqué ci-dessous :



Procédure. Clic dans la zone de graphique / assistant graphique / onglet "types personnalisés" / courbes à 2 axes / terminer. Utiliser éventuellement les remarques précédentes pour donner la présentation voulue.

10. Plus d'information

Pour en savoir plus (liste de discussion, autres exemples, …), consulter :
http://www.inp-toulouse.fr/excel-interactif

LOGICIELS LIBRES EN SECTION DE TS ÉLECTROTECHNIQUE

Jean-Philippe ILARY
Lycée Jules Ferry 78000 VERSAILLES.
email : ilary.kjp@wanadoo.fr

Résumé : ***La tendance actuelle des administrations et des sociétés industrielles de nombreux pays est de faire migrer leur parc informatique vers l'utilisation de logiciels libres. Il est dans la prospective française de réaliser ce transfert dans les deux années à venir.***

Du point de vue de la formation, de plus en plus d'établissements adoptent cette démarche. Il existe un réel mouvement éducatif du logiciel libre. Pour preuve, l'académie de Grenoble propose une distribution basée sur Linux.

L'article propose d'établir un état de l'art non exhaustif des logiciels libres pouvant être utilisés en section de TS Electrotechnique.

Mots clefs : Logiciels libres, Linux, Licence GPL

1. Introduction

Quelques années d'expérience de gestion du parc informatique en section de TS m'ont amené à me positionner par rapport à divers axes de réflexion.

L'acquisition d'une licence ou d'une mise à jour pour tous les logiciels utilisés est problématique, pour des raisons de budget et de fonctionnalité. Ceci est d'autant plus vrai pour une utilisation ponctuelle.

Le système d'exploitation représente le premier élément installé sur les ordinateurs, mais très rapidement, les sections disposent de versions vieillissantes de Windows® et ne sont pas toujours en mesure de les mettre à niveau.

Le renouvellement de ce parc logiciel représente un tel coût que de nombreux établissements scolaires choisissent la voie des logiciels libres.

2. Besoins informatiques de l'enseignant en TS Electrotechnique

L'enseignant et l'étudiant utilisent une logithèque diversifiée.

Le collègue, pour préparer ses cours, va exploiter des logiciels spécialisés à sa filière, effectuer des recherches sur l'Internet et utiliser une suite bureautique pour mettre en forme ses propos.

L'étudiant adoptera, au cours de sa formation, la même démarche.

Ainsi, les paragraphes suivants se proposent d'analyser les besoins logiciels principaux en TS Electrotechnique. Les thèmes abordés sont :

- Système d'exploitation,
- Logiciel spécifique à l'Electricité,
- Logiciel de dialogue avec l'appareillage de mesure et de programmation d'automate,
- Logiciel de simulation électronique (Pspice, MatLab),
- Logiciels de programmation en assembleur et en C,
- Edition de schémas électromécaniques,
- Navigateur Internet,
- Suite bureautique,
- Logiciels de PAO,
- Edition de typon,
- Gestion réseau.

3. Système d'exploitation

Le système d'exploitation présent par défaut sur tous les ordinateurs livrés à l'Education Nationale est Windows®. En règle générale, il est suffisant pour nos étudiants. Toutefois, si la sécurité est primordiale dans la salle informatique, ce système est inadapté. En effet, vu le nombre important de versions installées dans le monde, il est très facile de trouver sur la toile les logiciels nécessaires au franchissement des diverses barrières. Le système Linux offre des services de sécurité, même dans les versions de base. Ainsi, il est possible d'avoir des espaces de travail sécurisés différents pour chaque étudiant.

La particularité de Linux est sa gratuité. Il offre les mêmes services que ceux de Windows® au niveau système (vis-à-vis de notre public et d'Internet).

Des distributions de Linux (le système avec l'environnement graphique XFree et des logiciels) sont librement téléchargeables sur l'Internet, ainsi que les mises à jour.

Les trois distributions principales sont par ordre de simplicité de mise en oeuvre :

- Mandrake Linux 9.2 (3CD) (www.mandrakelinux.com/fr/) la plus simple à installer
- Redhat 9.0 (3CD) (www.redhat.com/)
- Debian 3.0 rev1 (www.debian.org/) la plus sécurisée et disponible sur microcontroleur, Alpha etc.

Il est possible d'installer Linux sur une autre partition de façon à avoir Windows® et Linux sur le même disque dur. Lors du démarrage, le Linux Loader (LILO) vous permettra de lancer le système souhaité.

Les liens ci-dessous vont clore mes propos sur cette introduction à Linux et aideront à obtenir de plus amples renseignements.

- www.linuxfrench.net
- linuxfr.org
- www.lea-linux.org

Le code source de Linux est accessible gratuitement, ce qui fait que ce système peut être compilé sur d'autres plates-formes que le PC. Afin de permettre la distribution de programmes exempts de droits, la

fondation FSF (*Free Software Foundation*, traduisez *Fondation pour les logiciels libres*) a développé un projet nommé GNU (de façon anecdotique, GNU est l'acronyme récursif signifiant GNU is Not Unix). Les utilitaires GNU sont soumis à une licence d'utilisation de Linux (GPL, General Public Licence), expliquant les dispositions légales vis-à-vis de l'utilisation, la distribution et la modification de Linux.

Voici à titre indicatif quelques aspects de cette licence :

- la licence permet la modification du programme original, et sa diffusion (sous licence GPL),
- la licence accorde la vente du logiciel freeware sous sa forme originelle ou modifiée, à condition que le vendeur autorise la diffusion (même gratuite) de ce logiciel,
- la licence autorise l'utilisation du logiciel à des fins lucratives,
- les logiciels sous la licence GPL appartiennent à leurs auteurs et personne ne peut s'approprier une partie ou l'intégralité des droits d'auteur,
- la licence n'implique aucune forme de rémunération des auteurs.

Cette licence est parfois appelée *copyleft*, par analogie avec *copyright*. Le lien est le suivant : www.gnu.org.

4. Logiciels spécifiques à l'Electricité

Il est possible de trouver des logiciels sur l'Internet. Le site gersoo.free.fr/calsci.calsci.html en liste un grand nombre dans divers domaines scientifiques et présente les liens vers leur portail.

Pour n'en citer qu'un, FEMM permet d'étudier les champs électriques et magnétiques. Le site officiel est femm.foster-miller.net.

5. Logiciel de dialogue avec l'appareillage de mesure et de programmation d'automate

Ces logiciels sont en général fournis avec le matériel et seule une version Windows® existe. Pour l'instant, aucun revendeur ne développe de logiciel pour Linux. Toutefois, le monde du libre est vaste et de nombreuses personnes (Chercheurs et entreprises surtout) produisent de petits logiciels spécifiques à leur matériel. Il n'est donc pas impossible de trouver l'utilitaire. Toutefois, la recherche risque d'être longue.

6. Logiciels de simulation électronique (Pspice, MatLab)

Il est possible de trouver des logiciels s'appuyant sur le moteur spice pour Linux. Il existe le logiciel gEDA. Néanmoins, le test en situation reste à faire. Il est disponible à l'adresse suivante : www.brorson.com/gEDA/SPICE/.

Pour ce qui est d'un équivalent MatLab, il existe Scilab (tout aussi puissant que ses concurrents). Ce logiciel est libre de droit et distribué avec son code source. Il a été développé par des chercheurs de l'INRIA et de l'ENPC pour des applications industrielles et comme outils de recherche (développement et tests d'algorithmes). La syntaxe de Scilab est identique à celle de Matlab pour tout ce qui concerne les manipulations sur les vecteurs et les matrices. Il est possible de produire des graphiques 2D et 3D, des tracés de contours, des tracés paramétriques, des animations, etc… Les graphiques peuvent être exportés au format Xfig, Postscript, Gif et Latex. L'application Scicos est une boîte à outils permettant de simuler des systèmes dynamiques interconnectés. C'est l'analogue du logiciel Simulink de MatLab. Cet outil est très utilisé dans le monde industriel (par EDF par exemple). En plus de Scicos, Scilab fournit des boîtes à outils dans la plupart des domaines de l'ingénierie : traitement du signal, commande, optimisation, graphes, analyse fractale, calcul parallèle, statique, etc… Scilab est disponible sur les trois systèmes (Windows®, Linux et MacOS X)

Le site officiel est www.rocq.inria.fr/scilab

7. Logiciels de programmation en assembleur et en langage C

A travers GNU (GNU is Not Unix), il a été développé une panoplie d'utilitaires de programmation complète. Certes, ceux-ci n'utilisent pas un environnement graphique, mais restent d'une efficacité remarquable.

Il est possible de trouver des compilateurs pour des microcontrôleurs, et d'y installer un système Linux. Les PDA de la famille IPAQ, nativement sous WindowPocket, peuvent recevoir Linux, et contrairement à son concurrent faire fonctionner les mêmes logiciels que ceux d'une machine de bureau. Ceci trouve son utilité dans le cadre de nos projets industriels.

Il existe des versions pour Dos et Linux, sachant toutefois que le domaine de prédilection de ces environnements reste Linux.

Les différents liens sont :
gcc.gnu.org
www.delorie.com/pub/djgpp/current/ → gcc sous DOS
www.handhelds.org/geeklog/index.php → Linux sous IPAQ

8. Edition de schémas électromécaniques

Malgré de longues recherches, je n'ai toujours pas trouvé de logiciel dans ce domaine. Si d'aventure, vous y parveniez, merci de m'adresser un mail.

9. Navigateur WEB

Le navigateur Internet Explorer et Outlook Express sont la cible d'un grand nombre d'attaques de virus informatiques.

L'utilisation d'un autre navigateur que Internet Explorer permet de protéger le système plus efficacement. Deux navigateurs, de même origine, sont disponibles : Mozilla et Mozilla Firebird. Les deux intègrent le moteur du défins Netscape.

Mozilla est équivalent en tous points à Internet Explorer associé à Outlook. Il est aussi gourmand en ressource matérielle. Son utilisation est relativement classique.

Mozilla Firebird, quant à lui, est simple d'utilisation et novateur de part son approche. Il existe un nombre important de fonctions très utiles et encore non intégrées dans les autres navigateurs. L'utilisant en section de TS Electrotechnique, je n'ai rencontré que de petits problèmes facilement résolus.

Ces deux logiciels sont disponibles pour les plateformes Windows®, MacOS X et Linux.

Les liens vers ces deux logiciels sont www.mozilla.org ou www.frenchmozilla.org

10. Suite bureautique

L'ensemble du personnel d'un établissement scolaire et les élèves produisent leurs documents sur la suite bureautique Microsoft Office. Toutefois, ces logiciels ne sont que très rarement livrés en standard. Donc, d'un point de vue juridique, il est souvent intéressant de trouver une alternative. Elle existe avec la suite OpenOffice v1.1. Cette suite est produite en collaboration avec Sun (qui commercialise la suite StarOffice, grande soeur de OpenOffice). Les versions de StarOffice sont développées à partir des codes sources, APIs (Application Programming Interfaces), formats de fichiers et guides de références du projet OpenOffice.org. Cette dernière est sous licence libre et regroupe tous les logiciels disponibles dans la version professionnelle de Microsoft Office. La compatibilité avec cette suite est relativement bonne. Quoiqu'il en soit, même entre versions d'Office de Microsoft, les échanges de fichiers ne sont pas parfaits. Il suffit de voir les problèmes de mise en page rencontrés lors de la réalisation de cette revue.

Un grand nombre de formats d'import et d'export de documents sont disponibles (du .doc, au .pdf, au .xml en passant par le .html). De puissants outils, graphiques (plus complets que ceux d'OfficeXP) et mathématiques, aident à enrichir les documents produits sous writer (=Word), calc (=Excel) et impress (=Powerpoint).

Le principal défaut provient de notre habitude profonde à travailler sous Microsoft Office. Il est difficile d'acquérir de nouveaux automatismes.

Elle est considérée comme équivalente à Microsoft Office, voire plus performante dans certains domaines.

Il existe une version pour Windows®, OS/X et Linux. La dernière version V1.1 (de fin septembre 2003) est une réussite d'efficacité.

Le lien Internet de cette suite bureautique est: www.OpenOffice.org.

Une autre alternative, connue des universitaires, est TeX et LaTeX. TeX a été créé par Donald Knuth. Il s'agit d'un processeur de textes qui crée un document à partir d'un script écrit par l'utilisateur. La principale qualité de TeX est son extrême précision. En effet, l'unité de mesure de celui-ci est proche du dixième de la longueur d'onde de la lumière visible. LaTeX est un jeu d'extensions à TeX créé par Leslie Lamport. Les caractéristiques de TeX et LaTeX en font des outils incontournables en particulier dans le domaine de la publication mathématique. Malheureusement, leur utilisation orientée langage de programmation est souvent un handicap pour les débutants.

Le projet LyX a été initié il y a plusieurs années par Matthias Ettrich de l'université de Tübingen (Allemagne). Le but fixé était à l'origine de créer un éditeur permettant de rendre l'utilisation de LaTeX plus conviviale. (www.lyx.org)

11. Logiciel de PAO

Ce type de logiciel est peu utilisé dans nos sections, mais, il est intéressant de connaître son existence. Dans le cadre scolaire, les membres d'un club peuvent ainsi réaliser de petites publications sans souci de droit.

Scribus est l'un d'eux et est disponible sur web2.altmuehlnet.de/fschmid/ en version 1.1.1. Il est suffisant pour faire une petite publication sur plusieurs colonnes.

12. Edition de typon

Deux logiciels, exploitables sous Linux sont présentés. Il s'agit des logiciels Eagle connu des lecteurs d'Elektor et PCB.

La version de démonstration d'Eagle est limitée en taille de carte (10cm – 8cm), mais reste très complète, voir un peu trop.

PCB a une approche plus simplifiée. Cependant, son développement est peu actif.

Le lien Internet vers les sites d'Eagle et de PCB sont :

www.cadsoft.de/ pour Eagle
bach.ece.jhu.edu/~haceaton/pcb/ pour PCB

13. Gestion des réseaux

C'est le domaine de prédilection du monde libre et de Linux (et consoeurs). De nombreux outils sont disponibles (surveillance, gestion réseau).

Le logiciel Samba sous Linux permet à ce système de dialoguer avec des machines Windows®. Il est possible de réaliser simplement un serveur de fichiers ou d'impression avec une machine de moyenne puissance. Une aide en ligne est disponible sur le site suivant :

http://samba.linuxbe.org/fr/.

Il est aussi possible de réaliser à l'aide du paquetage Apache des serveurs Web (http, FTP…). C'est lui qui, en général, est derrière les pages Internet que vous explorez.

14. Dernière solution

Sur une machine Linux, il peut être utile d'installer un logiciel seulement disponible sous Windows®. La solution peut venir du logiciel Wine (**W**ine **i**s **n**ot a **E**mulator). C'est un logiciel qui permet d'exécuter certains programmes Win32. Toutefois, son évolution est permanente du fait du manque d'informations sur les dll de Windows®. Il n'existe pas de numéro de version stable, c'est la date complète qui sert de numéro. L'utilisateur doit s'armer de courage pour arriver à faire fonctionner un programme. Pour les détails, il est utile de voir les pages présentent sur le site www.winehd.org.

15. Conclusion

Après ce rapide tour d'horizon, autour du logiciel libre, il ne faut pas hésiter à franchir le cap et surtout à y consacrer un peu de temps.

Pourquoi ne pas poursuivre en développant votre propre logiciel ?

En effet, il existe une boîte à outils très performante et pratique, développée par la société Trolltech. Elle se nomme Qt, et est basée sur le principe de VisualC++. Le source écrit avec Qt peut être compilé pour Windows®, Linux et MacOS X sans modification. La licence pour Linux est libre. Pour les renseignements, voir le site du développeur www.trolltech.com.

16. Adresses utiles pour aller plus loin

www.linux.org (site de référence)
www.toolinux.com (site généraliste en français)
www.linuxhq.com (informations sur le noyau)
www.fsf.org (Free Software foundation)
gnuwin.epfl.ch/fr (logiciels libres de GNU sous Windows®)

www.sun.com (StarOffice)
www.openfem.net (boîte à outils pour Matlab et Scilab)

kile.sourceforge.net (interface TeX/LaTeX)

Journées 2004 de la section électrotechnique du club EEA

Avion et électricité : De l'électrotechnique haute performance

Université de Cergy-Pontoise
site de Neuville-sur-Oise, 18 et 19 mars 2004

Dans la limite de 20 places, ***un tarif spécial de 50 €*** *est proposé aux* ***collègues en poste dans le secondaire (BTS, lycées techniques)****. Ce tarif est valable uniquement sur présentation d'un justificatif professionnel et donne droit à assister aux conférences ainsi qu'aux actes du colloque (CDROM). La restauration est en revanche à la charge du participant (possibilité d'une restauration rapide sur place à la cafétéria du CROUS).*
Secrétariat : IUP GEII, rue d'Eragny, Neuville-sur-Oise, 95031 Cergy-Pontoise Cedex

Programme en page II de couverture

LA SIMULATION EN ELECTROTECHNIQUE AVEC PSIM

François LEPLUS
Professeur de Physique appliquée
Lycée Carnot. 21, Bd Carnot. 62 022 ARRAS Cedex

E-mail : bfleplus@wanadoo.fr
Site : http://f.leplus.free.fr

Résumé : Cet article présente deux exemples d'exploitation du logiciel PSIM dans le cadre des essais de systèmes et propose quelques pistes de réflexion sur l'utilisation de la simulation à objectif pédagogique.

1 Introduction.

Les élèves, dans leur grande majorité, ont acquis des connaissances en informatique (B2i ou utilisation personnelle) et sont en général attirés par l'informatique. L'apparition de logiciels conviviaux, simples d'utilisation et peu gourmands en moyens matériels, permet d'envisager l'utilisation de l'informatique comme outil pédagogique complémentaire des méthodes traditionnelles : cours et manipulation.

PSIMDEMO est un logiciel de simulation pour l'électrotechnique disponible gratuitement sur Internet (http://www.powersimtech.com). La version de démonstration permet de simuler de nombreux montages d'électronique de puissance, d'électrotechnique et d'automatique couvrant une grande partie des programmes de terminale STI (option électrotechnique et mécanique) et du BTS électrotechnique.

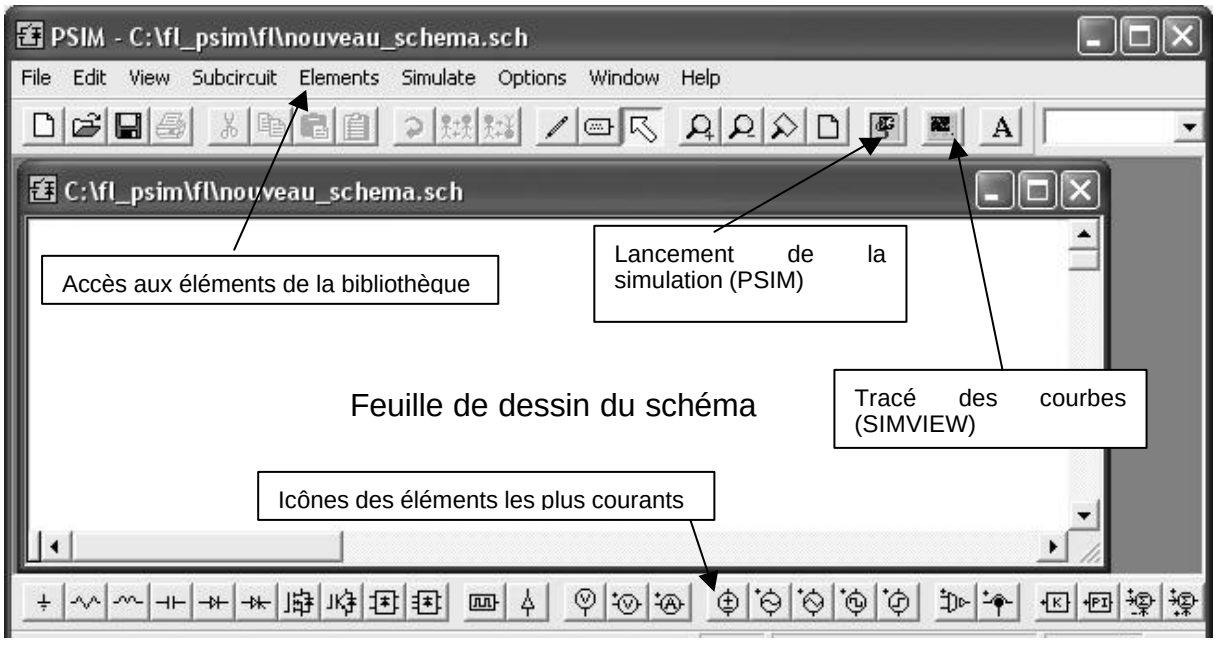
2 Présentation du logiciel PSIMDEMO

PSIMDEMO est constitué de 3 programmes :

- SIMCAD permet de dessiner le schéma électrique et de paramétrer les différents éléments du montage.

- PSIM est le coeur du logiciel; il effectue le calcul des grandeurs électriques : courants, tensions, puissances...

- SIMVIEW permet de visualiser les courbes et d'effectuer certains calculs : valeurs moyennes, efficaces, maximales, puissances, FFT...



Les composants disponibles sont regroupés dans la bibliothèque. On peut les classer en 6 catégories :

- semi-conducteurs : diodes, thyristors, GTO, transistors, IGBT, MOS...

- machines : machines asynchrone, synchrone et à courant continu, transformateurs, charges mécaniques...

- éléments passifs : bobines, résistances, condensateurs.

- sources : de tension, de courant, continues, alternatives, commandées...

- éléments de commande et de contrôle : circuits de commande pour semi-conducteurs, correcteurs P, PI, PID, amplificateurs opérationnels, fonctions analogiques et numériques...

- appareils de mesure : ampèremètres, voltmètres, sondes de courant, de tension, capteurs de couple, de vitesse...

Les paramètres décrivant le modèle de chacun des éléments doivent être précisés lors de la phase de réalisation du schéma électrique.

Pour effectuer la simulation, il faut également donner les paramètres de simulation :

- pas de calcul,
- durée de la simulation,
- instant initial pour le tracé des courbes.

On peut ensuite faire apparaître les courbes visualisant l'évolution en fonction du temps des grandeurs associées à un appareil de mesure. Il est également possible de visualiser des combinaisons (produit, somme...) des grandeurs précédentes et d'effectuer des mesures sur les diverses courbes.

Exemple : hacheur série alimentant une machine à courant continu.

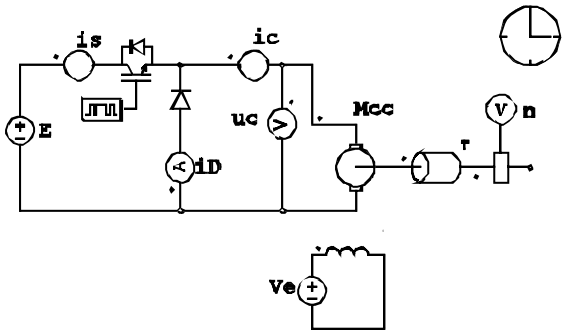


Figure 1 : *Schéma de simulation du montage*

Les limites de la version de démonstration concernent essentiellement le nombre maximal d'éléments du schéma (25), d'appareils de mesure (7), et de sources (7), le nombre de points par courbe visualisée (6000) et l'impossibilité de créer de nouveaux éléments dans la bibliothèque.

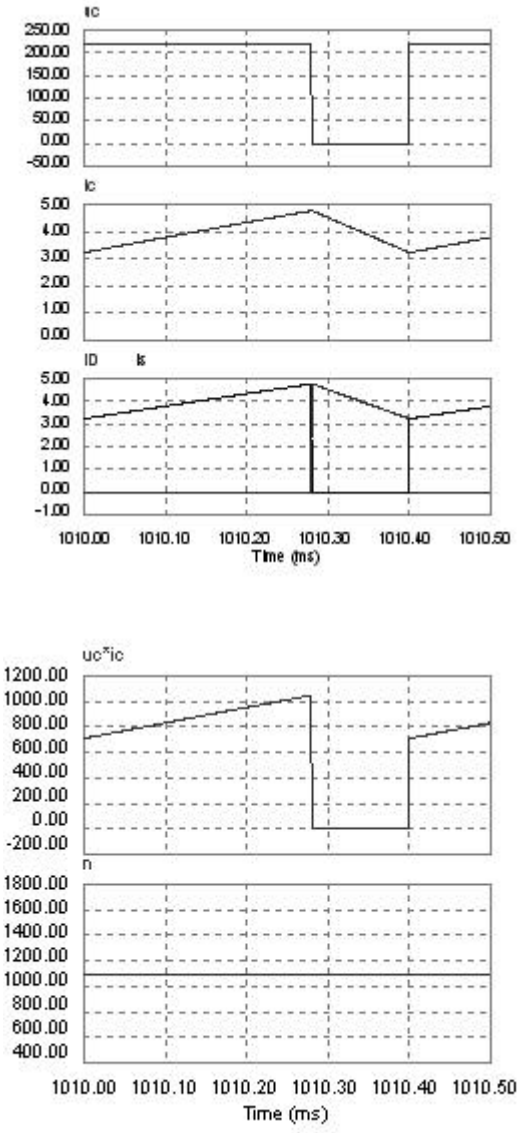


Figure 2 : *Courbes en régime permanent*

3 TRAVAIL PROPOSÉ AUX ÉLÈVES.

Deux sujets mettant en oeuvre la simulation sont proposés aux élèves dans le cadre des essais de systèmes en 2ème année de BTS électrotechnique.

Le texte complet des énoncés ainsi que des éléments de correction peuvent être téléchargés sur le site de l'auteur http://f.leplus.free.fr ou sur le site de la revue 3EI www.lesite3ei.com.

3.1. Séance n°1 : PD2 tout thyristors.

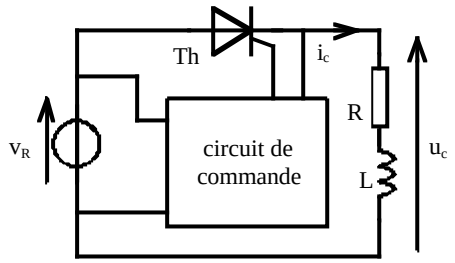
L'objectif de cette première séance est double :

- se familiariser avec l'utilisation de PSIM;

- exploiter les résultats de la simulation pour analyser le fonctionnement du montage.

L'initiation à l'utilisation de PSIM en électronique de puissance s'effectue à partir d'un exemple simple : charge RL reliée au réseau monophasé par l'intermédiaire d'un thyristor.

Réseau 230V-50Hz. Charge RL, R = 20Ω ; L = 250mH.



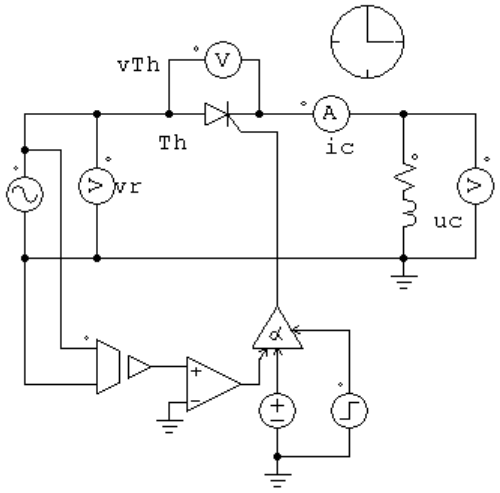


Figure 3 : *Schémas de principe et de simulation pour la commande d'un thyristor*

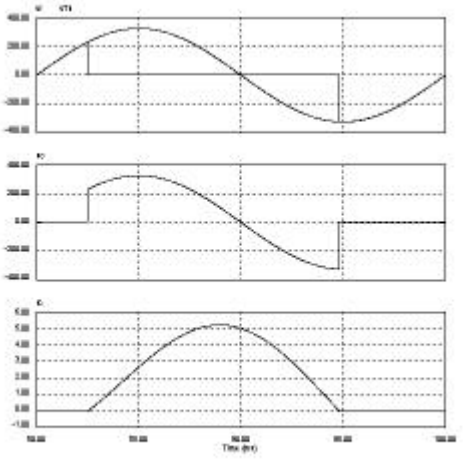


Figure 4 : *Courbes du fonctionnement d'un thyristor sur charge RL*

Il est demandé de rappeler, à partir de ces courbes, les conditions de commutations d'un thyristor.

Dans un deuxième temps, on fournit les courbes expérimentales d'un montage PD2 tout thyristors débitant sur charge RL (figure 5).

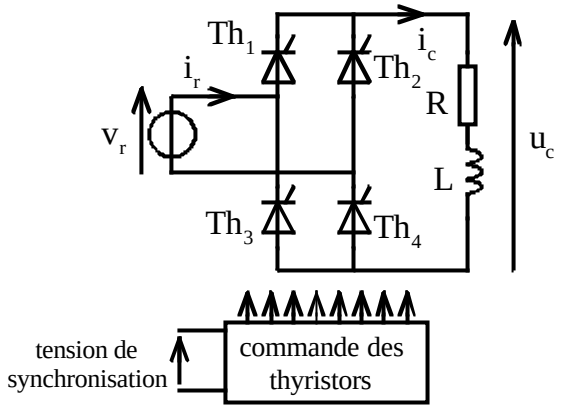
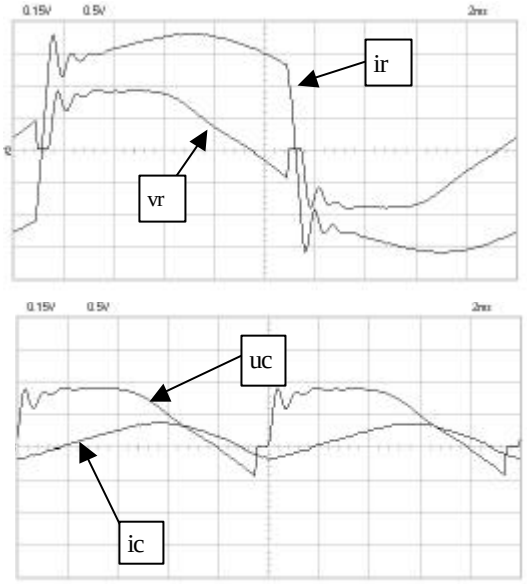


Figure 5 *: Schémas de principe et notations pour le PD2 tout thyristors*



Sonde de courant : 0,1V-1A ; Sonde de tension 1/200.
Valeur moyenne du courant dans la charge : I_{CO} = 4,3A .
Retard à l'amorçage : γ = 30°.
Inductance de lissage : L = 220mH.

Figure 6 : *Relevés expérimentaux et renseignements fournis aux élèves.*

Après avoir rappelé les relations générales et l'allure des courbes théoriques sur source de courant, il est demandé de simuler le fonctionnement du montage sur charge RL en supposant la source d'alimentation et les semi-conducteurs parfaits. La valeur maximale et la fréquence de la tension d'alimentation, le retard à l'amorçage, la valeur moyenne et l'ondulation du courant dans la charge doivent être identiques aux valeurs expérimentales.

La commande des thyristors doit être élaborée à partir des connaissances de cours et de l'exemple d'initiation à un thyristor.

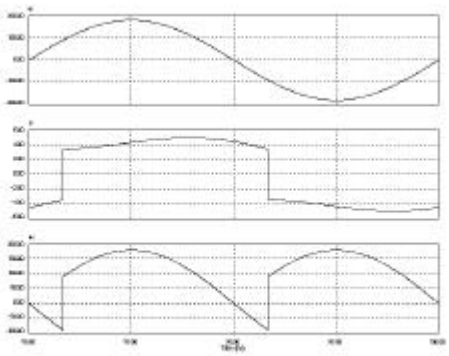


Figure 7 : *Courbes simulées sans tenir compte de l'inductance de ligne et des circuits RC*

On demande ensuite de compléter le schéma en ajoutant une impédance de ligne et des circuits RC en parallèle sur les thyristors. La valeur numérique de ces composants est fournie aux étudiants.

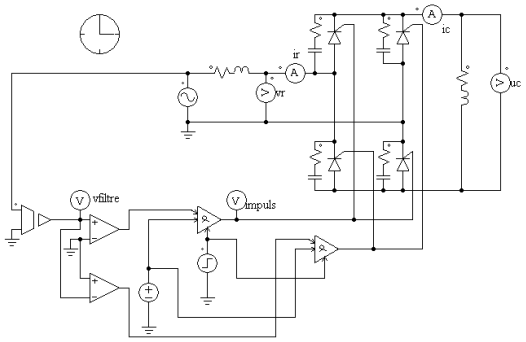


Figure 8 : *Schéma de simulation tenant compte de l'inductance de ligne et des circuits RC*

Il est demandé enfin d'exploiter les résultats de la simulation pour préciser les intervalles de conduction des semi-conducteurs et pour justifier l'allure des oscillogrammes.

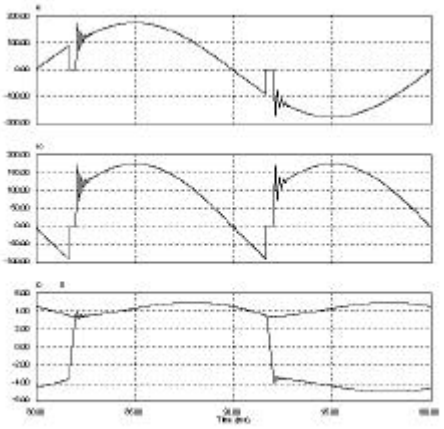
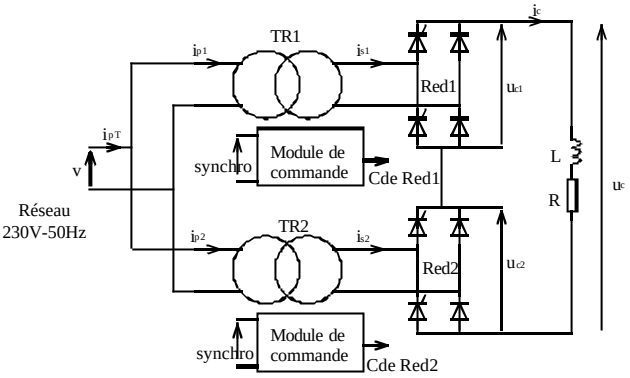


Figure 9 : *Courbes simulées avec inductance de ligne et circuit RC*

3.2. Séance n°2 : Association en série de 2 ponts PD2 mixtes.



TR1 et TR2 : transformateurs 220-24V ; 500VA.
L = 0,22H .
R ajustée pour que I_{co} = 5,0A.

Figure 10 : *Schéma de principe de l'association en série de 2 ponts PD2 mixtes*

L'objectif de la 2ème séance est d'initier les élèves à la conception de montages complexes en effectuant d'abord une mise au point de chaque sous-ensemble avant de passer à l'assemblage des différents modules.

L'étude est effectuée en parallèle en simulation et expérimentalement. Les valeurs numériques de la plupart des composants sont données. Seule la résistance R de la charge est à régler afin de maintenir constante la valeur moyenne du courant dans la charge.

On demande d'effectuer successivement :

- l'association transformateur – pont PD2 mixte – charge RL ;
- la réalisation d'un 2ème montage identique, mais avec un retard à l'amorçage γ_2 pouvant être modifié indépendamment du précédent (γ_1) ;
- l'association en série des 2 PD2 mixtes en série ;
- la mesure et la comparaison des puissances et des facteurs de puissance.

En simulation comme en pratique, le PD2 mixte est obtenu en plaçant une diode de roue libre en parallèle sur un pont complet monophasé.

Dans un premier temps, le transformateur et la charge sont supposés parfaits, ce qui permet de retrouver les courbes théoriques du cours dans l'hypothèse du courant constant.

On remplace ensuite le générateur de courant de la charge par une charge RL. L'ondulation de courant dans la charge se retrouve au niveau des courants secondaire et primaire.

Enfin, on affine la modélisation du transformateur : les résistances et inductances de fuites des enroulements sont intégrées dans le modèle de simulation, mais la saturation du circuit magnétique ainsi que les pertes fer ne sont pas prises en compte (inductance magnétisante constante).

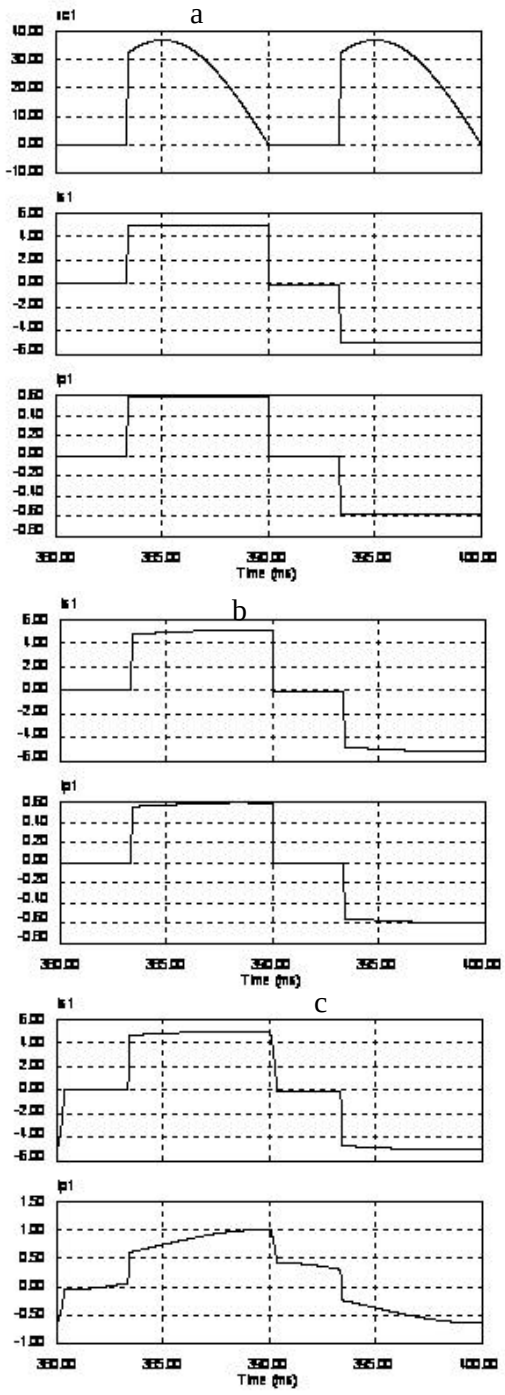


Figure 11 : *Transformateur-PD2 mixte. Courbes simulées.*

a) éléments parfaits
b) charge RL , transformateur parfait
c) charge RL et transformateur non parfait

Ces imperfections du transformateur font apparaître :

- le phénomène d'empiétement (modification de U_{co} , suppression des fronts raides des courants i_p et i_s) ;
- des modifications du courant primaire (suppression des paliers à 0 et augmentation de l'amplitude, car le courant magnétisant vient se superposer au courant secondaire ramené au primaire).

Le montage expérimental correspondant au premier module est ensuite réalisé afin de valider les résultats de la simulation et de disposer d'un premier sous-ensemble entièrement mis au point.

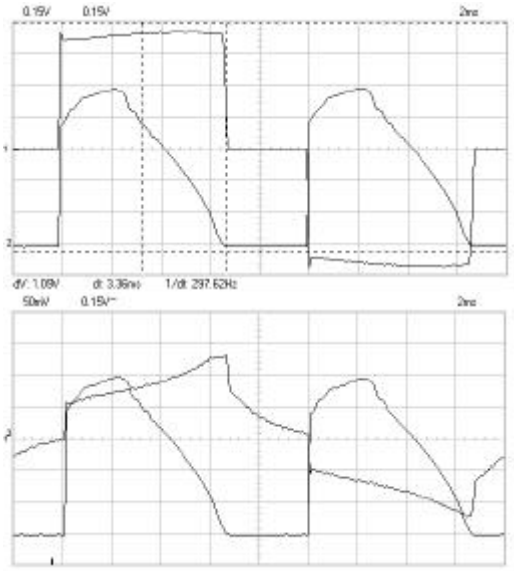


Figure 12 :*Transformateur-pont PD2 mixte. Courbes expérimentales pour g = 60° 7,5V , 1,5A(i_s) et 0,5A (i_p) par carreau*

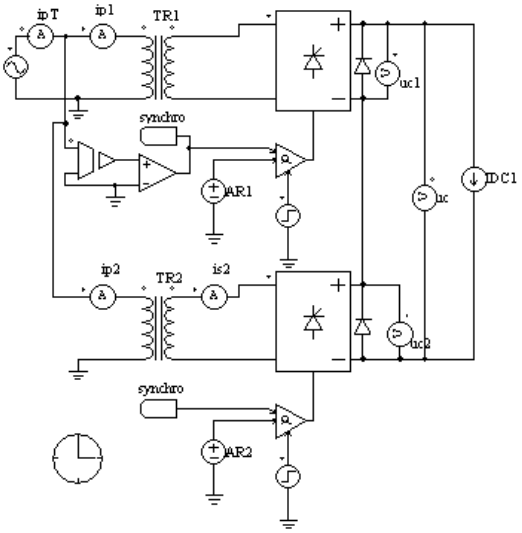


Figure 13 : *Schéma de simulation du fonctionnement de 2 ponts PD2 mixtes en série.*

Un deuxième module, identique au premier, est ensuite simulé (copier-coller) et câblé avant de passer à l'étude du montage complet.

On effectue d'abord la simulation du montage complet en supposant la charge et les transformateurs parfaits (courbes théoriques du cours) avant de simuler la structure complète en tenant compte des caractéristiques réelles de la charge et des transformateurs. Les relevés expérimentaux sont effectués en parallèle et comparés aux courbes de simulation.

Dans un dernier temps, on effectue une mesure des puissances actives, réactives et apparentes afin de comparer, pour un même point de

fonctionnement, le facteur de puissance d'un PD2 mixte et celui d'une association en série de 2 PD2 mixtes en série.

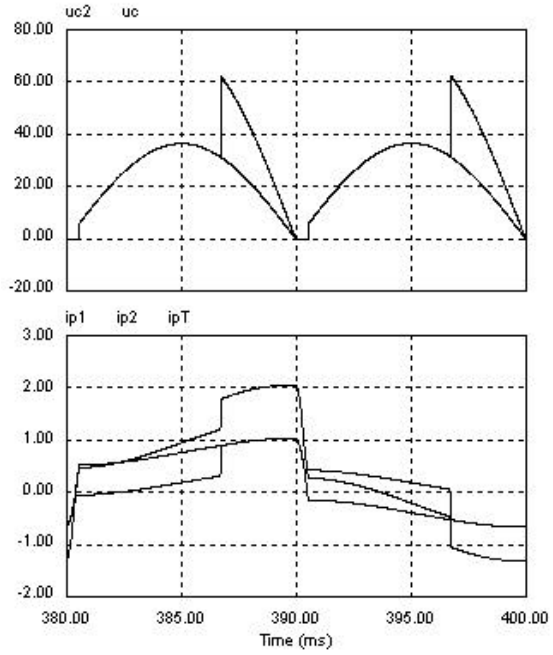


Figure 14 : *Courbes simulées pour $g_1 = 0°$ et $g_2 = 120°$*

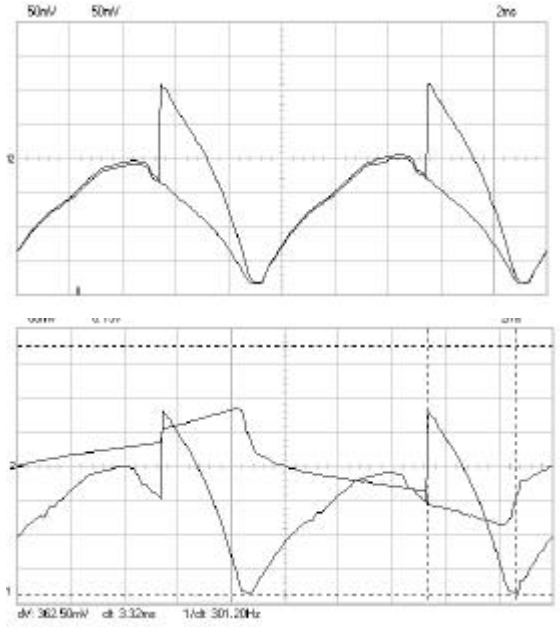


Figure 15 : *Courbes expérimentales pour $g_1 = 0°$ et $g_2 = 120°$*

Calibres 10V et 1,5A par carreau

4 RÉFLEXIONS SUR L'UTILISATION DE LA SIMULATION

4.1. Commentaires sur le déroulement des séances

Ces deux séances possèdent des objectifs sensiblement différents :

- aide à la compréhension du fonctionnement du montage pour la première;
- initiation à la conception de montages complexes pour la seconde.

La prise en main du logiciel ne pose aucun problème aux élèves : les différents montages sont rapidement opérationnels. Par contre, le paramétrage des composants qui nécessite des connaissances de cours, par exemple le calcul de R pour obtenir $I_{CO} = 4,3A$, est plus problématique. Certains élèves sont tentés d'essayer des valeurs au hasard mais se rendent rapidement compte que cela demande énormément de temps (et de chance).

Le choix des paramètres de simulation est le point le plus délicat. Les notions de régime transitoire et de régime permanent peuvent alors être précisées. Le choix du pas de calcul résulte quant à lui d'un compromis entre la précision et le temps de calcul :

- pas de calcul trop grand : valeurs approximatives et courbes déformées;
- pas de calcul trop faible : temps de calcul long et parfois dépassement du nombre maximum de points autorisés par la version de démonstration.

La réalisation du module de commande pour le PD2 tout thyristors impose de générer un deuxième signal de commande décalé de 180° comme en pratique. Un choix erroné de la tension de synchronisation ou un mauvais paramétrage des composants est l'occasion d'effectuer un dépannage sur le montage simulé dont la méthode est calquée sur un dépannage du montage réel : la visualisation de la tension d'alimentation et des signaux délivrés par les modules de commande entraîne une localisation rapide de l'organe « défectueux ».

La prise en compte des inductances de ligne et des circuits RC contribue à s'approcher des courbes expérimentales et à trouver les intervalles de conduction. L'empiétement est mis en évidence en visualisant simultanément les courants i_{th1} et i_{th2}.

La deuxième séance est axée sur l'association de modules : convertisseur, commande, transformateur, charge puis association de deux ensembles identiques. Il est important d'insister sur l'utilisation en parallèle de la simulation et du montage réel.

Dans un premier temps, le transformateur et la charge sont supposés parfaits ce qui permet de retrouver les courbes théoriques du cours. R se calcule par $\frac{U_{co}}{I_{co}} = \frac{V_M (1 + \cos\gamma)}{\pi \cdot I_{co}}$ quand le transformateur est parfait.

Lorsque les inductances de fuites du transformateur ne sont plus négligées, l'empiétement apparaît, ce qui a pour effet de faire chuter légèrement U_{CO}. Un ajustement de la valeur de R est alors nécessaire pour maintenir I_{CO} à 5A.

En simulation, on peut séparer les diverses imperfections des composants. L'intégration successive des diverses imperfections du montage guide les élèves dans la recherche de l'origine des différences observées :

- charge RL : ondulation du courant dans la charge, courants primaire et secondaire présentant des paliers non constants;

- transformateur : - empiétement, chute de la tension U_{CO}, suppression des variations brutales des courants primaire et secondaire;
- le courant magnétisant s'ajoute au courant secondaire ramené au primaire, disparition des paliers à 0, ondulation du courant primaire modifiée.

La procédure proposée ensuite a pour objectif de sensibiliser les élèves à la conception de montages plus complexes : réalisation de chaque sous-ensemble, puis association des sous-ensembles afin de faciliter la mise au point et le dépannage du système complet.

La dernière partie est essentiellement quantitative. Les mesures effectuées sur les montages simulés permettent :

- de justifier partiellement l'origine des différences entre résultats théoriques et expérimentaux;
- de montrer l'intérêt de l'association en série de redresseurs : diminution de la puissance réactive et amélioration du facteur de puissance.

4.2. Atouts et dangers de la simulation.

Contrairement à l'étude expérimentale, la simulation autorise la visualisation de l'effet de chaque hypothèse prise séparément. Les élèves obtiennent des courbes non réelles, mais l'analyse de ces résultats « artificiels » contribue à l'explication de l'allure des courbes expérimentales. Cette façon de procéder constitue un apport non négligeable de l'outil informatique.

La simulation permet de s'affranchir des calculs théoriques complexes. Il est alors possible d'affiner la modélisation du montage et des phénomènes et de dépasser les résultats de la théorie simplifiée établis en cours.

Dans certains cas, la simulation stimule l'esprit d'initiative et l'autonomie des élèves. Lors de l'expérimentation réelle, la part de liberté laissée aux élèves est relativement restreinte à cause des conséquences désastreuses qui peuvent découler d'une initiative trop téméraire. En simulation, la curiosité peut facilement être satisfaite : on visualise rapidement et autant de fois qu'on le désire, les conséquences des divers réglages et modifications sans crainte de destruction des composants. Les élèves travaillent avec une plus grande autonomie car le logiciel est suffisamment convivial.

Il faut toutefois être suffisamment directif au niveau de l'énoncé du TP afin de guider les élèves. L'enseignant peut alors recentrer son activité sur l'explication physique des phénomènes observés.

Le principal écueil à éviter est que la simulation ne se substitue, dans la tête des élèves et des enseignants, à la manipulation. Il est souhaitable de garder en permanence un lien avec la réalité : simulation et expérimentation en parallèle, ou résultats de manipulation présents lors de la simulation. La physique appliquée doit rester une science expérimentale et la simulation un outil d'aide à la compréhension des phénomènes observés. En cas d'absence de montage expérimental à proximité de la simulation, les ordres de grandeur proposés doivent être réalistes.

L'absence de risques, au niveau de la simulation, incite certains élèves à simuler des structures irréalistes : dès que le montage est correct du point de vue des liaisons électriques, on obtient des courbes qui peuvent être sans rapport avec la réalité physique ou technologique. Il convient d'insister sur la présence d'une démarche pédagogique et scientifique inhérente à toute manipulation organisée en 3 étapes : préparation - manipulation - conclusion. La simulation peut d'ailleurs être utilisée à chacune de ces étapes :

- la préparation théorique peut être effectuée en simulation en supposant les éléments parfaits;
- la réalisation et la simulation du montage peuvent être réalisés en parallèle . Dans certains cas, le mode opératoire peut être testé au préalable en simulation;
- enfin, la simulation peut être mise à profit pour justifier les résultats obtenus.

On déplore souvent, lors des séances consacrées à la simulation, la difficulté à obtenir un compte-rendu de la part des élèves. L'absence de lien direct avec la réalité et l'aspect ludique lié à l'informatique ne sont certainement pas totalement étrangers à ce comportement.

Enfin, il faut signaler que la simulation, aussi précise soit elle, ne montre pas toute la complexité du montage et ne permet pas de tout prévoir. Le recours à la réalisation réelle du montage reste une étape incontournable.

5 CONCLUSION.

La simulation informatique est un outil pédagogique supplémentaire à la disposition des enseignants qui doit être utilisé conjointement avec les manipulations de laboratoire, mais pas en remplacement des expérimentations. La simulation développe des compétences différentes de l'expérimentation, les objectifs doivent donc être adaptés.

Les QCM informatisés constituent une autre voie d'utilisation de l'informatique très appréciée des élèves (http://f.leplus.free.fr rubrique « un peu de théorie »). La réalisation de ce type d'activité demande toutefois un investissement personnel important.

Il est souhaitable que l'outil informatique soit intégré dans l'enseignement aussi souvent que possible, car les élèves doivent être familiarisés avec cette technologie présente dans le monde professionnel .

Le niveau d'utilisation de cet outil dans la pédagogie est modulable en fonction de la sensibilité de chacun : réceptivité et motivation des élèves, attrait de l'enseignant pour ces nouvelles méthodes.

1. BIBLIOGRAPHIE.

[1] François LEPLUS. TP d'électrotechnique par simulation. Préparation, manipulation et solution avec PSIMDEMO. Editions Ellipses 2002.

[2] Alan KELSEN. La simulation informatique en sciences physiques. BUP Mai 2002, n° 844, p.915-929.

[3] http://f.leplus.free.fr

CHAMPS TOURNANTS

Patrick BASTARD, Michel MEUNIER,
Professeurs à Supélec
patrick.bastard@supelec.fr ; michel.meunier@supelec.fr

Le programme didactique présenté ici est une "applet java" très facile à télécharger et à exécuter. Il permet de visualiser les champs tournants, dans une structure traditionnelle.

Ce que fait le programme

Le simulateur ci-dessous permet de représenter les champs oscillants créés par chaque phase d'une armature triphasée, ainsi que le champ résultant.

Ce champ est spatialement sinusoïdal ; on y fait l'hypothèse que la répartition des encoches et le nombre de conducteurs dans chaque encoche sont idéaux. La périodicité spatiale du champ dépend du nombre de pôles de la machine.

En outre, ce champ résultant tourne à une vitesse qui dépend de la pulsation des courants d'alimentation et du nombre de paires de pôles.

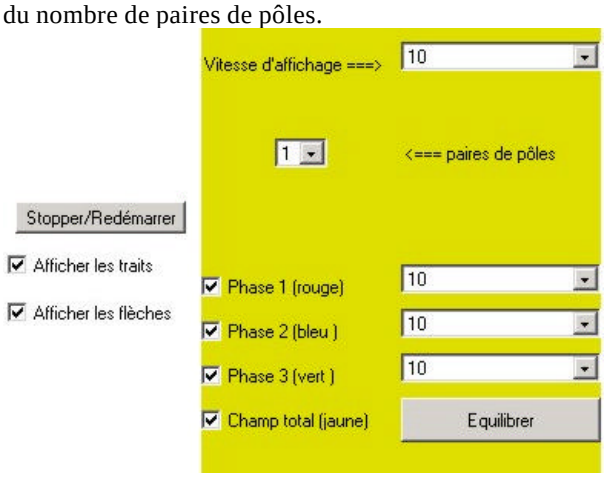


***Figure 1** : tableau de commande*

Sur la figure 1, on voit ce qu'on peut appeler le "tableau de commande". Celui-ci est très succinct. Les cases à cocher indiquent ce qui s'affiche à l'écran. Le plus simple est d'essayer, il n'y a pas de problème particulier.

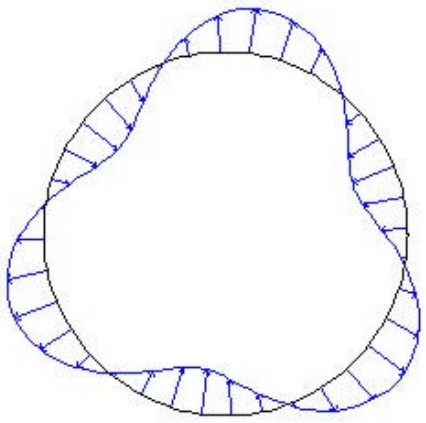


***Figure 2** : type de dessins obtenus*

La figure 2 montre une répartition sinusoïdale avec trois paires de pôles. Le cercle figure l'entrefer. Le champ dans l'entrefer est représenté par des vecteurs placés tous les dix degrés. La courbe qui relie toutes les extrémités des vecteurs est également tracée.

Ce qu'il faut savoir pour utiliser ce simulateur :

- Les trois champs oscillants créés par les trois phases sont représentés en rouge, bleu et vert
- Le champ résultant est représenté en jaune
- Le nombre de paires de pôles peut être fixé
- Le courant alimentant chaque phase peut également être fixé ; des déséquilibres peuvent être introduits (la valeur 10 est parfaitement arbitraire).

Ce qu'on peut faire avec ce simulateur :

- Comprendre la différence entre champ oscillant et champ tournant
- Connaître, en fonction du nombre de pôles, la forme du champ tournant
- Observer l'effet de déséquilibres dans les courants d'alimentation

Difficultés pédagogiques

Si le programme est facile à faire tourner, les explications aux élèves sont tout à fait nécessaires.

Il faut expliquer en détail que le champ dans l'entrefer reste radial (le dessin avec traits et flèches est bien utile pour cela)

Il faut prendre le temps de visualiser ceci sur un champ oscillant, puis sur le champ tournant (le bouton "stopper/redémarrer" est bien utile).

La visualisation de champs déséquilibrés ne peut être qu'une visualisation qualitative. Il n'y a pas moyen de calculer le taux de champ inverse.

L'intérêt pédagogique

C'est la seule façon que nous avons trouvé pour rendre concret, ou tout au moins visuel, ce qu'est un champ tournant. Dans l'esprit des élèves, un champ tournant est un vecteur et il n'y a pas de corrélation entre ce vecteur et ce qu'il représente.

Il faut avouer que si les élèves comprennent bien une représentation vectorielle de Fresnel (et ce n'est pas le cas de tous les élèves), il n'est pas simple de passer à une représentation vectorielle spatiotemporelle. Le nombre de concepts abstraits est trop important pour qu'un élève puisse les comprendre sans explications et sans visualisation.

J'ai l'impression d'avoir progressé, pédagogiquement, avec ces dessins.

COMMANDE DE CONVERTISSEUR A MODULATION DE LARGEUR D'IMPULSION

Michel MEUNIER
professeur àSupélec
Michel.meunier@supelec.fr

J'ai utilisé ce petit exemple en utilisant un vidéo projecteur, pendant un cours magistral. Deux programmes : MLI.mdl et AFFI.m

Quelques explications :

Un convertisseur de type MLI (restons Français !) utilise un convertisseur "en H".

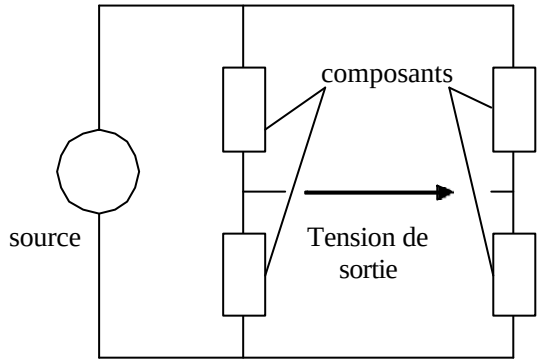


***Fig 1** : Schéma d'un convertisseur en H*

Le convertisseur est commandé en comparant des triangles avec une sinusoïde, selon une méthode usuelle.

Le programme "MLI"

C'est un programme MATLAB, SIMULINK.
Il est nécessaire d'avoir matlab et simulink pour le faire fonctionner.

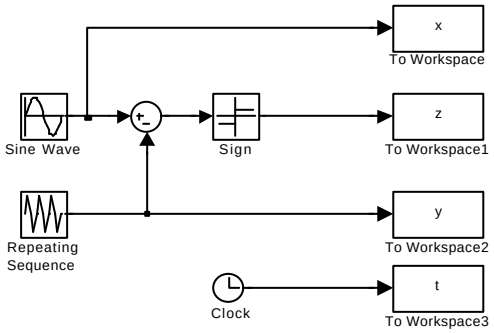


***Fig 2** : schéma fonctionnel de simulation dans Simulink*

Une sinusoïde et les triangles sont comparés ; le comparateur associe +1 au fait que la sinusoïde soit plus grande que le triangle, et -1 au contraire. Cela fait la tension de sortie du convertisseur.

Pour changer quelque chose :

Sur la boite "repeating sequence", on peut changer le nombre de triangles dans une période. C'est la modification que j'utilise en cours le plus souvent.
Pour le reste, on peut évidemment changer tout ce qu'on veut…

Visualiser quelque chose

Il faut utiliser le programme "affi"
Cela visualise les signaux de commande (triangle et sinusoïde), le signal de puissance et la série de Fourier du signal de puissance. Cela permet de voir l'influence du nombre de triangles.

Les difficultés pédagogiques

Les élèves comprennent aisément ce que fait le programme mais ne font pas la différence entre un signal portant une information et un signal de puissance. Ils ont du mal à comprendre pourquoi il est si difficile d'avoir une sinusoïde avec un convertisseur de puissance alors que, dans la commande, on en dispose sans problème.
Le programme "affi" projette à l'écran un signal "+1, -1" dont on regarde la décomposition en série de Fourier et je leur dis que nous essayons d'avoir une sinusoïde.
La commande utilise une sinusoïde. En somme on essaie d'en faire une alors qu'on en a déjà une.
C'est pour eux un grand mystère.
Espérons que vous pourrez faire comprendre clairement la différence. Utiliser ce programme est une bonne occasion de l'expliquer

L'intérêt pédagogique

Les programmes sont très simples. On peut expliquer en détail tout ce qui est fait.
On ne peut pas dessiner à la main un nombre de triangles arbitraire ; les programmes le font.

A vous de jouer

Les programmes "MLI.mdl" et "AFFI.m" sont disponibles sur le site internet : lesite3EI.com. Ils le sont également sur le site de Supélec.

ETUDE D'UN VARIATEUR D'ÉCLAIRAGE

Bruno DOUINE, Denis NETTER
Green UHP
Faculté des Sciences - BP 239
54506 Vandoeuvre
Denis.Netter@green.uhp-nancy.fr
Bruno.Douine@green.uhp-nancy.fr

Pascal LOOS
Secteur Scientifique
Lycée Stanislas
468 rue de Vandoeuvre
54600 Villers Les Nancy
Pascal.Loos@ac-nancy-metz.fr

Résumé : Le but de cet article est de présenter un TP d'électricité permettant de faire découvrir le principe de la variation de lumière à des étudiants de première année de D.E.U.G. sciences et, par ce biais, de les initier à la mesure de tensions et de courants non sinusoidaux et aux harmoniques. L'utilisation d'un tableur permet de comparer les mesures effectuées aux valeurs théoriques.

Dans ce TP on demande aux étudiants de calculer et mesurer des valeurs efficaces de signaux sinusoidaux ou non sinusoidaux observés en amont et en aval d'un variateur d'éclairage. A cette occasion on compare les mesures faites par différents appareils. Pour cela on trace les résultats des mesures et les courbes théoriques grâce à un tableur (Excel ou StarCalc). On peut alors remettre ou non en question les mesures effectuées. Ensuite nous présentons ici une première approche de la décomposition en série de Fourier d'un signal périodique, par la mesure des valeurs efficaces des harmoniques de la tension aux bornes des lampes. Les mesures sont effectuées grâce la fonction FFT d'un oscilloscope numérique. Enfin, ces mesures sont comparées avec les valeurs théoriques à l'aide du tableur. Les valeurs théoriques ne sont pas calculées par les étudiants mais directement fournies dans le tableur car la décomposition en série de Fourier n'est pas forcément vue en première année de DEUG.

En annexe nous présentons le sujet de TP fourni aux étudiants.

I. PRÉSENTATION DU SYSTÈME ÉTUDIÉ

Le système (*annexe figure 1*) est composé de :

- une alimentation sinusoidale 50Hz dont on peut faire varier la tension efficace de 0 à 240V (autotransformateur)
- un variateur de lumière 100W – 300 W pour lampe halogène
- deux hublots en plastique, contenant une ampoule de 60W, placés en parallèle (le branchement d'un seul luminaire, du fait d'une puissance insuffisante, entraîne un mauvais fonctionnement du variateur)

Pour mesurer les tensions et les courants instantanés et efficaces nous disposons des appareils suivants :

- un ampèremètre et un voltmètre magnéto-électriques ;
- un ampèremètre ferromagnétique ;
- une sonde de courant et une sonde différentielle de tension reliées à l'oscilloscope numérique.

II. ÉTUDE THÉORIQUE

Pour la préparation du TP, après avoir rappelé les définitions de la valeur efficace, de la puissance instantanée et la puissance moyenne consommée par un dipôle, les étudiants doivent étudier la tension à la sortie d'un variateur de lumière. Cette tension $u_L(t)$ (*annexe figure 3*) est de fréquence 50 Hz et sur une période on a :

$$u_L(t) = U_{max}.\sin(\omega t)$$

pour $\tau < t < 10$ ms et pour $\tau + 10 < t < 20$ ms

$$u_L(t) = 0 \text{ ailleurs}$$

$U_{max} = U_A\sqrt{2}$, avec U_A : valeur efficace de la tension d'entrée du variateur

Ils doivent exprimer la valeur efficace théorique U_{LT} de cette tension $u_L(t)$ en fonction U_{max} et τ.

Le calcul donne :

$$U_{LT} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}}\sqrt{1 - \frac{\gamma}{\pi} + \frac{\sin(2\Psi)}{2\pi}} \text{ avec } \gamma = \omega.\tau$$

Nous rappelons ensuite aux étudiants qu'une grandeur périodique peut se mettre sous la forme d'une somme d'une valeur continue et de grandeurs sinusoidales. C'est la décomposition en série de Fourier d'une tension périodique :

$$u(t) = U_{moy} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(n\omega.t) + b_n \cos(n\omega.t)$$

ou bien :

$$u(t) = U_{moy} + \sum_{n=1}^{\infty} U_n\sqrt{2}\sin(n\omega.t + \varphi_n)$$

La valeur efficace des harmoniques de rang n, Un, est égale à :

$$U_n=\sqrt{\frac{a_n^2+b_n^2}{2}}$$

Pour la tension $u_L(t)$, U_{moy} est nulle, et il existe des harmoniques de rang supérieur à 1 pour $\omega t > 0$. Le calcul de ces harmoniques n'est pas demandé aux étudiants mais l'expression de U_n en fonction de ωt sera utilisée dans le tableur.

On a pour $u_L(t)$:

- pour n = 1
$$\begin{cases} a_1=\frac{U_A\sqrt{2}}{\pi}\left[\pi-\psi+\frac{\sin(2\psi)}{2}\right] \\ b_1=\frac{U_A\sqrt{2}}{\pi}\left[\cos 2\psi-1\right] \end{cases}$$
- pour les valeurs de n pair a_n et b_n sont nuls
- pour les valeurs de n impair

$$\begin{cases} a_n=\frac{2U_A\sqrt{2}}{\pi}\left[\frac{\sin\left[(n+1)\psi\right]}{2(n+1)}-\frac{\sin\left[(n-1)\psi\right]}{2(n-1)}\right] \\ b_n=\frac{2U_A\sqrt{2}}{\pi}\left[\frac{\cos\left[(n+1)\psi\right]-1}{2(n+1)}-\frac{\cos\left[(n-1)\psi\right]-1}{2(n-1)}\right] \end{cases}$$

III. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE ET COMPARAISON AVEC LES VALEURS THÉORIQUES À L'AIDE DU TABLEUR

La tension efficace à l'entrée du variateur U_A est fixée à 240V.

III.1. Etude de la résistance de la lampe

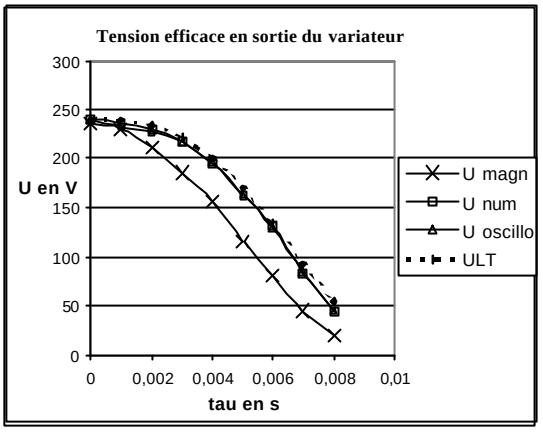
Tout d'abord les étudiants visualisent le courant dans la lampe à l'aide d'une pince de courant à effet Hall et la tension aux bornes de la lampe à l'aide d'une sonde différentielle, toutes deux reliées à un oscilloscope numérique. Ils s'aperçoivent qu'en bougeant le curseur du variateur la tension et le courant dans les lampes ne sont pas sinusoidaux. C'est leur première découverte : Ces étudiants, majoritairement titulaires d'un bac général S, n'ont été confrontés qu'à des régimes sinusoidaux ou continus. Ils observent aussi que les valeurs efficaces de la tension et du courant se modifient avec la position du curseur du variateur.

Ils relèvent ensuite les valeurs efficaces de la tension et du courant à l'aide de l'oscilloscope pour un retard au déclenchement ωt égal à 4ms ; on mesure $U_L = 195\ V$ et $I_L = 0{,}125\ A$- La résistance de la lampe allumée est donc de 216 Ω pour cette valeur de ωt_r. Lorsqu'on débranche la lampe et que l'on mesure sa résistance avec un ohmmètre, celle-ci diminue tant que la température de la lampe n'est pas stabilisée. Pendant cette durée de l'ordre de 10 min, les étudiants ont le temps de se poser des questions sur la valeur d'une résistance, sa variation par rapport à la température et la façon de mesurer une résistance.

III.2. Courbes $U_L(\omega t)$ et $I_L(\omega t)$

Pour différentes valeurs de ωt, les étudiants mesurent la valeur efficace de la tension U_L et du courant I_L, courant sortant du variateur, à l'aide des différents appareils. A l'aide du tableur, ils tracent les courbes expérimentales de $I_L(\omega t)$ sur la même figure, puis les courbes $U_L(\omega t)$ expérimentales et $U_{LT}(\omega t)$ théorique sur la même figure. Ils peuvent alors effectuer des comparaisons.

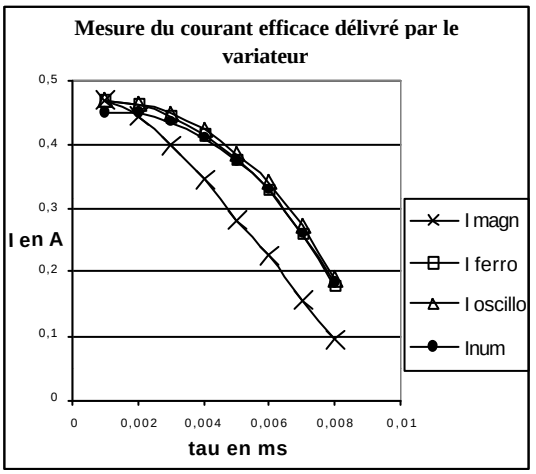
III.2.a. Mesure de la valeur efficace de la tension délivrée par le variateur.



Aux trois courbes expérimentales, on a ajoutée la courbe théorique, ce qui permet d'affirmer sans conteste que les tensions mesurées à l'aide de l'oscilloscope et de l'appareil numérique sont très similaires et très proches des valeurs théoriques. Seule les valeurs données par l'appareil magnétoélectrique sont inférieures dès qu'on s'écarte d'un régime sinusoidal.

III.2.b. Mesures de la tension efficace à la sortie du variateur

Contrairement à l'analyse des tensions il ne nous est plus possible de représenter la courbe théorique : l'ampoule que nous alimentons n'est pas un dipôle linéaire . Nous ajoutons aux appareils un ampèremètre ferromagnétique.



La courbe des mesures effectuées à l'oscilloscope est très légèrement au-dessus de celles données par l'appareil ferromagnétique et l'appareil numérique mais elles sont très similaires. On peut affirmer aussi, qu'aux erreurs de mesures près, ces trois appareils sont équivalents et permettent de mesurer la valeur efficace de courants non sinusoidaux.

L'ampèremètre magnétoélectrique, quant à lui, donne des résultats des mesures très différents, sauf lorsque le courant est quasi sinusoidal (lorsque τ tend vers 0), car il est uniquement capable de mesurer correctement les valeurs efficaces de courants sinusoidaux .

III.3. Décomposition en série de Fourier

L'étude est effectuée pour τ = 4ms.

Les étudiants relèvent la FFT de la tension $u_L(t)$ à l'aide de l'oscilloscope. Le calcul théorique des valeurs efficaces des harmoniques est réalisé dans le tableur.

A l'aide de ce dernier, les étudiants tracent un graphique représentant les valeurs efficaces des harmoniques données par la FFT et celles fournies par les calculs implantés dans le tableur.

Dans l'ensemble les valeurs mesurées (en noir sur le graphique) sont assez proches des valeurs théoriques. Les quelques différences observées s'expliquent principalement par les deux raisons suivantes :

Premièrement, l'oscilloscope calcule la FFT d'un signal, cependant ce n'est pas un analyseur de spectre très performant. Il affiche les résultats en dB, donc avec une échelle de tension logarithmique. Les valeurs données par l'oscilloscope varient à affichage et ces faibles variations en dB entraînent de fortes variations en volts.

Deuxièmement, la tension délivrée par le réseau alimentant notre salle de TP n'est pas tout à fait sinusoidale mais ressemble plutôt à une tension trapézoidale. Cela explique la faible valeur du fondamental de la tension mesurée par rapport à la valeur calculée sur la base d'un régime sinusoidal pur.

IV. CONCLUSION

Nous avons présenté un TP sur l'étude d'un variateur de lumière. Il a permis aux étudiants de première année de DEUG d'observer le fonctionnement électrique de ce variateur. Ils connaissaient l'usage de ce système mais en ignoraient le fonctionnement. Ils se sont aperçus que si ce système est compact et robuste, il est toutefois très polluant pour le réseau EDF. Ils ont mesuré des valeurs efficaces de signaux non sinusoidaux et les valeurs efficaces des harmoniques de ces signaux grâce à l'utilisation de la FFT. Ils ont observé la variation de la résistance en fonction de la température. Ce TP permet aux étudiants d'utiliser différents appareils de mesures de courant et de tension. Ils ont pu comparer les résultats donnés par les appareils avec les résultats théoriques et en tirer les conclusions sur la validité des mesures et l'utilisation des différents appareils.

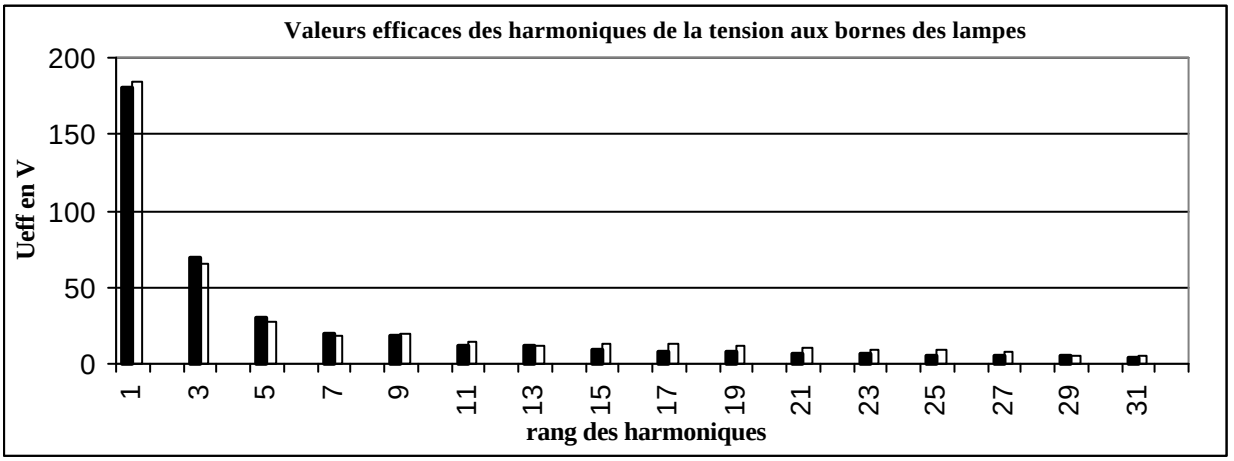


Figure 3 : *harmoniques de tension aux bornes des lampes.*
Barres blanches = valeurs mesurées et barres noires = valeurs théoriques

Annexe : Sujet fourni aux étudiants

Étude d'un variateur de lumière

I). Présentation

Le but de ce TP est d'étudier un système de variation de lumière, de comprendre comment s'effectue le réglage de l'intensité lumineuse et de s'initier aux mesures en régimes périodiques non sinusoidaux.

Le système est composé de (figure 1) :

- *une alimentation sinusoidale 50Hz dont on peut faire varier la tension efficace de 0 à 240V (Autotransformateur) ;*
- *un variateur de lumière, de type variateur de lampe halogène ;*
- *deux lampes 60W placées en parallèle (le branchement d'une seule lampe entraîne un mauvais fonctionnement du variateur).*

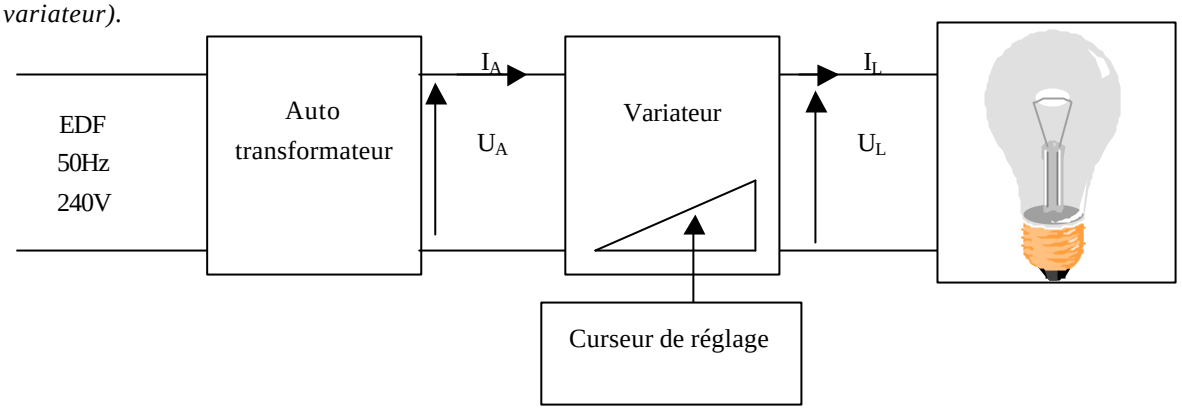


Figure 1

II). Préparation

1) Considérons le dipôle de la figure 2.

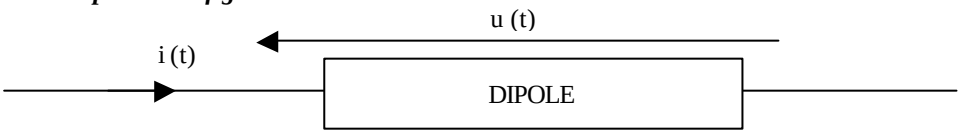


Figure 2

Rappeler la définition de :

- *la valeur efficace de la tension*
- *la valeur efficace du courant*
- *la valeur de la puissance instantanée dissipée dans le dipôle*
- *la valeur de la puissance moyenne dissipée dans le dipôle*

Calculer la valeur efficace de la tension définie par $u(t) = U_{max}.\sin(\omega t + \varphi)$

Soit $u_L(t)$ la tension de fréquence 50Hz indiquée sur la figure 3.

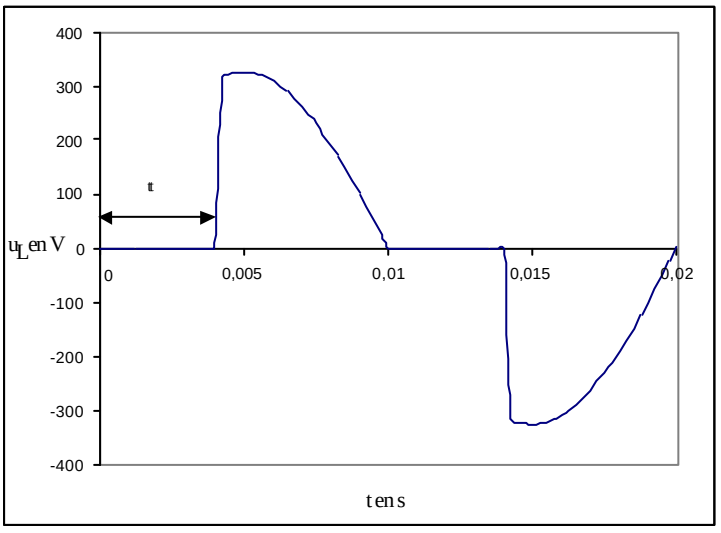


Figure 3

Sur une période on a :

$u_L(t) = U_{max}.\sin \omega t$ *pour* $t < t < 10$ *ms*

et pour $t + 10 < t < 20$ *ms*

$u_L(t) = 0$ *ailleurs :*

a. *Exprimer la valeur efficace théorique U_{LT} de cette tension $u_L(t)$ en fonction U_{max} et τ.*

b. *Décomposition en série de Fourier*

La décomposition en série de Fourier d'une tension périodique est égale à :

$$u(t)=U_{moy}+\sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(n\omega t)+b_n \cos(n\omega t) \quad ou$$

$$u(t)=U_{moy}+\sum_{n=1}^{\infty} U_n \sqrt{2} \sin(n\omega t+\varphi_n)$$

La valeur efficace des harmoniques U_n, est égale à :

$$U_n=\sqrt{\frac{a_n^2+b_n^2}{2}}$$

Que peut-on en déduire pour la tension $u_L(t)$ quand $\tau = 0$ ou $\tau > 0$?

Le calcul des valeurs efficaces des harmoniques de $u_L(t)$ étant trop long et complexe, celui-ci se fera à l'aide d'Excel.

Expérimentation

Résistance d'une lampe

- *Visualiser le courant dans une lampe à l'aide d'une pince de courant et la tension aux bornes de la lampe à l'aide d'une sonde différentielle, pour τ = 4ms et une tension efficace à l'entrée du variateur de U_A = 240V.*
- *Relever les valeurs de la tension efficace et du courant efficace dans la lampe à l'aide de l'oscilloscope*
- *Calculer la valeur de la résistance de la lampe allumée.*
- *Débrancher la lampe et mesurer la résistance à l'ohmmètre. Pourra-t-on calculer le courant qui traverse la lampe en fonctionnement ?*

Courbes $I_L(\tau)$ et $U_L(\tau)$

U_A = 240V

Pour différentes valeurs de τ, mesurer la valeur efficace de la tension U_L et du courant I_L sortant du variateur (somme des courants dans les deux lampes).

Pour cela, vous utiliserez pour le courant :

- *un appareil magnétoélectrique ;*
- *un appareil ferromagnétique ;*
- *l'oscilloscope*

Et pour la tension :

- *un appareil magnétoélectrique ;*
- *un appareil numérique ;*
- *l'oscilloscope*

Tracer à l'aide d'Excel les courbes $I_L(\tau)$ expérimentales sur la même figure. Comparer.

Tracer à l'aide d'Excel les courbes $U_L(\tau)$ expérimentales et $U_{LT}(\tau)$ théorique sur la même figure. Comparer.

Conclure sur la validité des mesures effectuées.

Décomposition en série de Fourier

L'étude est faite pour τ = 4ms.

Relever la FFT de la tension $u_L(t)$ à l'aide de l'oscilloscope.

Dans Excel le calcul des valeurs efficaces des harmoniques est réalisé.

Tracer à l'aide d'Excel un graphique comparant les valeurs efficaces des harmoniques données par la FFT et celles données par le calcul effectué par Excel.

Commentez ces résultats.

Conclusion

Quels sont les critères et les choix à faire pour effectuer des mesures correctes ?

Quels sont les avantages et les inconvénients de ce type de variateur de lumière ?

Fiche TP, STS Électrotechnique, 1ère année.

Exemples d'utilisations du logiciel Pspice.

Philippe ABBO
Lycée JACQUARD, PARIS 75 019

1. Introduction.

Nous allons mettre en oeuvre les simulations de différents montages utilisés en électrotechnique (ou dans les commandes de systèmes électrotechniques).

2. Montage n°1

La fonction assurée, par le montage dont le schéma est représenté figure 1, est souvent utilisée pour réaliser une horloge de fréquence variable. Elle comprend deux ALI fonctionnant en régime linéaire pour le premier et de saturation pour le second.

2.1 Étude théorique

Écrire les équations liées au fonctionnement du montage qui suit ; démontrer en particulier que la fréquence des tensions délivrés par les AOP est donnée par la relation $f = \frac{R_2}{4R_3CR_1}$.

2.2 Simulation

Simuler le fonctionnement du montage ci-contre en utilisant le logiciel *Pspice* :

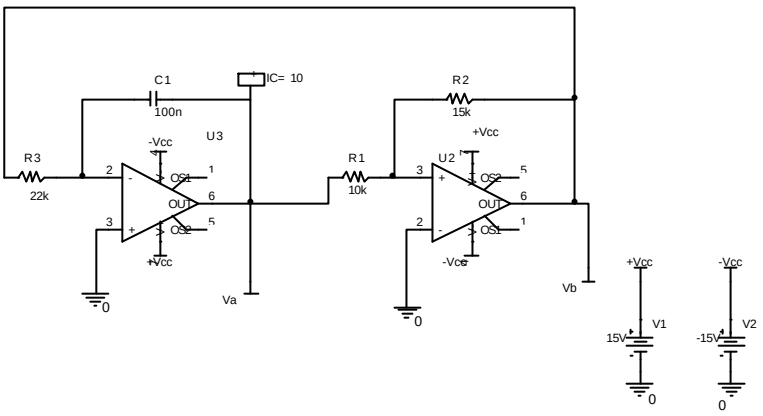


Figure 1

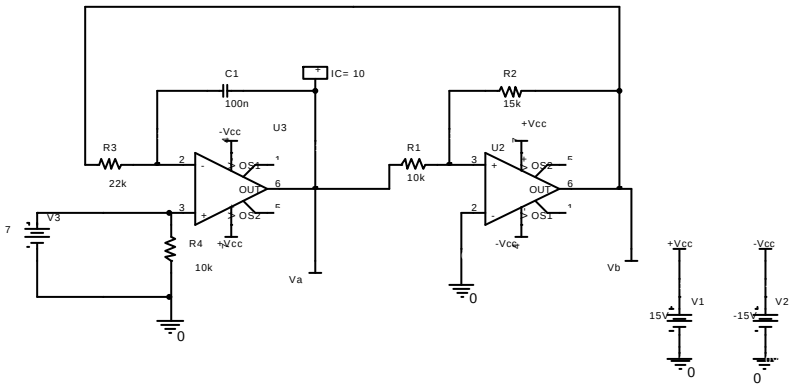
Pour mémoire voici la liste des composants :

Résistances « R /analog»	Condensateurs « C /analog»	Masse « 0 /Source»	Ports « Vcc_Bar »	AOP « ua741/eval »	« IC/special »	« Vdc »

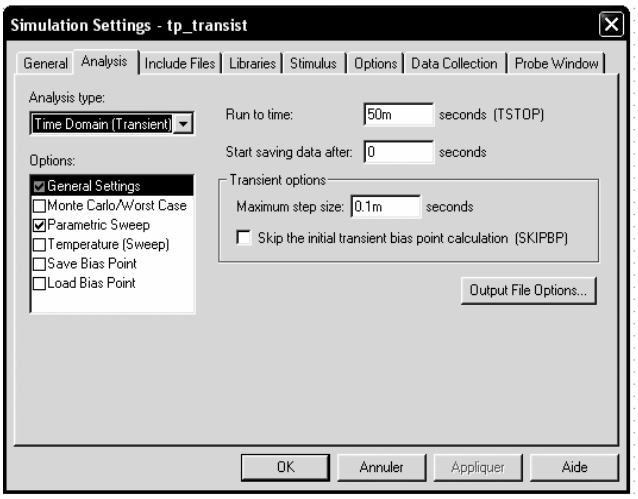
Relever les tensions vb(t) et va(t) pour C= 100 nF puis C = 10nF. Expliquer le fonctionnement du dispositif. Vérifier la validité de l'expression théorique de la période des signaux délivrés.

2.3 Influence d'une tension de commande .

Réaliser la modification suivante :



Relancer la simulation, en faisant varier la tension V3 entre -6V et +6V, pour cela sélectionner **simulations settings** puis **parametric sweep** ensuite renseigner les champs suivants :



2.4 Simulation avancée :

Comme vous l'avez remarqué, la tension vb est « rectangulaire ». Tracer l'évolution du rapport cyclique de vb en fonction de la tension V3.

Puisque cette courbe est rectiligne, quelle conclusion peut-on tirer sur le rôle de ce montage ?

Note : vous enregistrerez les points des courbes à la date t = 5ms et vous simulerez jusqu'à t_1 = 50ms.

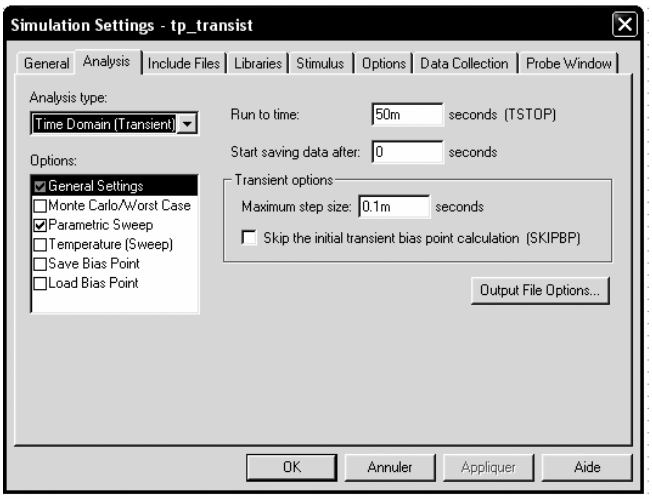
Expliquer la méthode.

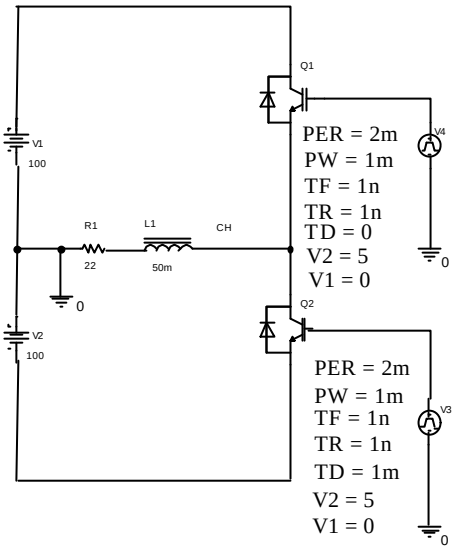
3. Montage n°2

3.1 Simulation d'un onduleur : Onduleur en pont en commande symétrique : Réaliser le montage ci-dessous.

Pour cela vous aurez besoin d'ajouter les fichiers Enrea5.lib et Enrea5.olb qui définissent les modèles physique et graphique des transistors IGBT et de la bobine L1.

Paramétrage de la simulation :





1. Justifier les réglages de la simulation.
2. Visualiser la tension V(CH) ainsi que le courant dans la charge R1, L1.
3. Préciser sur vos courbes, les éléments conducteurs ainsi que le sens de transfert de l'énergie dans la charge

Liste des composants :

R/Analog	Vpulse / Source	IGBT_D/Enrea5	L / Enera5	Vdc / Source	0 / Source

Fiche TP, STS Électrotechnique, 1ère année.

MONTAGES REDRESSEURS : SIMULATION AVEC PSIM

Philippe ABBO
Lycée JACQUARD, PARIS 75 019

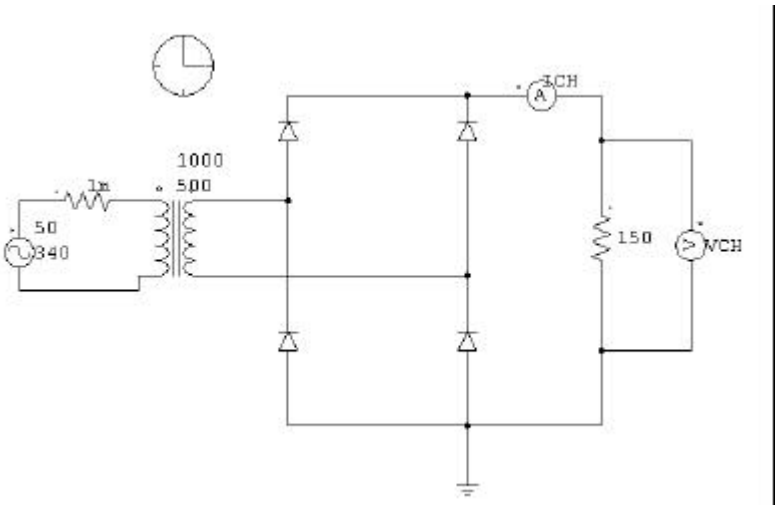
1. Objectif

Mise en oeuvre des simulations de montages simples et connus, afin d'utiliser le logiciel Psim..

2. Redressement double alternance :

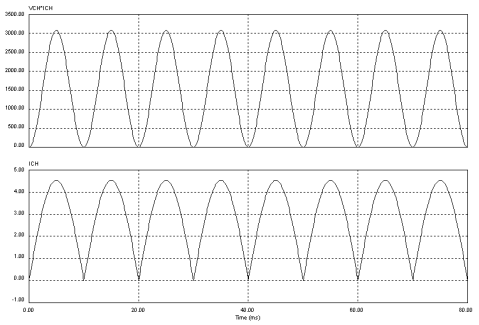
2.1 Charge résistive :

- Réaliser le schéma ci-contre en utilisant la barre d'outils en bas de l'écran ; un double clic sur l'icône choisie permet de changer la valeur du composant. Il est nécessaire de placer les appareils de mesure pour effectuer des mesures.
- Régler de la durée de la simulation : en utilisant l'élément « *Simulation Control* » représenté par une horloge, et que l'on obtient en déroulant le menu *Simulate* ; choisir par double clic sur l'horloge une durée de simulation de 80 ms avec un pas de calcul de 0.1ms.
- Visualiser la tension v_{CH} , le courant i_{CH}, ainsi que la puissance instantanée absorbée par la charge.



Allure des courbes issues de la simulation :

- En utilisant les fonctionnalités de SimView (lancé automatiquement une fois la simulation terminée) , on peut mesurer la puissance moyenne, soit une puissance active de 1540W.

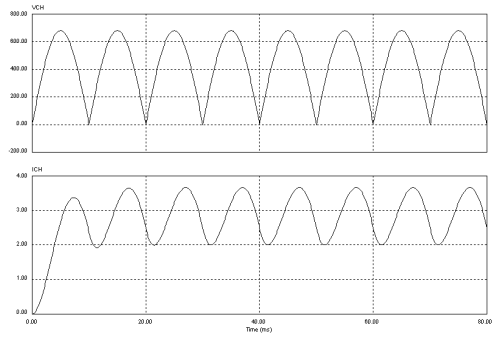


2.2 Charge inductive :

- Placer en série avec la résistance une bobine d'inductance L = 0.5H :
- Visualiser la tension v_{CH} , le courant i_{CH}, ainsi que la puissance instantanée absorbée par la charge.

- **Allure des courbes :**

On observe le régime transitoire et l'effet de l'inductance sur le montage

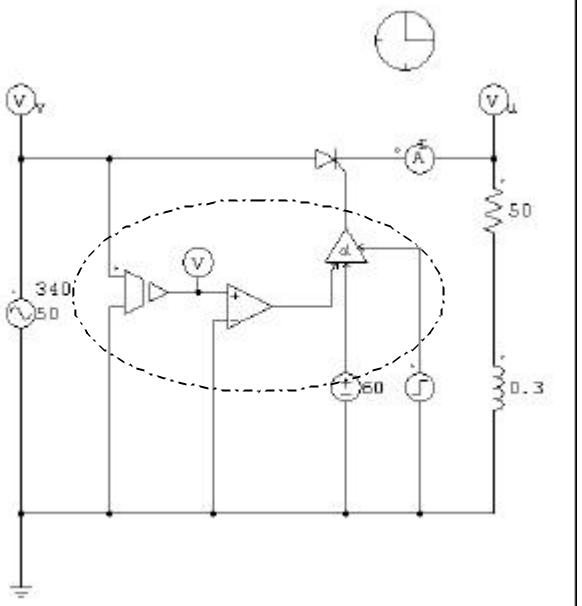


3. Redressement commandé simple alternance :

- Réaliser le schéma ci-contre.

La commande d'un thyristor, se réalise à l'aide de la fonction : *Element Alpha Controller* (contrôle de l'angle de retard à l'amorçage). Celle-ci nécessite le repérage de la tension de synchronisation du déclencheur et la valeur de l'angle de retard à l'amorçage affichée en degrés par un élément de type générateur de tension. Cela se réalise avec les blocs entourés et la fonction *Element Alpha Controller*

. L'angle de retard à l'amorçage est affiché en degrés sous la forme d'une tension.



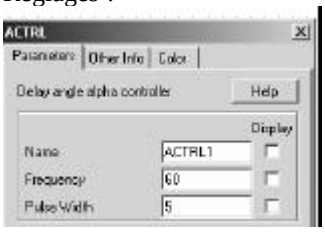
Element Alpha Controller

Parametres « internes » (*modifiables par double clic*)

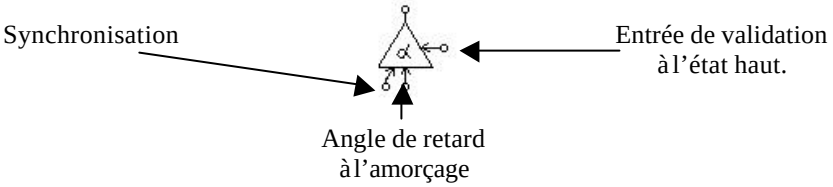
Frequency :
fréquence de fonctionnement en Hz, ici 50 Hz

Pulse Width :
largeur de l'impulsion en degrés.

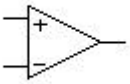
Réglages :



Le bloc dispose de trois entrées :

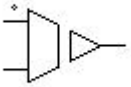


Elément Comparator:



La sortie est au niveau haut lorsque l'entrée non-inverseuse à un potentiel plus élevé que l'entrée inverseuse.

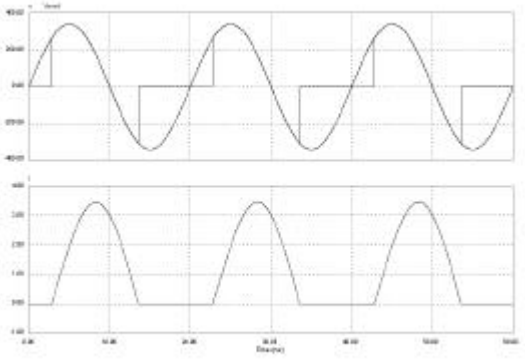
Element Voltage Sensor:



Description: il s'agit d'une sonde de tension analogique
Parameters: gain en tension réglable par double clic.

- **Résultats de la simulation :**

L'allure de la tension redressée et du courant dans la charge donne :
On peut également visualiser la puissance instantanée



PROJET PLURIDISCIPLINAIRE

Traitement de la pollution azotée et carbonée dans le lisier de canards. Automatisation du procédé et utilisation d'un outil communicant.

Pascal DEREUMAUX et Eric ALLENT
Professeurs de Génie électrique et Génie mécanique
Marie Agnès CAILLET et Magali GUALANDI
Professeurs de Biochimie Génie Biologique
Sylvain GRIMAL
Chef des travaux à la date du projet
Lycée Pierre Gilles de Gennes
Quartier St Christophe
04000 Digne les bains
pascal.dereumaux@free.fr

Christian DRAKIDES
Conseiller technique
Laboratoire Hydroscience (UMR 5569)
drakides@msem.univ-montp2.fr

Société AQUAETUDES
Responsable projet
aquaetudes@aquaetudes.com
Thierry MOULIN
Initiateur du projet
moulin@aquaetudes.com

Résumé : Le contenu de cet article reprend pour l'essentiel un projet de traitement de lisier de canards effectué à la demande de la société «AQUAETUDES». Un prototype a été réalisé au lycée de Digne les bains pendant une année scolaire afin d'étudier la faisabilité, d'effectuer tous les tests biologiques relatifs à ce type de procédé de traitement et de permettre une communication à distance avec le procédé.

1 Introduction.

Le projet consiste à traiter de manière biologique le lisier de canards d'une petite exploitation agricole, conformément aux recommandations fixées par la réglementation de la loi sur l'eau.

L'élevage comprend environ 2000 canards par an. De par sa position géographique (Gigondas), le lisier ne peut être épandu tel quel sur les terres vinicoles par risque de modifications du terroir. En effet le lisier, très concentré en pollution biodégradable carbonée et azotée, contient de nombreux micro-organismes. Il doit être épuré chez l'éleveur avant d'être épandu dans le sol par infiltration.

L'objectif du traitement consiste à :

- éliminer la pollution azotée et carbonée par traitement biologique aérobie (procédé à boues activées dans un bassin d'aération) ;
- séparer les boues biologiques par filtration naturelle (minéralisation et hygiénisation des boues) ;
- rejeter l'effluent exempt de pollution dans le sol.

2 Définition de la pollution carbonée et azotée à éliminer.

Pour évaluer la concentration du lisier en pollution carbonée, on réalise une mesure de DCO (Demande Chimique en Oxygène). Cette analyse évalue la quantité de pollution carbonée présente dans le lisier.

Pour évaluer la concentration du lisier en pollution azotée, on réalise des mesures d'azote sous forme minérale ($N\text{-}NH_4^+$, $N\text{-}NO_3^-$, $N\text{-}NO_2^-$) et sous forme organique (N-org).

3 Principaux intérêts de l'élimination de la pollution carbonée et azotée

Le rejet dans le milieu récepteur d'un effluent riche en matières carbonées et azotées peut entraîner les nuisances suivantes :

- une concentration importante en pollution carbonée et azotée facilite la prolifération de la flore aquatique qui consomme de plus en plus d'oxygène au détriment de la faune aquatique (perturbation des cours d'eau, eutrophisation).
- la pollution azotée constitue une gêne pour la potabilisation des eaux de surface et souterraines.

4 Démarche utilisée

Pour traiter la pollution carbonée et azotée, on utilise un procédé biologique par boues activées (ce procédé est fréquemment rencontré dans le traitement des effluents urbains : 60 % des stations d'épuration utilisent ce procédé).
Dans ce procédé, les micro-organismes épurateurs se trouvent naturellement présents dans le lisier et vont oxydés ces deux types de pollution grâce à l'oxygène de l'air apporté par le surpresseur (cf. partie 5: schéma du pilote).

Principe général de la dépollution

(1) Pollution carbonée présente dans le lisier ⟶ CO_2 ↗ (dioxyde carbone gazeux)
OXYDATION

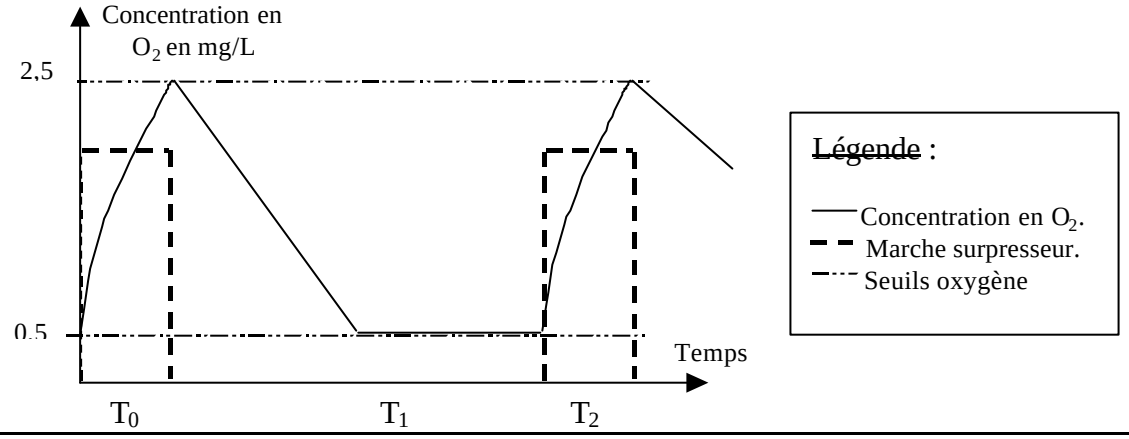
(2) Pollution azotée organique ⟶ $N\text{-}NH_4^+$ (azote ammoniacal)
AMMONIFICATION

(3) $N\text{-}NH_4^+$ (azote ammoniacal) —(O_2)→ $N\text{-}NO_3^-$ (azote des nitrates)
NITRIFICATION

(4) $N\text{-}NO_3^-$ (azote des nitrates) ⟶ N_2 ↗ (diazote gazeux)
DENITRIFICATION

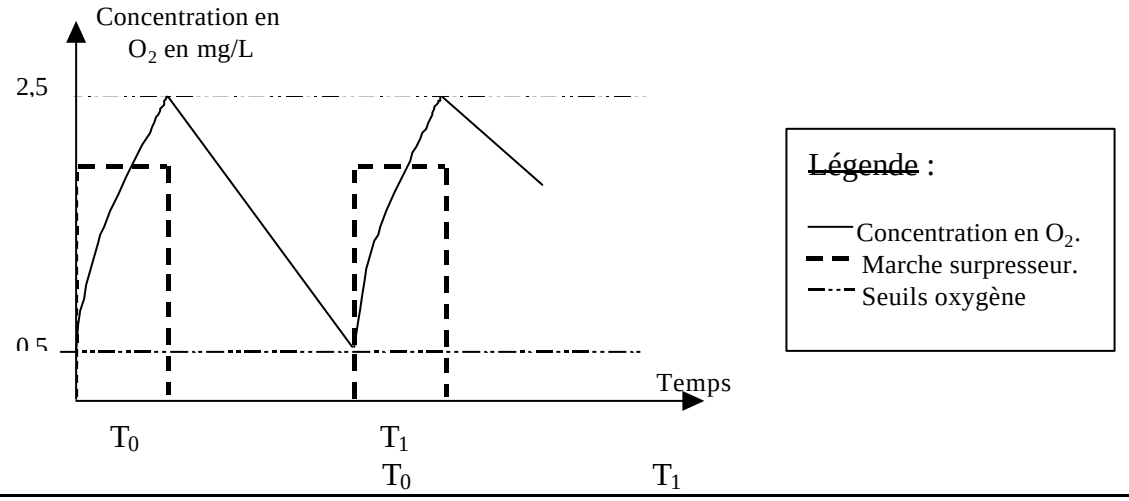
Les réactions (1) et (3) se déroulent obligatoirement en présence d'oxygène, on parle de milieu aérobie.
Les réactions (2) et (4) se déroulent sans oxygène dissous dans le milieu, on parle de milieu anoxique.
Dans le cas de notre étude pilote, il n'est pas réalisé de zone d'anoxie (la réaction (4) correspondant à la dénitrification est non réalisée).

Cas général : Evolution de la concentration en O_2 dans le bassin d'aération au cours du temps (OXYDATION + NITRIFICATION + DENITRIFICATION)

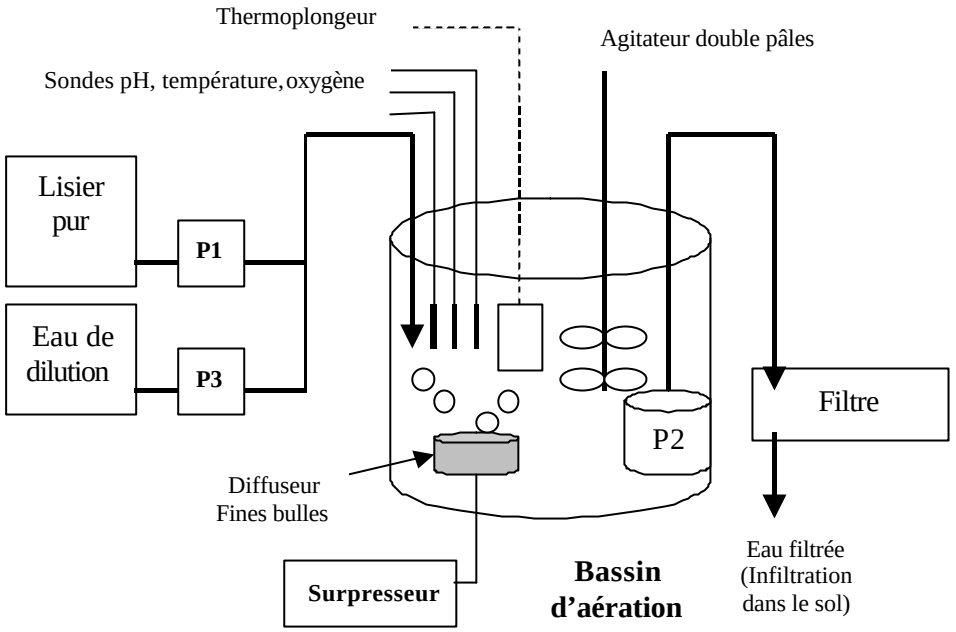


De T_0 à T_1 se déroulent les réactions biologiques de dégradation (1) + (2) + (3).
De T_1 à T_2 se déroule la réaction biologique de dégradation des nitrates (4) DENITRIFICATION.

Cas du pilote : Evolution de la concentration en O_2 dans le bassin d'aération au cours du temps (OXYDATION + NITRIFICATION)

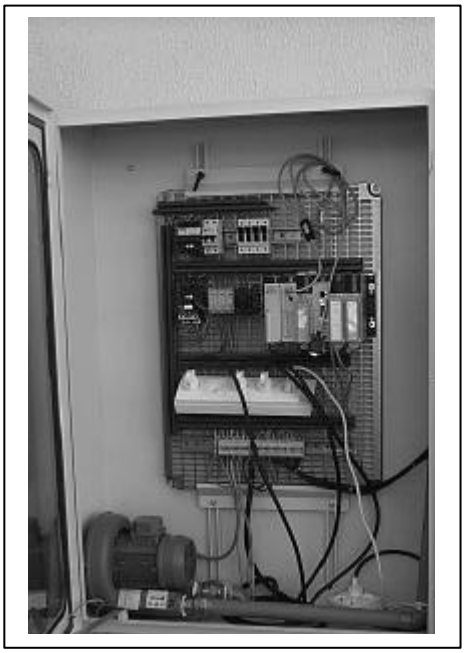


5 Schéma de principe.



Photos du pilote

Bassin d'aération 150 Litres



Automatismes du pilote

6 Mesures à effectuer

- **Le pH** : il doit être compris entre 7,2 et 8,2 pour maintenir une activité biologique (optimum 7,5). Les réactions biologiques d'oxydation entraînent des modifications du pH. Ce paramètre est donc à surveiller.
- **La température** : elle doit être comprise entre 10 et 35 °C (optimum 20°C) pour maintenir une activité biologique : dégradation de la pollution carbonée et azotée, si la température est inférieure à 10°C, il n'y a plus de dégradation de la pollution azotée.
- **L'oxygène** : l'oxygène est indispensable aux réactions d'oxydation biologique. Sa concentration doit être comprise entre 0,5 (seuil bas) et 2,5 mg/L (seuil haut).

7 Analyses de laboratoire

Pour suivre l'épuration du lisier on effectue régulièrement les analyses suivantes :

- DCO : Demande Chimique en Oxygène qui permet de quantifier la pollution carbonée. Des faibles valeurs de DCO indiquent une dégradation optimale.
- NGL, $N\text{-}NH_4^+$ (azote ammoniacal), $N\text{-}NO_3^-$(azote des nitrates) permettent de quantifier la pollution azotée.

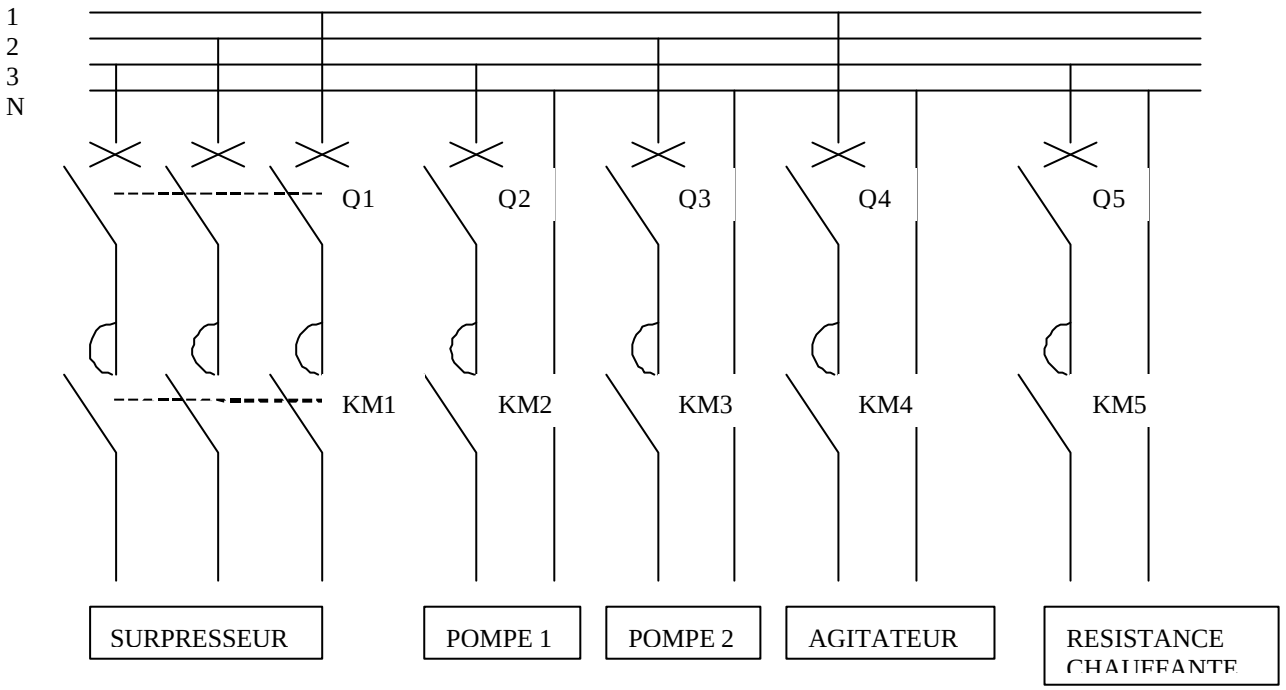
8 Pourquoi réduire la pollution azotée ?

La pollution azotée qui est essentiellement sous forme soluble se trouve sous les formes suivantes :

- l'azote organique (N), provenant des déjections animales.
- L'azote ammoniacal (NH_4^+) qui provient de la transformation par des processus biochimiques naturels de l'azote organique des eaux usées domestiques.

L'azote est donc à l'origine de nombreuses nuisances dont nous rappellerons les principales :

- Une première cause est que le NH_4^+ est sous forme NH_3, extrêmement toxique pour la vie piscicole.
- Une concentration importante en azote ammoniacal perturbe considérablement la vie aquatique.
- L'azote peut engendrer l'eutrophisation du milieu hydrique, c'est-à-dire le développement excessif d'algues microscopiques et de végétaux aquatiques. L'eutrophisation se manifeste notamment quand plusieurs conditions sont réunies, éclairement important, écoulements lents et présence d'azote et de phosphore (le lisier comprend une quantité de phosphore). La plupart des effets de l'eutrophisation sont gênants (variation de la concentration en oxygène dissous dans l'eau, turbidité de l'eau).
- La pollution azotée constitue une gêne pour la potabilité des eaux de surface et des nappes.



9 Partie électrotechnique

La partie « électrotechnique » se réduit à l'alimentation des divers actionneurs : surpresseur, pompes, agitateur et résistance chauffante, les commandes proviennent d'un automate TSX 57 Premium.

Surpresseur : Soufflante avec moteur triphasé 0,37 kW – 230/400 V – 50 Hz – 30m^3/h

Pompe 1 et 2 : Pompe vide cave, 0 à 9m^3/h

Agitateur : Moteur monophasé, réducteur de vitesse et agitateur 2 pales.

Résistance chauffante : 300 Watts

Module ETHERNET (TSX ETY 110WS): il permet la connexion à un réseau TCP/IP.

Entrées analogiques de l'automate (TSX AEY 414)

- *Température : sonde Pt100*
- *Sonde pH : sortie 0/5 V.*
- *Sonde Oxygène : sortie 0/5V.*

Entrées Tout Ou Rien (TSX DEY 16D2)

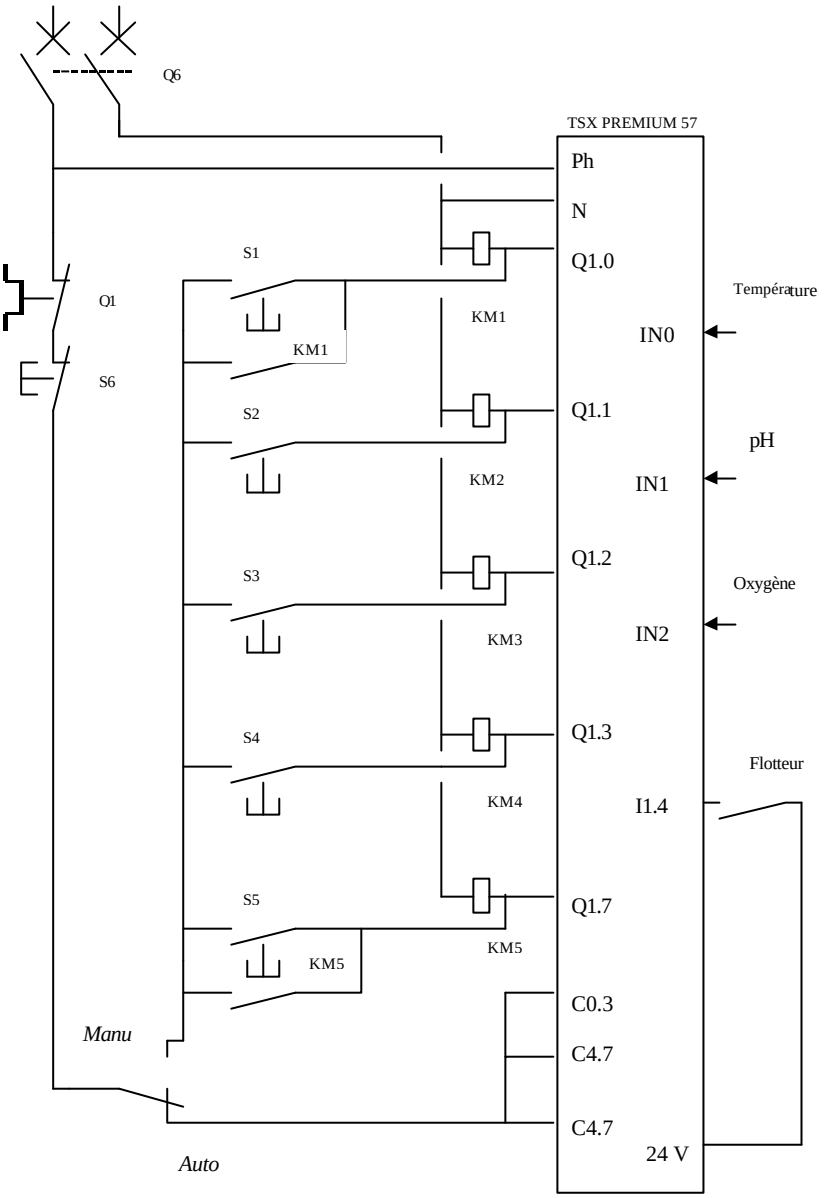
- *Flotteur (niveau haut).*

Sorties Tout Ou Rien TSX DSY 16R5)

- *Contacteurs KM1 à KM5 commandés par les sorties de l'automate.*

Par précaution toutes les commandes peuvent être manuelles et sont déportées sur la face avant de l'armoire « automatismes ».

Schéma des entrées/sorties de l'automate



10 Partie Automatique et Informatique industrielle.

L'automatisme est géré par un automate Premium TSX 57 (SCHNEIDER ELECTRIC) relié à un coupleur Ethernet ETY 110WS. Ce coupleur inclus, en plus de la gestion du protocole TCP/IP, une fonction serveur WEB embarqué. Ce serveur est un serveur de données temps réel automate. Les données de l'automate Premium supportant le coupleur ETY 110WS sont présentés sous forme de pages standard au format HTML et sont donc accessibles par tout navigateur Internet du marché capable d'exécuter du code Java embarqué.

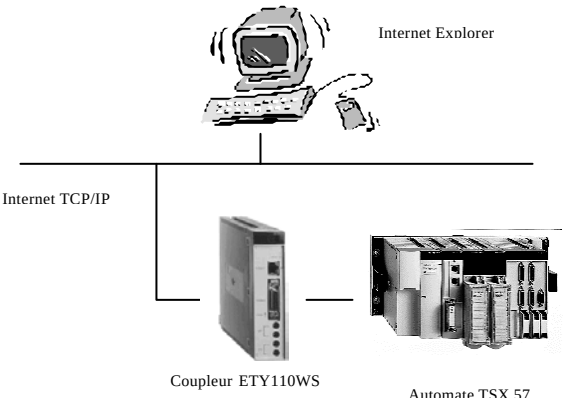


Schéma de principe de l'automatisme

Le programme permettant la gestion de l'automatisme a été réalisé avec le logiciel PL7PRO.
Une fois le programme terminé, il doit être enregistré au format *.fef* dans la rubrique « exporter l'application ».
Afin de personnaliser le site Web sur le module du serveur intégré, nous avons utilisé le logiciel FACTORYCAST fourni avec le coupleur Web. Ce logiciel propose toutes les pages Web ainsi que tous les applets Java dont nous avons besoin pour afficher les données d'exécution de l'automate.

(Un applet Java est un programme qui est chargé dans le navigateur de l'utilisateur au moment de la connexion au site Internet, il est ensuite exécuté par le navigateur)

La première étape consistera à créer un espace nom, c'est-à-dire une base de données Web qui contient les symboles et les adresses également accessibles en écriture. La base de données PL7 est accessible depuis n'importe quel périphérique associé. Les fichiers des bases de données PL7 ont l'extension *.fef*

Le logiciel FACTORYCAST offre également tous les outils nécessaires à la maintenance du site sur le serveur intégré, en plus des méthodes de téléchargement, de sauvegarde et restauration des fichiers.

Si le réseau a été configuré pour permettre aux utilisateurs de visualiser le site sur Internet, le système de sécurité est le même que celui d'un site intranet, avec un coupe – feu comme mécanisme de sécurité.

Le programme de configuration FACTORYCAST utilise un coupe-feu application FTP** pour accéder aux fichiers du serveur intégré. Le coupe –feu sera configuré de façon à autoriser les connexions Internet à une gamme restreinte de ports ou autoriser le trafic vers ou depuis certaines adresses IP.

FTP = Protocole de Transfert de Fichiers. Ce protocole est un moyen de transmission des fichiers entre deux ordinateurs. Les ordinateurs n'ont pas besoin d'avoir le même système d'exploitation.

10.1 Fonctions réalisées par le coupleur.

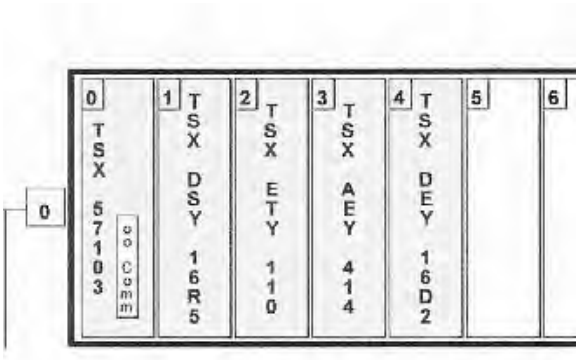
** Fonction de diagnostic*

La fonction prédéfinie et sécurisée de diagnostic système permet de visualiser à partir d'un navigateur Internet et en temps réel :

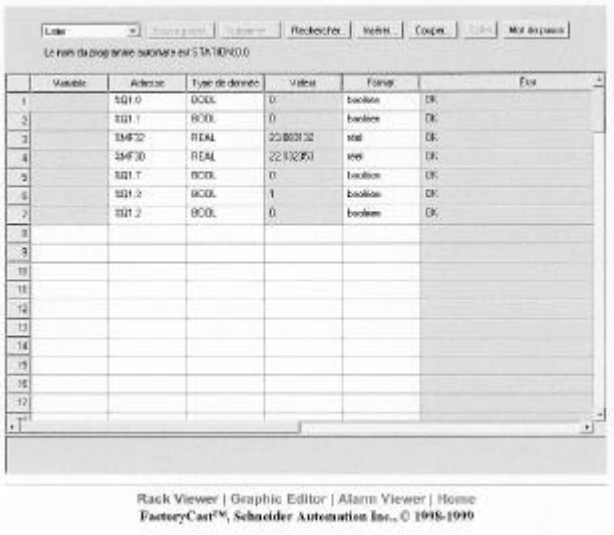
- la configuration de la plate forme automate
- l'état des entrées/sorties
- le détail de chaque module constituant l'automate

** Fonction d'accès aux variables et données de l'automate*

Il est possible d'accéder en lecture ou en écriture à toutes les données de l'automate.
Il est également possible de créer et sauvegarder dans le coupleur Web, des tables d'animation
de certaines variables de l'application pour une surveillance ou une modification de celles-ci



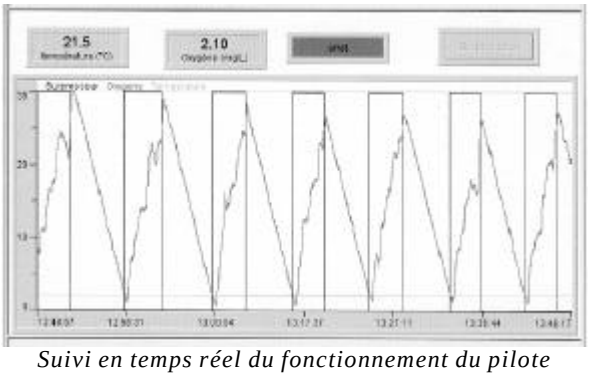
Écran de visualisation et de configuration de l'automate



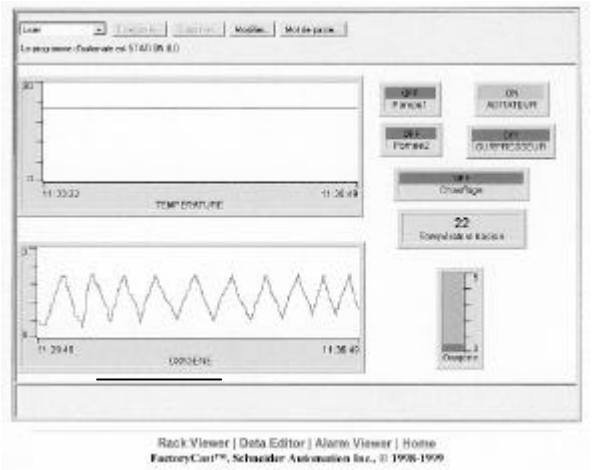
visualisation des données de l'automate

** Visualisation de pages Web*

Le coupleur Ethernet supportant la fonction serveur Web dispose d'un espace mémoire permettant de créer une base de données Web pour pouvoir afficher et modifier les valeurs d'exécution des variables de l'automate et d'ajouter nos propres pages Web au site.
Ces pages Web peuvent être crées avec un éditeur standard permettant la création et l'édition de pages au format HTML. Sur ces pages Web, il est possible de visualiser des variables automate en temps réel dans différents synoptiques. Les applets JAVA sont fournies avec le logiciel FACTORYCAST. Ceci permet en outre la réalisation d'application de supervision.



Suivi en temps réel du fonctionnement du pilote Fonctionnement du surpresseur et évolution de la concentration en oxygène



Visualisation des cycles et des actionneurs depuis « Internet Explorer »

Un mot de passe protège l'accès en lecture aux données automates et aux fonctions de diagnostics. Un mot de passe supplémentaire donne l'accès en écriture aux variables autorisées par le logiciel. La société « AQUAETUDES » pouvait ainsi et à distance (à partir d'un PC) visualiser en temps réel les données du pilote, pour vérifier l'état du système, faire des diagnostics.

10.2 Bilan des outils informatiques utilisés.

Composant ou logiciel	Utilisation dans l'application
TSX ETY 110 WS	Enregistrer le site Web sur un serveur intégré
PL7. Version 4.0	Programmation de l'automate TSX 57
FACTORYCAST	Configurer le site Web, télécharger des données et maintenir le site sur le serveur
Client FACTORYCAST	Fonction de diagnostic d'exécution via des pages Web prédéfinies, éditeur de données, éditeur graphique, viewer d'alarmes, viewer de racks.
INTERNET EXPLORER	Afficher le site Web
Microsoft WORD	Créer les pages Web personnalisées au moyen du code HTML.

10.3 Impact de cet outil dans notre enseignement.

Cette application ne nécessitait pas de compétences particulières en Électrotechnique si ce n'est, des fondamentaux dans les domaines de la distribution de l'énergie et de la protection des matériels. Toutefois, l'utilisation d'outils communicants dans les applications industrielles montre l'intégration de ces nouvelles technologies de l'Internet pour toutes les fonctionnalités « à distance »: télésurveillance, télégestion (voir aussi à ce sujet l'article dans ***La Revue 3EI*** n°32).

Les écrans présentés ci-dessus montrent qu'un opérateur peut, à partir d'un ordinateur équipé d'un navigateur standard, avoir accès à des pages Web lui présentant un synoptique animé de l'application, ainsi que de chaque actionneur avec affichage de divers paramètres (états des entrées / sorties, teneur en oxygène, température dans le cas de cet exemple).

11 Conclusion de l'initiateur du projet sur l'efficacité du procédé.

Il découle des résultats fournis par le Lycée Gilles de Gennes que le procédé biologique donne toute satisfaction quant à la fiabilité de la filière. Cette phase pilote va permettre d'affiner les paramètres initiaux et donc de développer une station grandeur réelle avec toutes les garanties possibles. Ce procédé « rustique » étudié pour de petits élevages avicoles est relativement autonome. C'était l'un des paramètres essentiels du cahier des charges. La mise en place d'une télésurveillance accessible par Internet, est un atout supplémentaire dans le développement de ces petites stations. En effet les élevages de cette taille ont un fonctionnement le plus souvent familial. Aussi, il est difficile de demander à l'exploitant avicole de s'occuper de sa ferme tout en ayant le temps et les connaissances techniques nécessaires au pilotage de la station. La mise en place d'une télésurveillance permettra au professionnel de décharger l'exploitant de cette tache. La société AQUAETUDES a pu ainsi apprécier en temps réel le bon fonctionnement du pilote, bien qu'éloignée géographiquement du lycée.

LE REDRESSEUR MLI EN ABSORPTION SINUSOIDALE DE COURANT

Nicolas BERNARD, Bernard MULTON, Hamid BEN AHMED
Ecole Normale Supérieure de Cachan, Antenne de Bretagne
Campus de Ker Lann – 35 170 BRUZ
nom@bretagne.ens-cachan.fr

Résumé : Les convertisseurs à découpage, fonctionnant en absorption sinusoidale de courant, restent assez peu traités dans notre littérature bien qu'avec l'évolution des normes sur la pollution harmonique, ceux-ci soient amenés à se généraliser. Cet article présente, parmi les quelques structures qui autorisent ce mode de fonctionnement, le redresseur monophasé 4 quadrants à MLI, réalisé à partir d'une structure en pont complet. Le principe de fonctionnement est d'abord analysé puis le dimensionnement des éléments de filtrage et des boucles de régulation sont étudiés.

Introduction

L'étude d'une structure en pont complet, commandée en modulation de largeur d'impulsion (MLI), montre qu'il est possible de fonctionner dans les quatre quadrants du plan (U,I) si la technologie des interrupteurs à semi-conducteurs l'autorise. Cette structure permet donc tous les types de transfert d'énergie possibles. Les modes de fonctionnement hacheur et onduleur sont les plus connus et en général bien traités dans la littérature du génie électrique, en revanche, le fonctionnement redresseur, absorbant un courant sinusoidal, reste peu traité.

L'intérêt connu du découpage est de **réduire** considérablement **la taille des éléments de filtrage**. Nous allons voir qu'en mode redresseur il est aussi possible de corriger de façon active **le facteur de puissance,** moyennant l'utilisation d'une loi de commande particulière.

Schéma de principe

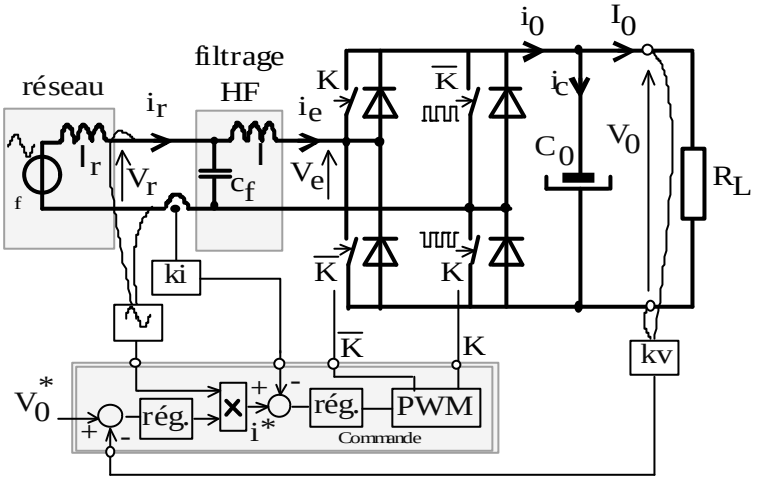


***Figure.1** : Le redresseur MLI monophasé et sa commande*

Malgré le comportement fortement non linéaire de ce type de convertisseur, nous allons montrer qu'il peut se comporter, vis à vis du réseau, quasiment comme une charge résistive (courant sinusoidal et en phase avec la tension). Le facteur de puissance (F_p = P/S) est alors proche de l'unité et les amplitudes des courants harmoniques sont faibles et en accord avec ce que la norme autorise (la CEI 61000-3-2, par exemple, pour les installations absorbant un courant inférieur ou égal à 16A [KOU 96.]), contrairement aux redresseurs classiques à capacité en tête ou à filtre LC. On remarquera, sur le schéma de la figure 1, que la règle d'association des sources est respectée (source de courant en entrée avec I et source de tension en sortie avec C_0).

Le nombre d'applications du redresseur en modulation de largeur d'impulsion, dans le domaine des petites puissances, reste encore limité à ce jour. Pour les fortes puissances, on notera que ce convertisseur est utilisé en traction ferroviaire, sous 50 Hz, où la minimisation des perturbations générées par la caténaire sur l'environnement (signalisations, communications…) est particulièrement recherchée. L'amplitude tolérée, pour chacun des harmoniques, est alors définie par le C.C.I.T.T. (Comité Consultatif Télégraphique et Téléphonique) [DES 92

- A -FONCTIONNEMENT ET DIMENSIONNEMENT

A.1- L'absorption sinusoidale de courant

Nous allons montrer, ici, qu'il est possible par l'utilisation d'une loi de commande appropriée, d'obtenir un courant i_r, prélevé au réseau, sinusoidal. Pour cela, nous nous placerons dans **les hypothèses de fonctionnement suivantes** :

- ⇨ La tension de sortie est supposée constante et déjà régulée à V_0.
- ⇨ La période de découpage est très petite devant la période du réseau ($T_d << 1/f$). Par conséquent, les variations basses fréquences, à 50 ou 100 Hz, sont négligeables sur une période de découpage (Figure 2).

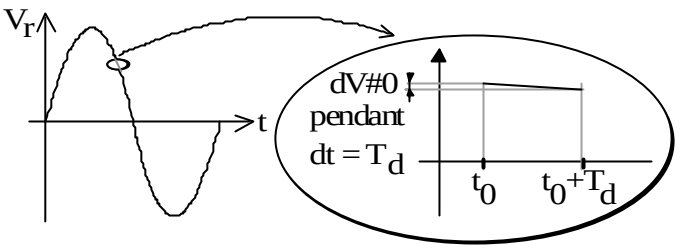


***Figure.2** : Variation lente des basses fréquences vis à vis de la fréquence de découpage*

On considère, en outre, une commande complémentaire des interrupteurs. Ce mode n'est pas le plus "efficace" mais il est le plus simple à décrire. Sur une période de découpage, la tension moyenne $<V_e>$, à l'entrée du pont complet, s'écrit :

$$< V_e >= [2.\alpha - 1].V_0 = \beta.V_0 \quad (1)$$

Où α est le rapport cyclique de hachage des interrupteurs K. Si β n'est pas constant mais varie lentement par rapport à la période de découpage de telle sorte que :

$$\beta(t) = \sin(\omega_{BF}.t) \quad (2)$$

Avec $\omega_{BF} << 2\pi.f_d$. Alors :

$$< V_e >= V_0.\sin(\omega_{BF}.t) \quad (3)$$

Autrement dit, la tension moyenne reproduit $\beta(t)$ sous la tension V_0. On la note :

$$V_e\big|_{BF} = \beta(t).V_0 = [2.\alpha(t) - 1].V_0 \quad (4)$$

Remarque : Ce raisonnement en boucle ouverte fait abstraction des diverses chutes de tension dans le convertisseur et permet de mettre en évidence simplement les évolutions basse fréquence des différentes grandeurs.

On assimilera donc, désormais, l'évolution basse fréquence des signaux à l'évolution de leur valeur moyenne. **Par la suite, on distinguera deux types de signaux. Les signaux, basses fréquences, notés BF (à 50 et 100 Hz) dont les variations sont imposées soit par le réseau soit par le rapport cyclique, et les signaux, ²hautes fréquences², notés HF (fréquence de découpage et ses multiples) relatifs au découpage.**

Pour connaître l'expression du rapport cyclique $\alpha(t)$, qui assure l'absorption sinusoidale d'un courant en phase avec la tension, il faut écrire l'équation en tension de la maille d'entrée, au sens de la BF et pour un courant sinusoidal d'entrée d'expression :

$$i_e\big|_{BF} = I_{eM}.\sin(\omega_{BF}.t) \quad (5)$$

L'écriture de cette loi des mailles donne :

$$v_r(t) = l.\left.\frac{di_e(t)}{dt}\right|_{BF} + v_e(t)\big|_{BF} \quad (6)$$

Soit :

$$V_{rM}.\sin(\omega_{BF}.t) = l.\omega_{BF}.I_{eM}.\cos(\omega_{BF}.t) + [2.\alpha(t) - 1].V_0 \quad (7)$$

Donc, le rapport cyclique $\alpha(t)$ qui permet d'obtenir un courant sinusoidal, a pour expression :

$$\alpha(t) = \frac{1}{2} + \frac{V_{rM}}{2.V_0}.\sin(\omega_{BF}.t) - \frac{l.\omega_{BF}.I_{eM}}{2V_0}.\cos(\omega_{BF}.t) \quad (8)$$

Que l'on peut aussi écrire sous la forme :

$$\alpha(t) = \frac{1}{2} + \Delta\alpha.\sin(\omega_{BF}.t - \Phi) \quad (9)$$

Avec : $$\Delta\alpha = \sqrt{\frac{V_{rM}^{\,2} + (l.\omega_{BF}.I_{eM})^2}{4\,V_o^{\,2}}} \qquad (10)$$ $$\Phi = \arctan\left(\frac{l.\omega_{BF}.I_{eM}}{V_{rM}}\right) \qquad (11)$$

On peut représenter le diagramme de Fresnel relatif à la maille d'entrée [DES 92]. Sur ce diagramme (Fig. 3), $V_e|_{BF}$ représente le fondamental de V_e, équivalent à la valeur moyenne de V_e lorsque f_d tend vers l'infini.

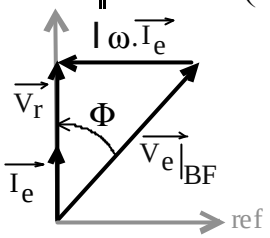


***Figure.3** : Diagramme de Fresnel appliqué aux basses fréquences*

Comme l'inductance est dimensionnée pour un filtrage HF, la chute de tension qu'elle produit est suffisamment faible, pour que $l.\omega_{BF}.I_{eM} << V_r$, alors :

$$\alpha(t) \approx \frac{1}{2} + \frac{V_{rM}}{2.V_0}.\sin(\omega_{BF}.t) \qquad (12)$$

Par principe, le rapport cyclique est compris entre 0 et 1. Cela implique donc la condition de fonctionnement suivante : $\mathbf{V_0 > V_{rM}}$ (13)

La condition (13) montre que le redresseur doit nécessairement être **élévateur** ce qui représente une contrainte importante sur le fonctionnement, par exemple pour un fonctionnement sur le réseau 230 V, la tension de bus continu doit être supérieure à 325 V, en pratique, compte tenu des butées de rapport cyclique, des chutes de tension, et de la marge nécessaire pour disposer d'une dynamique suffisante, plutôt 400 V. Nous verrons au chapitre concernant la régulation de courant comment réaliser la consigne de courant pour obtenir le rapport cyclique α désiré, cette fois en boucle fermée.

La démarche présentée ci-dessus, est valable pour un facteur de déplacement nul ($\varphi = 0$). Cette condition est, en général souhaitée, mais il peut être intéressant dans certains cas de pouvoir régler la valeur de ce déphasage. C'est le cas, notamment, lorsque deux convertisseurs fonctionnent de manière ″entrelacée″, c'est à dire connectés chacun aux bornes d'un transformateur à deux secondaires. On montre alors, que certaines valeurs de déphasage (φ_1 pour le convertisseur 1 en opposition de phase par rapport à φ_2 pour le convertisseur 2) permettent d'améliorer encore la qualité des formes d'onde [DES 92],[OFF 91]. Pour d'autres applications, le réglage de ce déphasage permet de compenser la puissance réactive absorbée par un autre convertisseur monté en parallèle et dont le courant prélevé peut être déphasé et/ou non sinusoidal. Enfin, notons que cette structure peut être également utilisée pour la réalisation de filtres actifs [FEL 97].

A.2- Allure des formes d'ondes (fonctionnement en commande complémentaire)

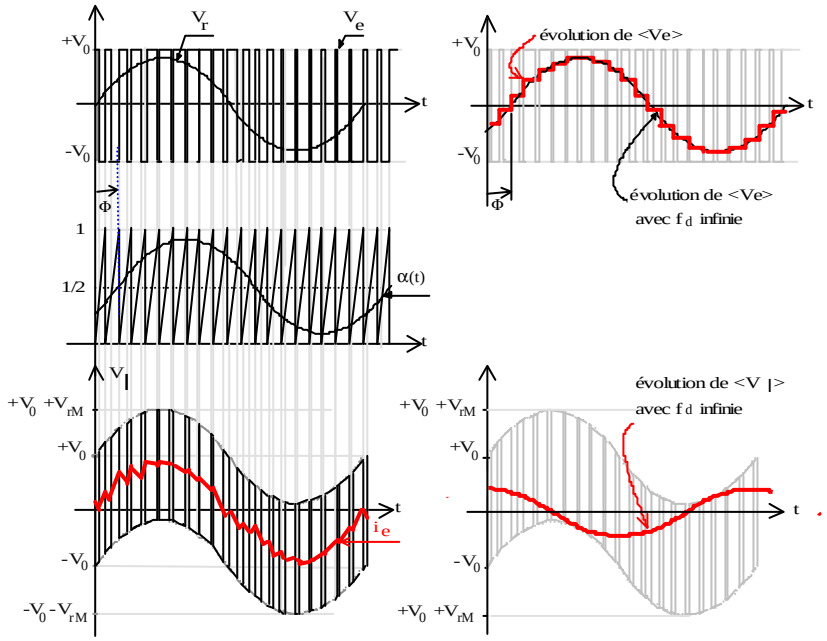


***Figure.4** : Principales formes d'ondes*

Applications Numériques :

Par la suite, nous présenterons à titre d'exemple, les valeurs numériques caractéristiques d'une alimentation d'une puissance de 500 W (ces grandeurs non « normalisées » correspondant en fait à des valeurs utilisées dans le cadre d'un montage didactique développé à l'ENS) dont les données seront les suivantes :

V_0 = 100 V	V_{rM} = 90 V
I_0 = 5A	f = 50 Hz

A.3- Dimensionnement des éléments de filtrage

Dimensionnement du filtrage d'entrée

L'impédance interne du réseau n'est jamais nulle. La ligne de transport est de nature inductive. Or, le convertisseur se comporte comme un générateur de tensions harmoniques qui créent des courants harmoniques via l'impédance du réseau que l'on considèrera, dans le spectre des hautes fréquences, comme une inductance pure l (fig.5,r_r=0). Toute propagation de ces courants harmoniques produit sur le réseau des chutes de tensions et augmente les pertes en ligne.

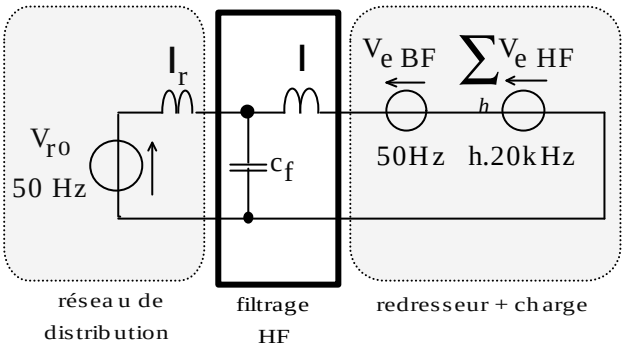


***Figure.5** : Modèle électrique de l'ensemble réseau / convertisseur (r_r=0)*

Il est donc souvent nécessaire d'atténuer l'amplitude de œs courants par l'utilisation d'un filtre placé au plus près du convertisseur. A 50 Hz, l'impédance des inductances est faible devant celle de la capacité. Au contraire à la fréquence de découpage, l'impédance des inductances est élevée et celle de la capacité faible. Ainsi les courants harmoniques, circulant dans la source, sont détournés par c_f (fig.6b) et ne se propagent pas sur le réseau (en réalité, le filtrage n'est jamais parfait, nous ne pouvons que les atténuer…).

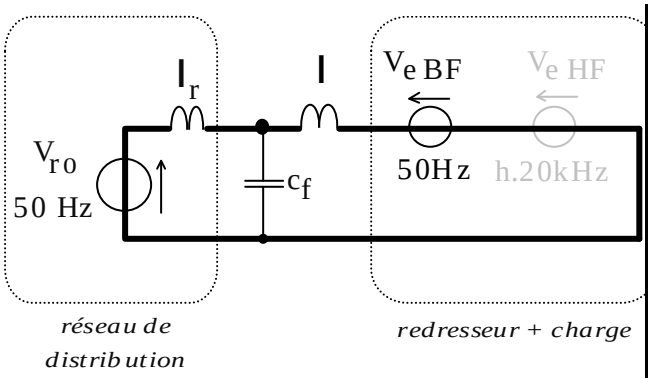


***Figure.6.a** : Circulation de la composante basse fréquence*

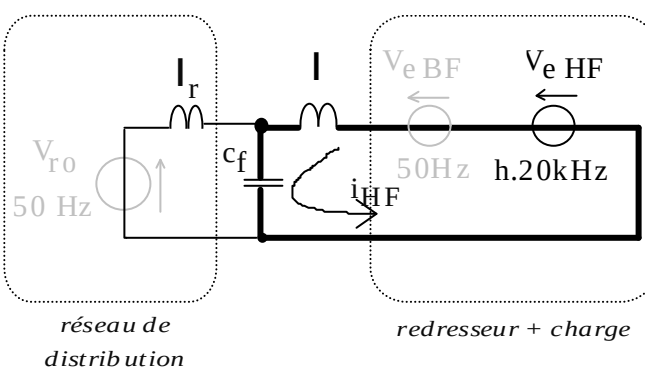


***Figure.6.b** : Circulation des composantes hautes fréquences*

Le filtre, constitué des éléments, l et c_f, doit donc réduire efficacement les ondulations hautes fréquences sans trop affecter la composante basse fréquence à 50 Hz. La fréquence de découpage, f_d, étant très supérieure à la fréquence du réseau, le calcul de l et de c_f peut être effectué comme dans le cas du mode de fonctionnement hacheur quatre quadrants en commande 2 niveaux (+/- V_0).(formes d'ondes identiques à l'échelle de la période de découpage). Dans ce cas, à tension du bus continu donnée (régulée), c'est pour un rapport cyclique de ½que les ondulations sont maximales, on obtient alors, si le condensateur est bien capacitif à la fréquence f_d :

$$\Delta i_{MAX} = \frac{V_0}{2.l.f_d} \qquad (14)$$

$$\Delta V_{cf} = \frac{\Delta i}{8.c_f.f_d} \qquad (15)$$

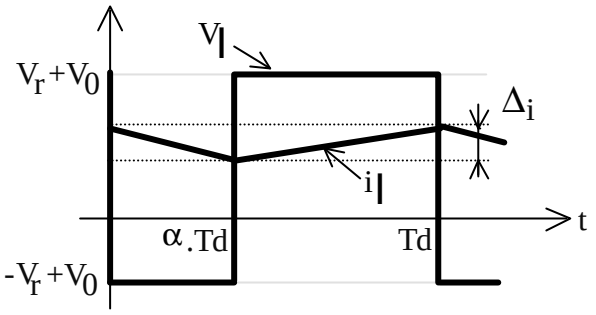


***Figure.7a** : courant et tension de l'inductance l*

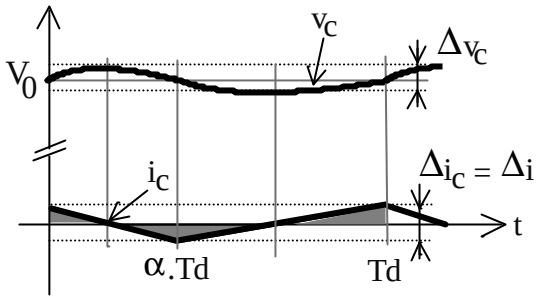


***Figure. 7b** : Courant et tension de la capacité C_f*

Application Numérique :

V_0 = 100 V	**fd = 20 kHz**
D_{iMax} = 0.5 A	**D_{VMax} = 1 V**
l = 5 mH	**C_f = 3µF**

Le calcul de la fréquence de coupure de ce filtre (expression 16) permet de s'assurer du passage de la composante BF.

$$f_c = \frac{1}{2.\pi.\sqrt{l.c_f}} = 1300 \text{ Hz} \qquad (16)$$

Nous devons enfin, vérifier que la résonance parallèle engendrée par la présence de l_r n'est pas excitée. En observant la figure 8, on constate qu'il existe une fréquence pour laquelle l'amplitude du courant réseau correspondant est dangereusement élevée (infinie si R_r = 0). Cette fréquence ne doit donc pas coincider avec l'une des fréquences harmoniques générées par le convertisseur à découpage.

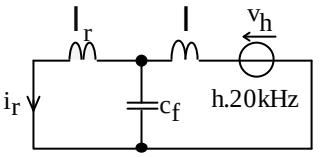


***Figure. 8** : schéma équivalent*

A partir du schéma de la figure 8, on montre que :

$$j.l_r.(h.\omega_{BF}).\underline{i}_r = \underline{v}_h \cdot \frac{1}{\left(1+\frac{l}{l_r}\right) - \left(l.c_f.h^2.\omega_{BF}^2\right)} \qquad (17)$$

On devra donc veiller à ce que :

$$(h.\omega_{BF}) \neq \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{l+l_r}{l.l_r}\right).c_f}} \qquad (18)$$

<u>Dimensionnement de la capacité de sortie C_0 :</u>

La forme d'onde du courant en sortie du redresseur est représentée en haut de la figure 9. Il est composé de la somme d'une composante continue (I_0), d'une composante BF à 100 Hz (I_{BF}) et de composantes HF (rangs n*Fd).

Seule la composante continue doit être transmise à la charge. L'impédance de la capacité doit donc être suffisamment faible aux fréquences harmoniques pour que ceux-ci soient déviés par C_0 (Fig.10).

En première approximation, nous dimensionnerons C_0 par rapport à l'harmonique le plus contraignant, c'est à dire I_{BF}.

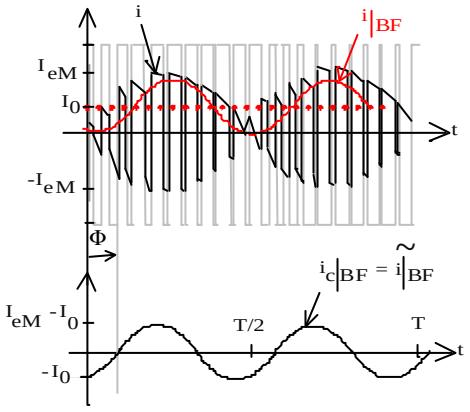


***Figure.9** : Tension et courant dans C_0*

La connaissance de la composante basse fréquence du courant de sortie du redresseur, notée I_{BF} (nous l'avions repéré i_0 sur la figure 1), est déduite de la relation suivante :

$$i\big|_{BF} = [2.\alpha - 1].i_{eBF} \tag{19}$$

Avec (8) :

$$i\big|_{BF} = 2.\Delta\alpha.I_{eM}.\sin(\omega_{BF}t).\sin(\omega_{BF}.t - \Phi) \tag{20}$$

$$\boxed{i\big|_{BF} = \Delta\alpha.I_{eM}[\cos\Phi - \cos(2\omega_{BF}t - \Phi)]} \tag{21}$$

En régime établi, la valeur moyenne de i_c est nulle, donc :

$$i_c\big|_{BF} = \Delta\alpha.I_{eM}.\sin(2\omega_{BF}.t - \Phi - \frac{\pi}{2}) \tag{22}$$

Donc l'ondulation crête-crête s'exprime:

$$\boxed{\Delta V_{C0} = \frac{I_{eM}.\Delta\alpha}{C_0.\omega_{BF}} = \frac{I_{eM}.V_{rM}}{2.V_0.C_0.\omega_{BF}}} \tag{23}$$

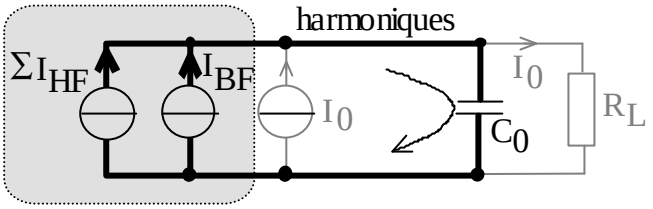


Figure.10 *:Circulation des composantes harmoniques du courant*

Application Numérique :

Si l'on considère, en première approximation, que les pertes du convertisseur sont négligeables, alors, au point de fonctionnement nominal, l'égalité entre les puissances côté alternatif et côté continu permet d'écrire :

$$\frac{V_{rM}.I_{eM}}{2} = V_0.I_0 \tag{24}$$

Donc :

I_{eM} = 11.1 A	**f = 10.9°**	**D a = 0.458**

Pour $\Delta\alpha max$ = 0.458 et I_{eM} = 11.1A, on obtient ΔV_{C0} de 10V avec: **C_0 » 2000 mF**

- B-REGULATIONS

L'expression 8, donnant l'évolution du rapport cyclique pour un fonctionnement en absorption sinusoidale de courant, est une expression théorique qui ne prend pas en compte les imperfections du montage (chutes de tensions résistives, semi-conducteurs imparfaits…). Elle ne donne donc qu'une image approchée de l'évolution réelle du rapport cyclique. En pratique, α est généré à partir du correcteur de la boucle de courant qui reçoit une consigne sinusoidale en phase avec la tension réseau. Il est donc nécessaire de modéliser le convertisseur et sa commande puis de calculer les paramètres d'un correcteur.

B.1- Modélisation de la boucle de courant et asservissement

Le modèle utilisé, est un modèle aux valeurs moyennes. Autrement dit, on assimile les grandeurs variables à leur valeur moyenne, donc à l'évolution de leur composante basse fréquence et on néglige les diverses chutes de tension autres que celle due à l'inductance du filtre d'entrée. Pour plus de rigueur et de sûreté, il serait toutefois souhaitable de prendre en considération le filtre d'entrée complet dans la modélisation (c'est à dire avec c_f). La fréquence de coupure de ce filtre peut, dans certains cas, influencer le réglage de l'asservissement.

$$l.\left.\frac{di_e(t)}{dt}\right|_{BF} = V_r(t) - V_e(t)\big|_{BF} \tag{25}$$

Après transformation de Laplace et avec l'hypothèse d'une tension V_0 constante, l'équation 25 permet d'écrire :

$$i_e(p) = \frac{V_r(p)}{l.p} - \frac{V_e(p)}{l.p} \qquad (26)$$

Pour un convertisseur à découpage, une approximation satisfaisante consiste à le modéliser par un gain statique pur $G_0 = 2V_0/V_{cdeMax}$. Pour une commande 0-10 V, $\mathbf{G_0=20}$.

Notons, que le terme G_0 est une fonction de V_0 qui est une tension ondulée à $2\omega_{BF}$. Nous pourrions donc ajouter une entrée de perturbation au modèle.

Alors : $V_e(p) = G_0 . V_{cde}(p)$ (27)

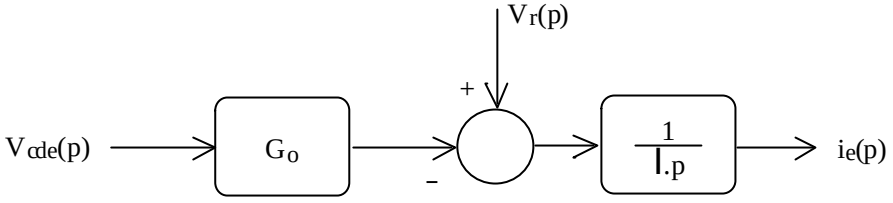


***Figure.11** : Schéma bloc du système en boucle ouverte*

Un simple correcteur proportionnel peut être utilisé car la chaîne directe possède déjà une intégration (en s'assurant bien que les diverses chutes de tension, notamment celle dans la résistance de l'inductance, n'introduisent pas une limitation du gain gênante pour l'erreur). Soit $(-K_p)$ le gain du correcteur et K_{imes} le gain du capteur de courant.

A $V_r(p) = 0$, la transmittance en boucle fermée s'exprime :

$$H_i(p) = \frac{1}{k_{imes}} . \frac{1}{1 + \frac{l_f}{G_0 . k_{imes} . K_p} . p} \qquad (28)$$

Si on limite la bande passante, ω_c, à 95000 rad/s (f_c = 15 kHz < f_d), alors : $K_p = 25$ (avec $K_{imes} = 1$)

Si $\tau_c = \frac{l}{G_0 k_{imes} K_p}$, alors l'expression du courant i_e avec la prise en compte de V_r en boucle fermée est:

$$i_e(p) = \frac{1}{k_{imes}} . \frac{1}{1 + \tau_c . p} . i_e^*(p) + \frac{1}{G_0 . K_p . k_{imes}} . \frac{1}{1 + \tau_c p} . V_r(p) \qquad (29)$$

Avec une telle correction, on remarque que la tension V_r se comporte comme une perturbation vis-à-vis de la boucle de courant puisqu'elle ajoute une composante basse fréquence (deuxième terme de l'équation 29). La solution consisterait donc à compenser cet effet. On montre qu'une compensation de $V_{comp}(p) = V_r/V_o$ permet d'annuler, en théorie, ce courant de perturbation.

Schéma de régulation :

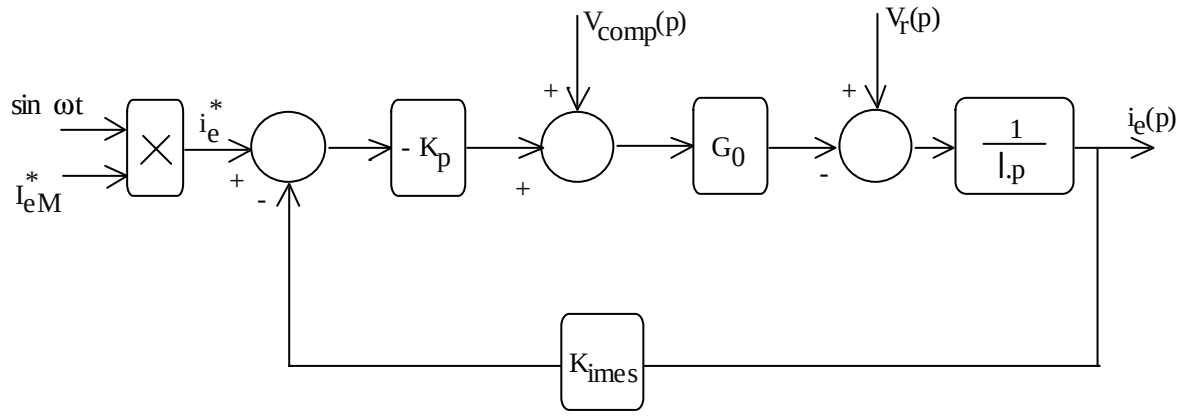


***Figure.12** : Schéma bloc du convertisseur avec correcteur*

La consigne I_e^* est construite, via un multiplieur, à partir de l'image de la tension réseau. En fonctionnement sur charge résistive, la boucle de courant ainsi réalisée constitue une commande en puissance. Dans la pratique, il est généralement nécessaire d'asservir la tension du bus continu c'est ce que va permettre une seconde boucle de régulation externe à la boucle de courant (architecture en boucles imbriquées).

B.2- Boucle de tension :

Pour la modélisation de cette boucle, nous considérons la boucle interne de courant parfaite, c'est à dire unitaire (fig.13). Nous avons donc à modéliser la transmittance suivante :

$$\frac{V_0(p)}{I_{eM}(p)} \approx \frac{V_0(p)}{I_{rM}^*(p)} \tag{30}$$

Cette modélisation, peu classique, s'appuie le calcul de la puissance instantanée côté réseau. Celle-ci s'écrit :

$$p(t) = V_{rM}.\sin(\omega_{BF}.t).i_{rM}(t).\sin(\omega_{BF}.t) = \frac{V_{rM}.i_{rM}(t)}{2} \tag{31}$$

On suppose toujours un rendement unitaire du pont redresseur, alors l'égalité des puissances instantanées permet d'écrire :

$$\frac{V_{rM}.i_{rM}(t)}{2} = v_0(t).i_0(t) \tag{32}$$

D'autre part :

$$i_0(t) = C_0\frac{dv_0(t)}{dt} + \frac{v_0(t)}{R_L} \tag{33}$$

En décomposant les variables courant et tension en une composante continue plus une composante variable telle que :

$$\begin{aligned} v_0(t) &= \overline{V}_0 + \tilde{v}_0 \\ i_0(t) &= \overline{I}_0 + \tilde{i}_0 \end{aligned} \tag{34}$$

Alors :

$$v_0(t).i_0(t) = \overline{V}_0.\overline{I}_0 + \overline{V}_0.\tilde{i}_0 + \tilde{v}_0.\overline{I}_0 + \tilde{v}_0.\tilde{i}_0 \tag{35}$$

Le dernier terme de cette équation est une variation du second ordre que l'on peut négliger par rapport aux autres. L'équation 33 s'écrit :

$$\overline{I}_0 + \tilde{i}_0 = \frac{\overline{V}_0}{R_L} + \frac{\tilde{v}_0}{R_L} + C.\frac{d\tilde{v}_0}{dt} \tag{36}$$

Donc :

$$v_0(t).i_0(t) = \frac{(\overline{V}_0)^2}{R_L} + \overline{V}_0.\frac{\tilde{v}_0}{R_L} + \overline{V}_0.C.\frac{d\tilde{v}_0}{dt} + \frac{\overline{V}_0}{R_L}.\tilde{v}_0 \tag{37}$$

Après transformation de Laplace, on obtient :

$$TL[v_0(t).i_0(t)] = \left(\frac{2}{R_L} + C.p\right).\overline{V}_0.V_0(p) \tag{38}$$

Et enfin, la fonction de transfert :

$$\frac{V_0(p)}{I_{rM}^*(p)} = \frac{V_{rM}}{4.\overline{V}_0}.\frac{R_L}{1+\frac{R_L.C_0}{2}.p} \tag{39}$$

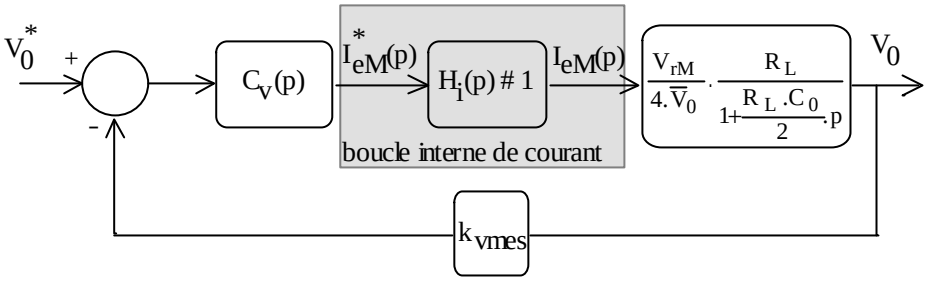


***Figure. 13**: boucle de régulation en tension*

Un correcteur Proportionnel-Intégral peut s'écrire sous la forme:

$$C_v(p) = K_{pv}\left(\frac{1+\tau_i p}{\tau_i p}\right) \qquad (40)$$

On calcule les éléments du correcteur pour le cas le plus défavorable, c'est à dire au point de fonctionnement nominal (charge résistive de valeur $R_L = R_{Lmin}$).

Application Numérique :

$I_{onominal}$ = 5 A **R_{Lmin} = 20 Ω** Alors : **$t = (R_{Lmin}.C_0)/2$ = 20 ms**

La fonction de transfert en boucle fermée s'exprime :

$$\frac{V_0^*(p)}{V_0(p)} = \frac{1}{k_{vmes}} \cdot \frac{1+\tau_i . p}{1+\tau_i .\left(1+\frac{1}{k_{vmes}.G.K_{pv}}\right).p + \frac{\tau.\tau_i}{k_{vmes}.G.K_{pv}}.p^2} \qquad (41)$$

Avec $G = R_L V_{RM}/4\overline{V}_0$

Pour des raisons décrites ci-dessous, il est nécessaire de limiter la bande passante de l'asservissement de tension. En prenant une valeur de 30 rad/s (environ 5 Hz) et coefficient d'amortissement ζ de 1, on obtient :

$$K_{pv} = \frac{2z.\omega_n.\tau - 1}{G.k_{vmes}} \qquad (42) \qquad \tau_i = \frac{2z.\omega_n.\tau - 1}{\tau.\omega_n^2} \qquad (43)$$

Application Numérique : **K_{pv} = 9 (pour K_{vmes}=1/200)** **t_i = 11 ms**

Pourquoi limiter la bande passante à 30 rad/s ?

Parce-qu'au-delà, la composante $2\omega_{BF}$ présente sur la mesure de V_0 crée une erreur (en sortie du comparateur de tension) à $2\omega_{BF}$ qui va produire une ondulation à la même pulsation sur la consigne d'amplitude de courant. Cette dernière multipliée avec la sinusoide de référence, va fournir une consigne de courant instantanée présentant une distorsion d'autant plus élevée que l'on essaiera de rendre la tension V_0 parfaitement constante avec une bande passante élevée. On ne peut donc obtenir une boucle de tension rapide sans distorsion du courant (fig.18).

Notons que cette limitation est une caractéristique générale des convertisseurs travaillant en absorption sinusoidale de courant (convertisseurs PFC).

Afin de s'affranchir de ce problème, brsque l'on souhaite une dynamique élevée, on adopte plutôt la structure ci-contre (figure 14)

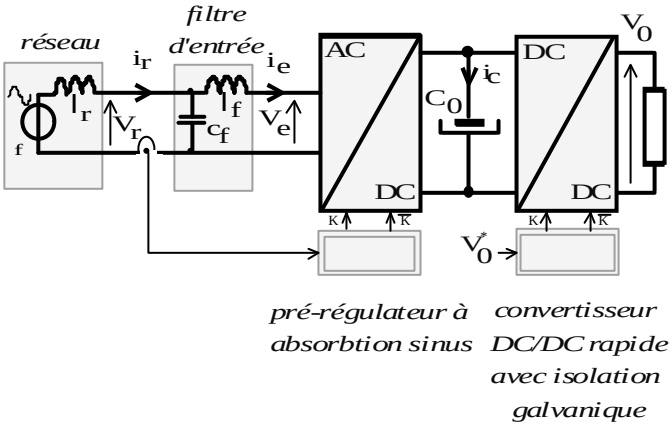


***Figure. 14** : Dispositif à absorption sinusoidale de courant avec dynamique élevée en tension.*

-C-EXPERIMENTATION

Figure.14 : Tension réseau et courant réseau (bande passante de la boucle de tension : 5Hz).
Figure.15 : Tension réseau et courant réseau (bande passante de la boucle de tension : 20Hz).
Figure.16 : Performances en régulation. Tension V_0 régulée à 100V avec temps de réponse de 3 secondes environ.(Echelon de charge de 10Ω)

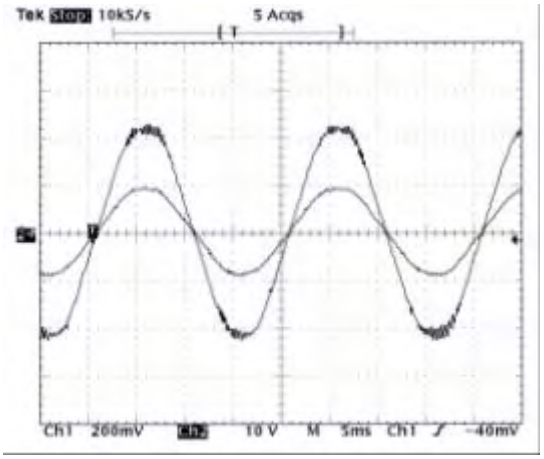


***Figure.15a** : (ch1 :Vr/ch2 :i_r)*
Bande passante de la boucle de courant : 5 Hz

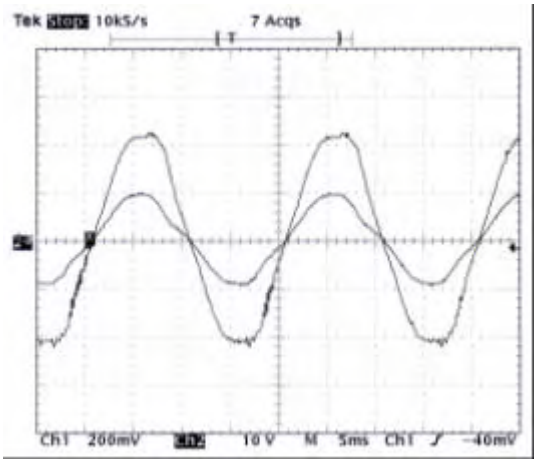


***Figure.15b**: (ch1 :Vr/ch2 :i_r)*
Bande passante de la boucle de courant : 20 Hz

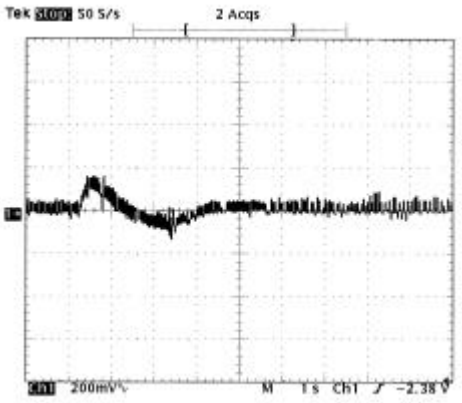


***Figure. 16** : Performances en régulation*

Conclusion

Ce type de montage connaît, il est vrai, une utilisation encore limitée. Il est certain, cependant, que la notion d'absorption sinusoidale de courant devrait se généraliser en raison de normes de plus en plus sévères. Cette structure est bien sur extensible au triphasé. On peut fournir également de la puissance réactive ce qui présente un intérêt en génération d'énergie, par exemple dans le domaine éolien. Une commande vectorielle est alors intéressante pour générer une référence de puissance réactive

Bibliographie :

[FOC 97] H.FOCH, F.FOREST
″Onduleurs de tension : Eléments sur la mise en œuvre et les multiples applications d'une fonction fondamentale de l'électronique de puissance″ Journées 3EI, Mars 1997.

[FEL 97] G.FELD, E.HOANG
″Filtrage actif- Modélisation, Dimensionnement et Mise en œuvre d'une maquette pédagogique″ Journées 3EI, Mars 1997.

[DES 92] E.DESTOBBELEER, M.OSTOJSKI, V.SABATE
″La MLI dans le redresseur d'entrée des locomotives alimentées en monophasé″ RGE N°5, Mai 92.

[KOU 96] Ara KOUYOUMDJIAN
″La compatibilité électromagnétique″
Collection Technique – Groupe Schneider
Février 1996 – ISBN 2-907314-31-9

[OFF 91] L.J.J OFFRINGA *et al*
″Modelling and control of a 4-quadrant pulse modulated line-side converter for 25 kV, 50Hz supplied traction equipment″.
EPE'91, Firenze 1991, Vol 1, pp 105-110.

[ERI 97] ERICKSON R. W.
″Fundamentals of Power electronics″
Kluwer academic Publishers GroupISBN 0-412-08541-0

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, leurs applications en traction à moteurs sans collecteur

C.2.4 - Les onduleurs de traction à thyristors :

Les rames TGV-PSE de 6300 kW, à 12 moteurs de traction de 535 kW à collecteur, ont été les derniers matériels de grande puissance, dotés de ce type de moteurs, étudiés pour la SNCF. Nous avons vu, à l'article précédent, la filiation de leurs redresseurs contrôlés et hacheurs 1500 V avec les équipements des locomotives BB 15000, 7200 et 22200 de 4400 kW dont les redresseurs et hacheurs autorisent les 5700 kW. Mais la puissance de ces engins est limitée par leurs 2 moteurs à collecteur TAB 674, d'environ 7 t chacun. Malgré des améliorations constructives, telle l'utilisation d'isolants admettant des températures plus élevées (une version "gonflée" du TAB 674, le TABZ 7130, a été montée sur les locomotives devant rouler à 200 km/h ; cependant, l'alourdissement de cette version est d'environ 0,8 t).

On a donc atteint les limites du moteur à collecteur en grande traction alors que les équipements à semi-conducteurs qui les alimentent sont très à l'aise.

Le point faible de ce type de moteur est, bien sûr, son collecteur pour lequel on ne doit pas dépasser certaines limites de tension entre lames et de vitesse périphérique ; il est donc délicat en utilisation et coûteux à la construction et en maintenance.
On est aussi limité en longueur de fer si l'on veut que le moteur soit installé dans un châssis de bogie à voie normale, l'augmentation de la puissance conduit donc à augmenter le diamètre du moteur (l'induit du TAB 674 a un diamètre extérieur de 1180 mm pour une longueur du noyau de 330 mm seulement, son collecteur a 810 mm de diamètre et 140 mm de longueur).

Vers le milieu des années 1970, la SNCF et les constructeurs pensent de nouveau très concrètement au moteur sans collecteur qui, à masse et encombrement identiques, développe une puissance supérieure d'environ 50% à celle du moteur à collecteur.

Cette réflexion, accompagnée d'expérimentations, avait d'ailleurs commencé, à l'étranger en particulier, dès le début des années 1900, (voir à ce sujet l'article de M. Y. Machefert-Tassin et A. Gache dans la Revue Générale des Chemins de Fer d'octobre 1985), mais aussi à la SNCF avec les CC 14000, de 1955, à 6 moteurs asynchrones avec conversion par groupes tournants et, moins connue, l'expérimentation fugitive par la SNCF, en 1961, d'un moteur synchrone alimenté par un onduleur à excitrons installé sur la Z 9053 (déjà rencontrée d'ailleurs aux essais de Savoie des années 1950 (voir le n° 25 de ***La Revue 3EI*** *- page 62*).

C'est que les semi-conducteurs de puissance au silicium et les composants électroniques de commande intégrés (microprocesseurs et composants annexes, en particulier) sont très largement utilisés en traction ferroviaire où ils donnent pleine satisfaction ; ils permettent dès lors d'envisager la réalisation de convertisseurs statiques capables d'alimenter ces moteurs. C'est ainsi qu'en 1974 débuta l'étude et la réalisation par JEUMONT-SCHNEIDER, d'un onduleur de tension à thyristors pour moteur asynchrone de 600 kVA qui sera décrit ultérieurement.

Avant de décrire plus en détail les expérimentations et applications de série du moteur sans collecteur à la SNCF, on peut déjà en indiquer quelques généralités de principe.

Deux grandes familles de moteurs sans collecteur, bien connues et universellement appréciées, viennent tout de suite à l'esprit :
- le moteur asynchrone à rotor à cage d'écureuil, qui domine pour les petites puissances grâce à sa facilité d'alimentation par le réseau triphasé de distribution (les moteurs monophasés, à phase capacitive, sont aussi très utilisés en petites puissances); mais, s'il est de construction facile et économique, surtout en ce qui concerne le rotor, il "décroche" facilement en cas de couple résistant important. Un rotor, typique d'un tel moteur, est représenté à la *figure 157* ci-dessous.

Figure 157 *Rotor à "cage d'écureuil" d'un moteur asynchrone de 280 kW. Il s'agit d'un moteur installé sur une rame expérimentale de métro RATP (MF77-M30029) équipée d'un onduleur de courant précédé d'un hacheur de réalisation TCO.*

(cliché Desjardin - extrait d'une plaquette TCO - ALSTHOM)

- le moteur synchrone, réservé en principe aux grandes puissances nécessaires à diverses industries, où l'on recherche une grande stabilité de vitesse associée à un fort couple ; mais il a un rotor bobiné qui nécessite des bagues pour son alimentation en courant continu. Nous

l'avons rencontré, en version monophasée, sur les CC 14000 et 14100, où il entraînait une génératrice à courant continu.
Sa constitution est semblable à celle d'un alternateur ; il fonctionnera d'ailleurs comme tel en freinage électrique en particulier. Le rotor, tel celui représenté à la *figure 158*, est en principe plus difficile et coûteux à réaliser que celui du moteur asynchrone, et il a 2 bagues (leur maintenance est toutefois légère).

Figure 158 *Rotor à 8 pôles saillants d'un moteur synchrone autopiloté JEUMONT de 2800 kW. Il s'agit de l'un des 2 moteurs, à double étoile, de la locomotive bicourant prototype BB 20011, équipée d'onduleurs de courant. Au premier plan, figurent les 2 bagues d'alimentation de l'inducteur.*

(cliché extrait d'un plaquette SNCF - Direction du Matériel)

Quel que soit le type de moteur utilisé, pour la traction, il est bien entendu indispensable de pouvoir contrôler finement sa vitesse et l'effort développé, comme l'on y parvient parfaitement avec un moteur à collecteur alimenté par un redresseur ou un hacheur à thyristors, comment cela peut-il être obtenu avec un moteur sans collecteur ?

- Le moteur asynchrone permet ce type de fonctionnement si on l'alimente sous tension et fréquence variables (selon la loi U/F constant, de préférence). Le convertisseur nécessaire doit être un onduleur de tension à commutations forcées assez complexe ; il devra donc obligatoirement utiliser des thyristors rapides (en attendant l'arrivée d'autres composants mieux adaptés à ce cas, les GTO puis les IGBT, mais ce sera pour la fin des années 1980) et des condensateurs de commutation qui, pour des puissances importantes, seront nombreux (de masse et volume importants, en ce qui concerne les condensateurs).
  On verra aussi l'adoption par la SNCF d'une version de moteur asynchrone à onduleur de courant de moyenne puissance, pour ses automotrices de banlieue ; l'onduleur est simple et n'a besoin que de 3 condensateurs pour assurer la commutation forcée.
- Quant au moteur synchrone, on a aussi besoin d'un onduleur à fréquence variable pour alimenter le stator mais ce sera un onduleur de courant et la machine, préalablement excitée, génère des contre-tensions (comme vu plus haut, le moteur synchrone est aussi un alternateur) capables de provoquer la commutation naturelle d'un bras de thyristors sur un autre. Aucun condensateur de commutation ne sera donc nécessaire en régime normal. Seuls les démarrages demanderont une commutation dite "assistée" car, aux très faibles vitesses, les tensions développées par la machine sont insuffisantes pour assurer la commutation naturelle des thyristors onduleurs ; des circuits annexes, de faible puissance seront alors nécessaires.
  La propriété de base du moteur synchrone étant, comme son nom l'indique, de fonctionner sans aucun "glissement" entre la vitesse du rotor et celle du champ tournant développé par le stator, seul un décalage angulaire, nécessaire et qui augmente avec le couple résistant, existe entre l'axe des pôles du rotor et le champ tournant, mais le rotor reste "accroché" à ce champ (en deçà d'une certaine limite bien entendu).
  Si l'on veut faire varier la vitesse, il faudra donc générer une tension triphasée (nécessaire à la création d'un "vrai" champ tournant) à fréquence variable telle que le champ tournant statorique précède légèrement le champ rotorique qui sera donc le maître du système puisque sa vitesse de rotation est directement lié à la vitesse du train ; c'est donc l'inverse de ce qui se passe avec un moteur alimenté à fréquence fixe et imposée (moteur industriel classique par exemple) où l'on doit "lancer" le rotor à vide, par un moyen ou un autre, afin d'atteindre la vitesse dite de synchronisme fixée par la fréquence du réseau et le nombre de pôles de la machine. C'est seulement lorsque le synchronisme sera atteint que l'on pourra connecter le stator au réseau sans risque de surintensité importante.
  En conséquence, on pressent qu'en vitesse variable, le pilotage des commutations des bras de l'onduleur qui génèrera la tension d'alimentation du stator, devra donc être asservi , non seulement à la vitesse de rotation mais aussi à la position angulaire du rotor ; d'où l'appellation "moteur synchrone autopiloté" donnée à ce moteur utilisé en traction (mais aussi dans l'industrie, voir l'article de M. R. Chauprade dans la Revue JEUMONT-SCHNEIDER n° 24 de septembre 1977).

Les diverses expérimentations en traction à moteurs sans collecteur faites par la SNCF, vont être décrites tout naturellement dans l'ordre chronologique mais en séparant le "synchrone" de l'"asynchrone" car les principes de fonctionnement de chacun de ces 2 systèmes [onduleur-moteur], indiqués au début de chaque partie, sont très différents l'un de l'autre.

C.2.4.1 - La traction à moteurs synchrones à la SNCF :

Principes de fonctionnement de la chaîne de traction

Génération du couple :

La *figure 159*, ci-dessous, représente un moteur synchrone alimenté par une source de courant continu par l'intermédiaire d'un onduleur triphasé à thyristors.

Afin de faciliter la compréhension de ce qui se passe entre les conducteurs des 3 bobines du stator (R, S et T), parcourus par un courant continu et les pôles Nord et Sud du rotor, lorsque l'on avance "pas à pas" dans la séquence de commande des thyristors de l'onduleur qui "aiguillent" le courant I de la source vers telle ou telle bobine statorique, on peut imaginer le moteur "mis à plat" tel que représenté par les 6 croquis de gauche de la *figure 160* où l'on voit "de bout" les conducteurs statoriques (pointes et queues de flèches indiquant le sens des courants). Il s'agit là d'une approche du fonctionnement du moteur synchrone, alimenté par un onduleur de courant, calquée sur ce qui se passe entre les conducteurs de l'induit d'un moteur à courant continu et le champ de l'inducteur.

Chaque étape, de a) à f), correspond à une avancée angulaire de 60° du rotor par rapport à la précédente (pour un moteur bipolaire à bobinage en simple étoile, en l'occurrence).

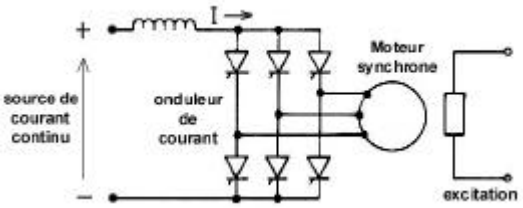


Figure 159 *Principe de la chaîne de traction utilisant un moteur synchrone autopiloté. Le courant I, débité par la source, est "aiguillé" par les 6 interrupteurs de l'onduleur, constitués de thyristors ; on peut les assimiler à un collecteur à 6 lames statique. L'excitation est assurée par l'alimentation du bobinage rotorique (le rotor est muni de 2 bagues).*

A la 1ère étape (a), le rotor est supposé à l'arrêt et l'on amorce les thyristors 1 et 6, le courant I de la source parcourt d'abord les conducteurs de la bobine R en passant d'abord devant le pôle N, d'arrière en avant (pointe de flèche) puis Sud, d'avant en arrière (queue de flèche), il revient à la source par ceux de la bobine S en passant à nouveau devant le pôles N suivant et le même pôle S. Le champ généré par le rotor alors la cause d'une force F' qui s'exerce sur les conducteurs statoriques telle que le rotor est soumis une force tangentielle F (réaction à F' puisque le stator est fixe) ; si le courant I est suffisant, le couple appliqué au rotor dépassera le couple résistant et il se mettra à tourner, ses pôles atteindront donc la position représentée à l'étape (b).

On voit qu'à cette étape (b), ce sont les thyristors 1 et 2 qui sont conducteurs, alimentant toujours la bobine R mais T a pris le relais de S ; la force F appliquée au rotor est identique à celle de l'étape précédente puisque le même nombre de conducteurs, parcourus par le même courant I, sont soumis aux mêmes champs ; le rotor continuera donc à tourner.

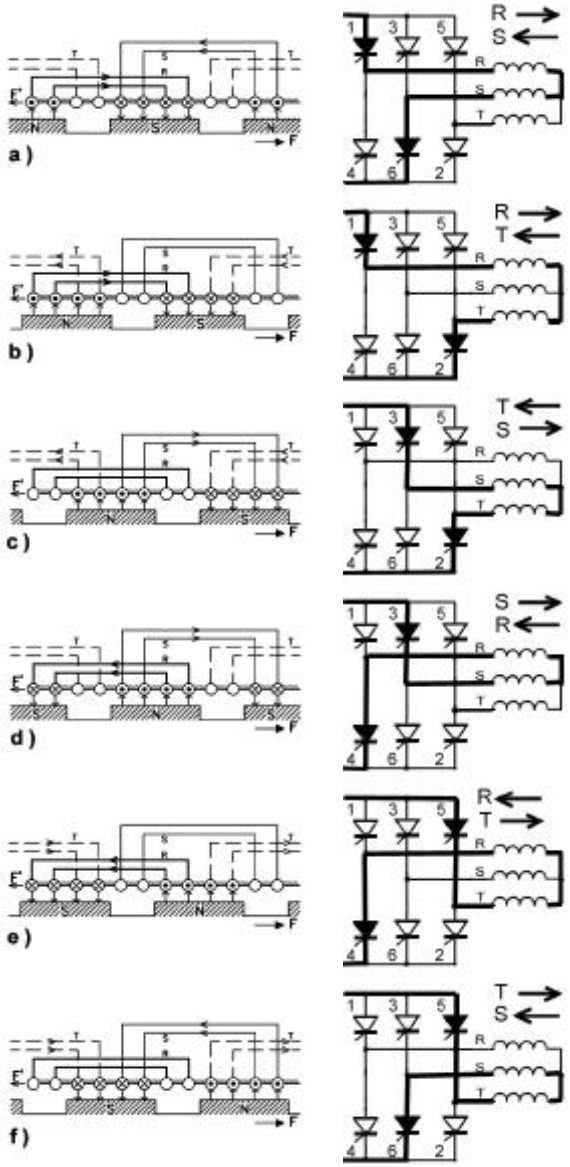


Figure 160 *Séquences de génération du couple par commutations successives des thyristors de l'onduleur.*

(adaptation d'un document interne SNCF - DETE de 1982)

Pour arriver électriquement à l'étape (b), il a donc fallu désamorcer le thyristor 6 avant d'amorcer le 2 ; cette séquence de commutation a dû être déclenchée automatiquement au passage à une position angulaire du rotor située entre les positions respectives représentées aux étapes (a) puis (b). Nous voyons donc apparaître très clairement le principe d'autopilotage de l'onduleur par le moteur qu'il alimente.

La suite des événements s'enchaîne tout naturellement en exécutant les commutations des thyristors qui aboutissent successivement aux étapes (c) à (f) pour revenir, après un tour complet du rotor, à l'étape (a) initiale. La succession des conductions simultanées des couples de thyristors est donc la suivante :
1-6 (a), 1-2 (b), 3-2 (c), 3-4 (d), 5-4 (e), 5-6 (f) puis à nouveau 1-6 (a) et ainsi de suite. L'onduleur fournit

donc au stator des courants triphasés rectangulaires d'une durée de 120° chacun.

Le couple du moteur, donc l'accélération du train, est uniquement proportionnel au courant I débité par la source continue (à flux rotorique constant, donc pour un même courant d'excitation) ; on retrouve les mêmes phénomènes électromagnétiques et un fonctionnement assimilable à de celui du moteur à collecteur alimenté en tension continue variable mais où le collecteur, réduit à 6 lames, serait au stator. De même, la tension continue d'alimentation de l'onduleur devra augmenter au fur et à mesure de l'accélération du train afin de maintenir le courant I, donc le couple moteur, au niveau requis. Si l'on asservit le courant d'excitation au courant statorique I, on donne au moteur synchrone autopiloté un comportement proche de celui du moteur série à collecteur universellement apprécié en traction.

Commutation des thyristors de l'onduleur :

- la commutation dite "naturelle" :

Si nous considérons le moteur synchrone en rotation avec son excitation rotorique alimentée, des fém sinusoïdales sont développées aux bornes des 3 bobines R, S et T (tel un alternateur), ces tension composées sont représentées par les chronogrammes superposés de la *figure 161*. Nous allons examiner comment ces tensions, appliquées aux 3 bornes de sortie de l'onduleur, vont pouvoir être utilisées pour favoriser l'amorçage d'un thyristor déterminé tout en polarisant en inverse celui des thyristors voisins (dont l'anode ou la cathode, est au même potentiel de la source) qui est encore en conduction et que l'on veut désamorcer.

Commençons déjà par amorcer le thyristor 1 à l'instant t_0 (point de départ fictif) il ne prendra la conduction que si le courant de la source parvient à s'établir au travers de l'un des couples de phases R-S ou R-T et si l'on amorce aussi le thyristor 6 ou 2 correspondant. Il faudra donc que la tension continue de la source soit toujours supérieure à la tension crête des fém statoriques.

A t_0, la tension R/S est presque à sa valeur crête tandis que R/T passe à 0 ; on amorcera 6 car l'amorçage de 2 provoquerait un court-circuit instantané, bien que très fugitif, sur la source (R/T est alors à 0, mais en phase croissante). Nous sommes alors situés à l'étape a) de la *figure 160* ; la séquence suivante veut que le thyristor 2 prenne le relais de 6 (le thyristor 1 étant toujours en conduction), voyons comment cela se passe.

A l'instant t_2, tentons l'amorçage de 2. Ce thyristor a de bonnes raisons de conduire car R/T étant instantanément inférieure à R/S, présente une contre-tension moindre à la source ce qui est donc favorable à l'établissement d'un courant dans les phases R et T ; le courant I, débité par la source a, quant à lui, tendance à être à peu près constant car les diverses réactances du circuit (présence de la self de lissage en particulier) s'opposent à sa variation.

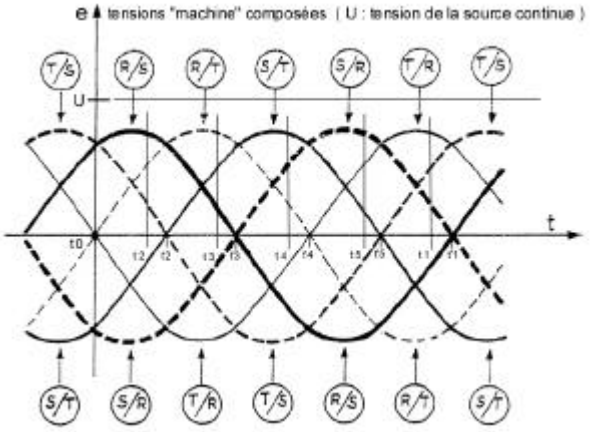


Figure 161 *Tensions triphasées composées développées par la machine dont le bobinage d'excitation du rotor est alimenté.*
Les instants repérés t 1 à t 6 correspondent aux amorçages successifs des thyristors de mêmes repères.

(adaptation d'un document interne SNCF - DETE de 1982)

On assiste donc à la montée d'un courant dans le couple R-T, au détriment de celui du couple R-S ; les 2 thyristors 6 et 2 sont donc simultanément en conduction mais l'anode de 2 est positive par rapport à celle de 6 puisque c'est de la tension T/S dont il s'agit. La situation est, dès lors, très claire : le thyristor 6 ne demande qu'à s'éteindre car il est polarisé négativement et son courant est en régression car concurrencé par celui qui s'établit dans 2 ; son extinction doit cependant être complètement terminée avant le temps t'_2, où les tensions R/S et R/T sont égales et au-delà, non seulement l'extinction de 6 ne serait plus possible (T/S s'inversant alors) mais, R/S étant en décroissance, on assisterait à une remontée du courant dans R-S et le thyristor 6 puis, si rien n'intervient avant l'instant t'_2 où R/S s'inverse, à la mise en série de la tension de la source avec R/S ; d'où une importante surintensité (c'est le phénomène de reconduction déjà rencontré avec les redresseurs complètement contrôlés que l'on fait fonctionner en onduleur monophasé pour le freinage par récupération).

Apparaît, dès lors, la nécessité pour la logique de commande d'intégrer une "marge" dans la détermination des instants d'amorçage des divers thyristors, qui prenne en compte cette avance sur les instants critiques (tels t'_2, t'_3, etc..), il faut aussi tenir compte du temps de recouvrement au blocage propre à tout thyristor ; cette "marge" est aussi appelée "angle de garde". Nous voici donc parvenus à l'étape b) de la *figure 160*.

L'étape suivante consiste maintenant à réaliser une commutation entre 2 des thyristors supérieurs de l'onduleur, en l'occurrence, 3 doit s'amorcer et 1 s'éteindre. Amorçons donc le thyristor 3 à l'instant t_3, à cet instant, S/T est inférieure à R/T ce qui favorise l'établissement d'un courant dans S-T et 3 au détriment de celui dans R-T et 1, la tension R/S polarise négativement le thyristor 1 qui s'éteint donc ; la commutation s'est donc bien réalisée selon des phénomènes symétriques à ceux décrits plus haut pour les thyristors 6 et 2 inférieurs.

Ces 2 types de commutations complémentaires ayant été décrits, il est inutile de le faire pour leurs homologues aux temps t_4 et t_6, pour les thyristors inférieurs, puis t_5 qui précédera t_1, pour les thyristors supérieurs.

On constate, avec grande satisfaction, que l'on arrive à réaliser les commutations des thyristors sur un onduleur de courant, alimentant une machine synchrone autopilotée, sans recourir à aucun des composants annexes (thyristors auxiliaires, selfs, condensateurs) rencontrés précédemment sur les équipements à commutation forcée ; seules les fém développées par le moteur avec son rotor excité, ont été mises à profit pour y parvenir. Il s'agit donc bien de commutations naturelles des thyristors, celles pour lesquelles ils présentent le plus d'intérêt et où les types dits "lents" (qui, de surcroît, sont les plus fiables et les plus économiques) suffisent.

Mais qu'advient-il si les fém développées par la machine sont insuffisantes pour assurer correctement ce type de commutation ? C'est le cas aux très basses vitesses (considérées en général comme inférieures à 5 %, voire 3%, de la vitesse maximum du moteur) et tout particulièrement au démarrage de l'engin.

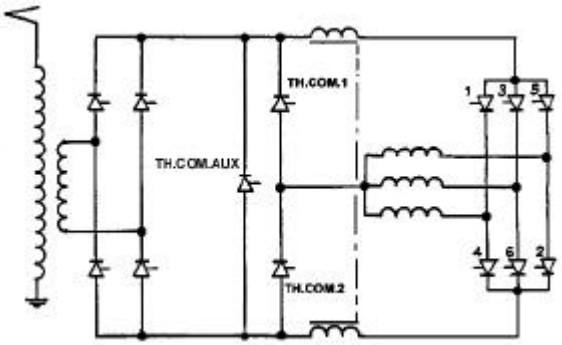
On devra alors admettre la nécessité de quelques artifices annexes pour interrompre fugitivement le courant I débité par la source afin d'éteindre le thyristor alors en conduction, quel qu'il soit, avant de procéder à l'amorçage de l'un de ses voisins. Il s'agira donc d'un mode de commutation dite "assistée". Mais toute interruption, même brève, du courant statorique se traduit par un affaiblissement brusque du couple (on dit aussi que le couple est "pulsatoire") ; nous verrons les dispositions permettant de compenser ce phénomène car, se produisant à très basse fréquence, il a de grands inconvénients.

Il en découle que pour assurer l'autopilotage, la logique de commande devra, en commutation assistée, s'appuyer sur des capteurs de position angulaire du rotor, tandis qu'en commutation naturelle, les mesures des tensions interphases prendront le relais.

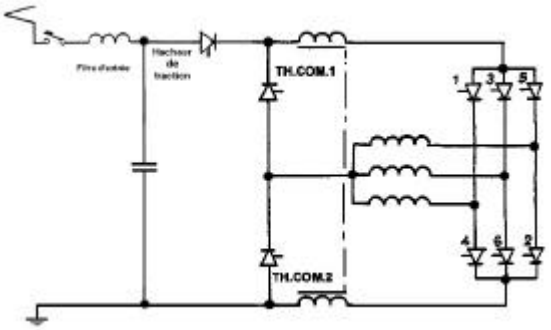
- la commutation dite "assistée" :

Compte tenu de la faiblesse relative de la tension de la source à ces régimes de basses vitesses, la commutation assistée ne nécessitera que des circuits d'assez faible puissance. Les schémas possibles des circuits de commutation assistée sont très variés et ils peuvent se grouper selon les 2 principes représentés aux schémas des *figures 162 et 163*. Certains ont été expérimentés sur des engins prototypes, mais, comme nous le constaterons par la suite, seule une version simplifiée avec condensateur et sans selfs couplées a été appliquées sur des matériels de série (BB 26000, TGV Atlantique et suivants) :

- La *figure 162 a)* représente un schéma apportant une assistance à la commutation par la source alternative monophasée d'alimentation par l'intermédiaire d'un redresseur totalement contrôlé qui fonctionne, à ces instants, en récupération ; il sera commandé en pont mixte, meilleur vis à vis du facteur de puissance, lorsque l'on ne fonctionnera plus en commutation assistée.



a) *Schéma utilisable uniquement en traction monophasée pure puisque faisant appel à un redresseur totalement contrôlé qui permet une polarisation négative du thyristor onduleur en cours de blocage.*



b) *Version utilisable derrière un hacheur, donc possible en courant continu ou redressé par un pont mixte, mais il n'y a plus d'assistance au blocage du thyristor onduleur par une tension de polarisation négative. On profite du blocage du hacheur pour pouvoir bloquer le thyristor onduleur voulu par amorçage du TH.COM adéquat (TH.COM.1, pour bloquer un thyristor onduleur inférieur, ou TH.COM.2 pour un supérieur).*

Figure 162 *Schémas des circuits de commutation assistée utilisant essentiellement les propriétés d'une self de lissage à 2 enroulements couplés. (origine SNCF - DETE)*

On parviendra à interrompre le courant qui circule dans le thyristor de l'onduleur, devant être éteint, en le transférant, par l'amorçage, à un instant où le redresseur est en phase de "récupération", de l'un des 2 thyristors auxiliaires TH.COM, dans celle des 2 autres phases aussi alimentée. On utilise, à cet effet, la propriété d'une self à 2 enroulements couplés (il s'agit, en fait, de la self de lissage qui a été partagée en 2 enroulements insérés dans le + de la source, pour l'un, et dans le – pour l'autre).

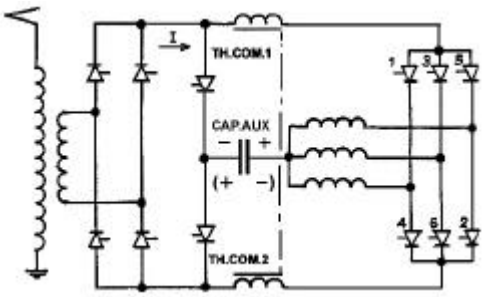
L'enroulement concerné par la mise en conduction du TH.COM se reboucle sur la phase et son thyristor onduleur associé qui doivent rester en l'état, c'est dire que cet enroulement est presque mis en court-circuit (nous sommes bien avec des tensions "machine" très basses) ; grâce au couplage, cette très basse tension est imposée à l'autre enroulement lequel ne cherche plus à s'opposer à la disparition du courant qui le traverse et permet, ainsi, le blocage du thyristor onduleur qui doit être éteint.

La disparition du courant dans l'un des enroulements couplés provoque le doublement du courant dans l'autre (on peut aussi considérer qu'il y a

conservation des ampères-tours globaux), donc dans la phase qui reste alimentée. Cela compense la coupure de l'alimentation de l'autre phase vis à vis du couple moteur, tel qu' évoqué plus haut.
Le thyristor onduleur à bloquer est alors polarisé en inverse (via les thyristors du redresseur encore en conduction) par l'alternance négative du transformateur ; dès son extinction terminée, le thyristor onduleur dont l'amorçage est nécessaire pourra alors l'être sans inconvénient, il prendra sa conduction effective dès la prochaine commande d'un thyristor redresseur.
Il va sans dire que ce type de schéma peut être utilisé sur les engins monophasés purs avec beaucoup de facilité s'ils sont munis d'au moins un pont tout thyristors pour assurer cette assistance à la commutation.

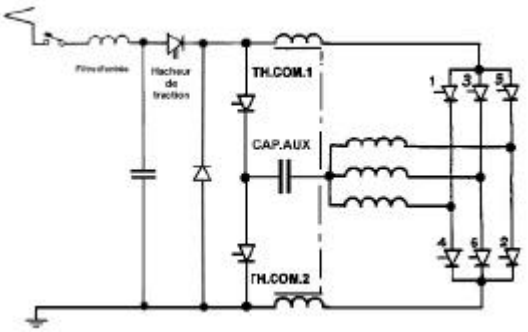
A la *figure 162 b)* est représentée une variante utilisable sur les engins devant circuler sous caténaire 1500 V=. La diode de roue libre du hacheur est constituée par les 2 thyristors TH.COM qui sont commandés simultanément et en permanence pour le besoin. On profitera d'une extinction forcée du hacheur et à la fin de la conduction des TH.COM dans leur rôle de roue libre, pour commander une commutation sur l'onduleur en amorçant un seul de ces 2 TH.COM.
Le même phénomène que celui décrit précédemment se produit alors, mais il n'y a plus d'assistance à la commutation par une source de tension quelconque venant polariser négativement le thyristor devant être bloqué ; pour cette raison, on devra admettre les selfs propres des phases du moteur de valeur très faible et le couplage entre les 2 parties de la self de lissage proche de la perfection car c'est sur ce couplage que repose le processus.

- Dans l'autre type de schéma, représenté à la *figure 163*, le circuit fonctionne aussi bien en monophasé pur qu'en courant continu, derrière un pont mixte à la *figure 163 a)* ou un hacheur, à la *figure 163 b)*. Il est donc plus universel que le précédent, d'où son emploi ultérieur sur les matériels bicourant de série.
On utilise aussi 2 thyristors de commutation TH.COM mais ils sont inversés par rapport à ceux de la *figure 162*. Un condensateur CAP.AUX (pré-chargé initialement, en cas de besoin et avec les polarités adéquates, par un dispositif annexe de faible puissance, non représenté) assure, dès l'amorçage du thyristor TH.COM convenable, la dérivation du courant I absorbé par l'onduleur à la source, tout en polarisant en inverse le thyristor en cours d'extinction ; il se décharge à courant constant (I) puis se recharge en inverse, les polarités qu'il prend alors le rendant apte, par commande de l'autre TH.COM. à assurer la commutation suivante qui sera celle de l'un des thyristors du bras d'onduleur opposé.



a) *Assistance à la commutation utilisant un condensateur auxiliaire CAP.AUX ayant été pré-chargé si nécessaire.*

Les polarités représentées en haut du condensateur, permettent le blocage de l'un des 3 thyristors onduleurs supérieurs par l'amorçage de TH.COM.1. Suite à la décharge du condensateur dans le circuit [phase du moteur, thyristor onduleur inférieur et enroulement inférieur de la self couplée], il se recharge en inverse et prend alors les polarités inférieures (entre parenthèses) lui donnant la possibilité de bloquer l'un des thyristors onduleurs inférieurs par la commande de TH.COM.2 et ainsi de suite...



b) *Version du dispositif de commutation ci-dessus mais fonctionnant, de la même façon, derrière un hacheur ; il n'y a plus de polarisation négative du thyristor onduleur en cours de blocage.*

Figure 163 *Schémas du dispositif de commutation assistée utilisant un condensateur auxiliaire CAP.AUX.*

Fonctionnant sous courant continu, sans exigence particulière, ils sont plus universels que ceux de la figure 162. (origine SNCF - DETE)

Le processus de commutation ci-dessus sera déclenché pendant les phases de conduction de la roue libre du hacheur principal (en alimentation continue) ou des diodes s'il s'agit d'un pont mixte, en cas d'adoption de ce schéma en monophasé. L'utilisation de selfs couplées permettra, comme au type de schémas précédent et avec le même avantage vis à vis de la continuité du couple moteur, le doublement du courant dans la phase encore alimentée alors qu'il disparaîtra dans celle où se trouve le thyristor en cours d'extinction.
Nous verrons cependant, par la suite, que ce type de circuit d'assistance à la commutation par condensateur auxiliaire, n'utilisant plus essentiellement les propriétés des selfs couplées, permet de ne pas utiliser ce type de self, difficile et donc coûteux à réaliser ; nous verrons aussi que la continuité du couple sera toutefois assurée, mais de manière plus globale.

- passage du mode de commutation "assistée au mode de commutation "naturelle" :

Le démarrage se fait obligatoirement en mode assisté. Dès que le moteur tourne à une vitesse suffisante pour que les tensions développées par la machine permettent la commutation naturelle. Ce mode de fonctionnement est privilégié car, en monophasé 50 Hz et seulement dans le cas du dispositif représenté par le schéma de la *figure 162 b)*, les commutations assistées n'ont pas lieu à chaque alternance puisque, aux très basses vitesses de démarrage, on est bin d'atteindre la fréquence de 100 Hz et le courant appelé à la caténaire n'est donc pas rigoureusement périodique car, certaines arches de courant étant amputées pendant la conduction des TH.COM, il contient une composante à fréquence variable nuisible aux circuits de signalisation (comme déjà évoqué antérieurement).

Pour y remédier on est dans l'obligation de provoquer les "amputations" manquantes au moyen d'un thyristor auxiliaire TH.COM.AUX qui viendra, en le commandant avec le même angle de retard qu'un TH.COM et à chaque alternance où l'un de ceux-ci n'est pas commandé, court-circuiter, telle une diode de roue libre, la sortie du redresseur et ce, jusqu'à l'amorçage du thyristor redresseur suivant.

Avec les dispositifs de commutation assistée utilisés derrière un hacheur, tel celui de la *figure 162 b)*, ou utilisant un condensateur auxiliaire, que ce soit derrière un hacheur ou un pont mixte (*figures 163*), ces inconvénients n'apparaissent pas car l'état bloqué du hacheur, ou la conduction des diodes en roue libre du pont mixte, évitent aux commutations d'apparaître sur le courant absorbé à la caténaire.

La *figure 164* montre l'enchaînement des modes de commutation et des diverses possibilités de réglage du courant , donc du couple, sur une locomotive prototype (BB 10004) durant la mise en vitesse. On y remarquera l'étroitesse de la plage de vitesse où l'on utilise la commutation assistée (on peut passer en mode de commutation naturelle dès 4 km / h).

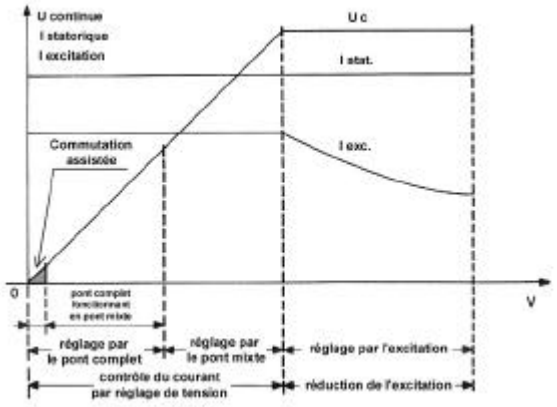


Figure 164 *Diagramme représentant la succession des modes de commutation des onduleurs et les réglages du courant statorique par les redresseur et l'excitation, au cours de la mise en vitesse de la locomotive monophasée prototype BB 10004.*

(extrait et adapté de la Revue J.S. n° 34 de décembre 1982)

Les moteurs synchrones à simple ou double étoile :

Toutes les descriptions et figures ci-dessus ont eu pour objet un moteur synchrone bipolaire à bobinage statorique en simple étoile.

Nous avons vu qu'en mode de commutation assistée, les permutations entre les thyristors de l'onduleur de courant, nécessitant des interruptions du courant dans l'une des 3 phases du moteur, se traduisent par de brèves chutes du couple. Un moyen de les compenser est de doubler le courant dans la phase qui reste alimentée en utilisant les propriétés des selfs couplées, comme vu plus haut.

Pour les moteurs de forte puissance, tels ceux de 2800 kW, à 8 pôles, des bogies monomoteurs des locomotives, qui ont un assez grand diamètre, on utilise un bobinage statorique à 2 étoiles imbriquées et décalées de 30°. Chaque étoile est alimentée par son propre onduleur tel que représenté au schéma de la *figure 165*. Les 2 onduleurs sont connectés en série sur la source de courant et leurs commutations sont, à l'image des bobinages, aussi imbriquées ; ce qui permet de maintenir l'intégralité du couple généré par une étoile alors que l'onduleur qui alimente l'autre est en cours de commutation.

On peut ainsi ne plus utiliser de selfs couplées comme cela a été expérimenté sur les locomotives qui serons décrites par la suite (BB 10004, prototype monophasé à selfs couplées, puis BB 20011 et 20012, bi-courant de présérie des BB 26000, qui n'en n'avaient plus).

Dans le cas de moteurs plus modestes, tels ceux de 800 kW des TGV Atlantiques par exemple, on reste au bobinage en simple étoile mais l'utilisation de 2 moteurs par bogie permet de recréer un schéma ressemblant à celui représenté à la *figure 165*, avec les 2 onduleurs connectés en série sur la source de courant continu. Cependant, chaque onduleur possède son propre circuit de commutation assistée par condensateur mais l'excitation des 2 moteurs est commune de par la mise en série des bobinages d'excitation.

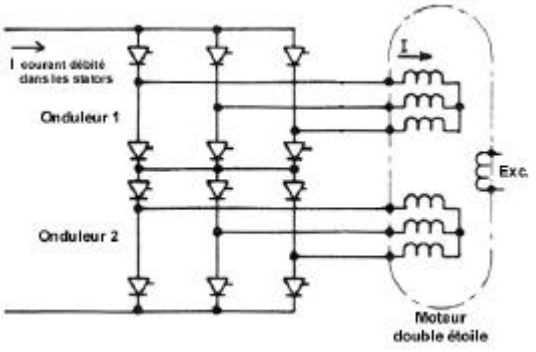


Figure 165 *Schéma de principe d'un système à 2 onduleurs et moteur à double étoile ; le dispositif de commutation assistée, connecté au point de jonction des 2 onduleurs, n'est pas représenté. Dans le cas d'un schéma à 2 moteurs à simple étoile, il y aura un circuit de commutation assistée par onduleur et il sera connecté au point central de chaque étoile.*

Les expérimentations à moteurs synchrones autopilotés à la SNCF

Nous avons vu antérieurement (n° 25 de ***La Revue 3EI*** - pages 69 à 71) l'utilisation en 1963 des excitrons sur une centaine de locomotives BB 16500 où, montés en redresseurs "push-pull" fonctionnant en onduleurs monophasés, ils permettaient le freinage par récupération.

L'idée d'utiliser ce type de redresseur à vapeur de mercure pour alimenter en triphasé un moteur synchrone, avait bien reçu un début d'expérimentation en 1930 par BBC en Suisse, comme l'évoquent M. Y. Machefert-Tassin et A. Gache dans la Revue Générale des Chemins de Fer d'octobre 1985 (déjà citée), mais c'est seulement en 1961 que la SNCF l'a reprise.

1961 : la Z 9053

Sous le titre "Solution BATTELLE", la SNCF a expérimenté, à son laboratoire électrotechnique de Vitry / Seine entre 1962 et 1964, un équipement [onduleur - moteur synchrone] étudié par L'Institut BATELLE de Genève (qui avait aussi réalisé les circuits de commande) ; la société JEUMONT avait été chargée de la fourniture du gros matériel (moteurs, redresseurs et onduleurs à excitrons, selfs de lissage, transformateurs divers, etc ...).

Cet équipement était embarqué à bord de l'automotrice à 25 kV-50 Hz, Z 9053 (déjà évoquée en début d'article) d'origine allemande et qui avait été équipée par la SNCF de 2 moteurs directs à 50 Hz pour les essais de Savoie. Les travaux de transformations ont été réalisés par les ateliers SNCF de La Folie.

Le transformateur principal et son graduateur basse tension avaient été conservés mais il a fallu y ajouter un transformateur élévateur, puisque les moteurs synchrones de "250 ch" (c'était l'indication des documents de l'époque...) étaient alimentés sous 1800 V (entre phases) avec une intensité de 74 A.

La *figure 166*, montre le schéma de principe de cette automotrice. Les 24 excitrons mono-anodiques étaient tous du type ASMG 1,8-0-7 à refroidissement à air.

D'après les notes techniques (d'origine SNCF - DETE, de 1961), on a pu constater que cet engin fonctionnait, ou plutôt devait "bien" fonctionner, à peu près selon les principes généraux exposés plus haut ; tout au moins en ce qui concerne le réglage des courants statoriques, par variation de la tension continue d'alimentation de l'onduleur (par le graduateur BT du transformateur et aussi par réglage d'angle sur les excitrons des redresseurs, puis par réduction de l'excitation (les moteurs avaient une vitesse nominale de 1000 t/min et l'on pouvait passer à 2000 t / min par réduction de l'excitation). La fréquence de l'onduleur était limitée à 100 Hz par les temps de dés-ionisation des tubes à vapeur de mercure.

On avait, bien sûr, déjà éprouvé la nécessité de commuter l'onduleur selon les 2 modes décrits plus haut. Si les excitrons étaient à l'aise en commutation "naturelle" puisque les tensions machine y pourvoyaient et "pilotaient" les amorçages désirés (ils se faisaient par commande positive des grilles).

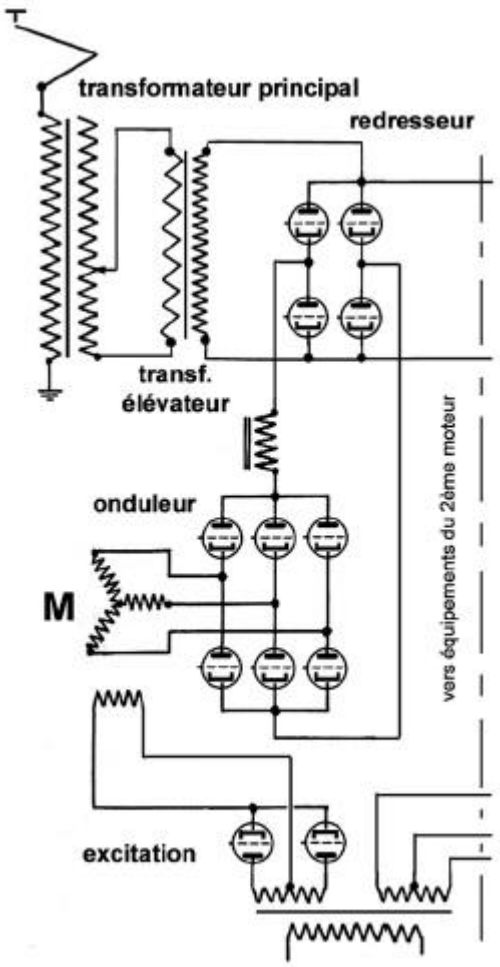


Figure 166 *Schéma de l'automotrice monophasée expérimentale Z 9053 de 370 kW (500 ch ...) à 2 moteurs synchrones. Les redresseurs et onduleurs étaient tous à excitrons refroidis à air ; seuls les convertisseurs de l'un des 2 moteurs sont représentés.*

(schéma extrait et adapté d'un document SNCF -DETE)

Il n'en était malheureusement pas de même aux démarrages (et tant que la vitesse était < à 5% de la Vmax.), où il fallait bien passer en commutation assistée.

On ne disposait pas, alors, de la panoplie des dispositifs de commutation assistée à thyristors, décrits plus haut et il fallait se résoudre à pratiquer, semble t-il, l'interruption de la tension continue d'alimentation de l'onduleur avant toute permutation d'excitron. Il est indiqué dans l'une des notes citées plus haut (et l'un des schémas synoptique de la commande semble le confirmer) : "Une commande de grille appropriée prévue sur 2 tubes de chaque pont redresseur permettra de couper la tension redressée pendant un temps très court en vue de provoquer l'extinction de l'onduleur. On provoquera ensuite la commutation des tubes de celui-ci".

Les excitrons n'avaient pas tellement la réputation de permettre la coupure par commande négative de leur grille (à l'instar des GTO, mais ils sont arrivés quelques dizaines d'années après) ; le potentiel négatif de grille était toutefois utilisé pour maintenir le tube au blocage mais, à priori, n'avait pas pour vocation de bloquer "dynamiquement" le tube.

Le principe de l'annulation fugitive du courant d'entrée de l'onduleur par le redresseur est cependant bien utilisé dans l'industrie ; le redresseur fonctionne alors en récupération sur une alternance négative de la tension réseau (voir à ce sujet l'article de M. R. Chauprade dans la Revue JEUMONT-SCHNEIDER n° 24 de septembre 1977, déjà citée). Mais l'on a alors affaire à un redresseur triphasé à thyristors, ce qui n'était pas le cas sur la Z 9053.

Les notes SNCF de 1961, probablement rédigées avant les essais en vraie grandeur, ne font pas état de difficultés, mais le blocage par la grille de certains des excitrons de la Z 9053 a probablement été la principale cause des déboires rencontrés, parait-il, dès les essais de Vitry ; le manque de fiabilité des circuits de commande y ayant aussi sûrement contribué.

En fait, il semble bien (selon des témoignages verbaux) que la Z 9053 à moteurs synchrones n'ait jamais vraiment roulé, les essais de laboratoire ont dû toutefois se prolonger jusqu'en 1964.

C'est l'année où la BB 20006 a été équipée des premiers thyristors utilisés pour le freinage par récupération (voir ***La Revue 3EI*** n° 29, page 68). On connaît la suite ... Les thyristors ont fait merveille, tant en monophasé qu'en commutation forcée sous 1500 V et le moteur à collecteur s'est amélioré jusqu'à atteindre ses limites. D'où l'éclipse du moteur sans collecteur qui a duré plus d'une dizaine d'années.

1979 : la BB 10004 (ex BB 15055)

La société JEUMONT-SCHNEIDER travaillait alors depuis une quinzaine d'années sur les applications industrielles des moteurs sans collecteur alimentés par des convertisseurs à thyristors. Les réalisations à moteurs asynchrones étaient plutôt réservées aux petites puissances (nous verrons ainsi l'expérimentation de 600 kVA, déjà évoquée, sur un engin "composite" de la SNCF) tandis que le moteur synchrone autopiloté était utilisé pour des puissances supérieures à 10 MW derrière des onduleurs de courant à schéma très simple (tel qu' amplement constaté plus haut).

C'est donc assez naturellement que la société précitée a proposé à la SNCF l'adaptation d'une réalisation industrielle à moteur synchrone sur une locomotive de forte puissance. Parmi les nombreux avantages de ce type de moteur, figure la facilité de l'utiliser en alternateur pour le freinage électrique avec toute la sécurité exigée en ce domaine pour la traction ferroviaire ; cette faculté, pour ainsi dire naturelle, ne se rencontre pas en asynchrone, où, comme nous le verrons, tout reposera sur la présence préalable d'une tension continue en amont de l'onduleur.

Afin de concrétiser ce projet, dont l'étude puis les essais à poste fixe ont commencé en 1979, la SNCF a retiré du service, en 1981, la BB 15055 pour la faire transformer en engin expérimental, purement monophasé, à 2 moteurs synchrones par ses ateliers d'Hellemmes. Elle a, à cette occasion, été re-numérotée BB 10004 (la *figure 167* montre une vue de cette locomotive).

Figure 167 *Vue de la locomotive expérimentale BB 10004 de 5600 kW à 2 moteurs synchrones autopilotés.*

(cliché Transphot - Jean-Paul DEMOY)

L'usine JEUMONT NORD a fourni les 2 moteurs synchrones de 3200 kW, à ventilation forcée, pouvant se monter avec le minimum de travaux, en lieu et place des TAB 674 à collecteur de 2300 kW d'origine ; les rapports des réducteurs ont, toutefois, été modifiés pour s'adapter à la vitesse de rotation des nouveaux moteurs (1980 t / min au lieu de 1155 t / min, à 160 km / h).

Leurs caractéristiques principales sont les suivantes (elles varient légèrement selon les sources) :
- stator double étoile (décalées de 30°), I max. : 2100 A
- rotor à 8 pôles saillants et cage d'amortissement, I max. d'excitation : 510 A
- vitesse max. 1980 t / min (pour 131 Hz)
- masse : 6,9 t.

La vitesse de rotation de ces moteurs, assez élevée (mais les moteurs synchrones industriels vont bien au delà), correspond à une vitesse périphérique d'environ 106 m/s, ce qui nécessite une construction mécaniquement robuste (son rotor a été déjà représenté à la *figure 158*). Un disque cranté, tournant devant des détecteurs de proximité, constitue le capteur de position angulaire du rotor ; il est monté en bout d'arbre opposé au pignon.

Il a fallu aussi modifier le transformateur d'origine de la BB 15055 en remplaçant les selfs de lissage classiques, logées dans la même cuve que le transformateur, par des selfs de 8 mH fractionnées en 2 enroulement couplés de 4 mH chacun et ajouter un équipement de ventilation des moteurs de traction

Quant à l'usine JEUMONT-SCHNEIDER de Champagne / Seine, elle a fourni le bloc central équipé de nouveaux redresseurs, ponts mixtes et ponts complets et des onduleurs de courant, ainsi que les divers circuits auxiliaires annexes (excitation et commutation assistée en particulier).

Schéma de principe de la locomotive :

Le schéma, assez détaillé, des circuits de puissance est représenté à la *figure 168*, ci-après ; on y remarque l'indépendance des équipements propres à chaque bogie, seuls les transformateurs, principal et auxiliaire, sont communs.

En ce qui concerne les ponts redresseurs, ils ont le même schéma que ceux de la BB 15055 (les thyristors de shuntage en moins, bien entendu) mais ont été reconstruits afin d'utiliser des thyristors et diodes avec pastilles de 50 mm, ils sont ainsi moins nombreux

(chaque cellule est représentée au schéma) ; les onduleurs utilisent aussi ce type de thyristors tandis que les thyristors de commutation (COM et COM.AUX) et ceux du redresseur d'excitation, sont en pastilles de 33 mm.

L'excitation de chaque moteur est assurée par un pont complet commandé normalement en pont mixte mais qui, en cas de défaut, peut fonctionner immédiatement en pont complet afin de désexciter rapidement le moteur par démagnétisation des inducteurs sous la contre-tension apportée par le fonctionnement en onduleur du pont.

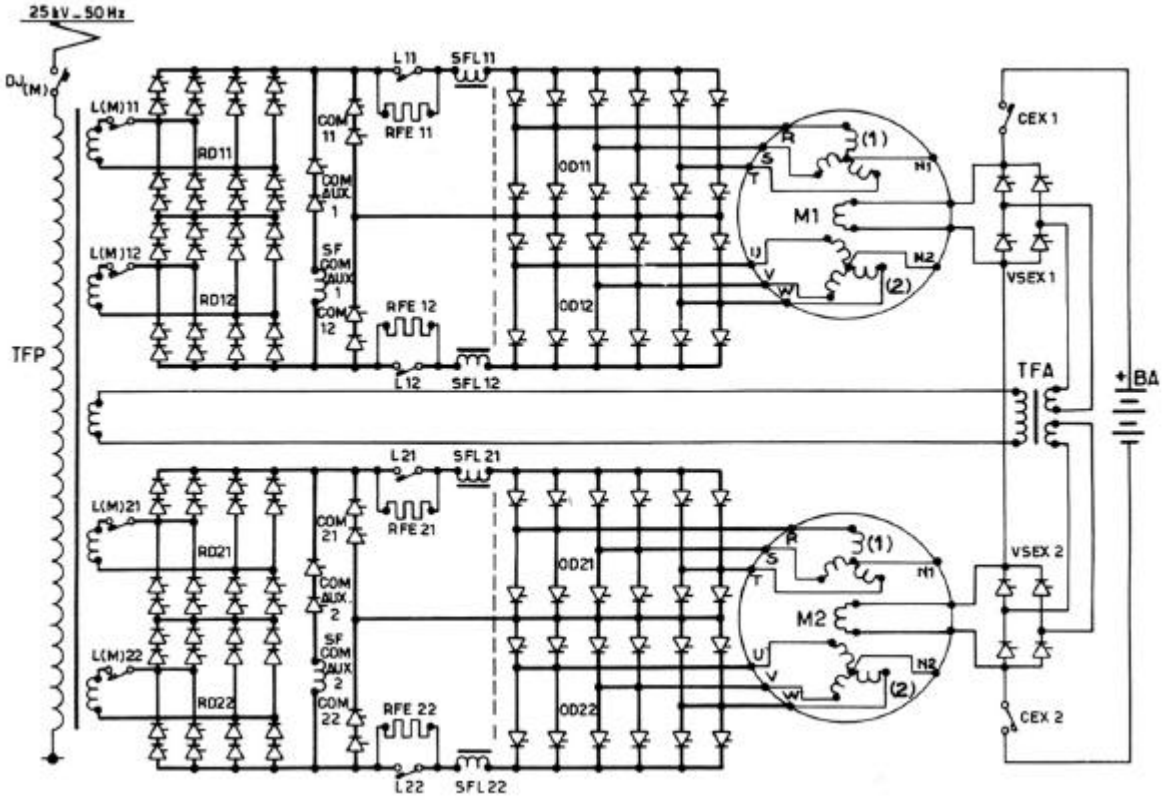


Figure 168 *Schéma de principe général de la locomotive BB 10004. En configuration traction, les contacteurs L 11, 12, 21 et 22, sont fermés afin de court-circuiter les résistances de freinage RFE.*

(schéma extrait de la Revue JEUMONT-SCHNEIDER n° 34 de décembre 1982)

Fonctionnement en traction

On retrouve le fonctionnement des onduleurs tel que décrit aux pages précédentes. Cela s'applique à chaque étoile prise indépendamment l'une de l'autre mais comme elles appartiennent au même moteur, les commutations des onduleurs respectifs seront obligatoirement décalées dans le temps du même angle que celui, physique celui-là, de décalage des bobinages (soit 30°). Ne pouvant y avoir simultanéité des commutations des onduleurs propres à chaque étoile, la self couplée doublera, lors des commutations assistées bien sûr, le courant dans une étoile tandis qu'il disparaîtra dans l'autre ; cela assurera donc la continuité du couple.

La commutation assistée (commandée par des capteurs de position du rotor) utilise des circuits tels que décrits au schéma de la *figure 162 a)*, il est donc inutile d'y revenir (de même pour le fonctionnement des thyristors COM.AUX.

L'enchaînement des réglages des courants statoriques par les redresseurs puis par l'excitation sont ceux déjà explicités et montrés par la *figure 164*.

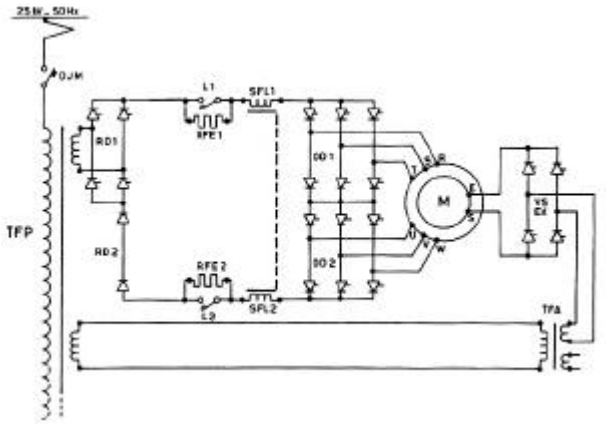
Fonctionnement en freinage

Comme les BB 15000 (voir ***La Revue 3EI*** n° 30, pages 68 à 70) et grâce à la présence de ponts complets travaillant en onduleurs monophasés, la BB 10004 pourra fonctionner en freinage par récupération mais aussi, sans le concours des redresseurs, en freinage rhéostatique. Dans les 2 cas, le moteur synchrone fonctionnera en génératrice synchrone (en alternateur pour ainsi dire). Les schémas simplifiés, correspondant aux 2 configurations, apparaissent aux *figures 169 a) et 169 b)*.

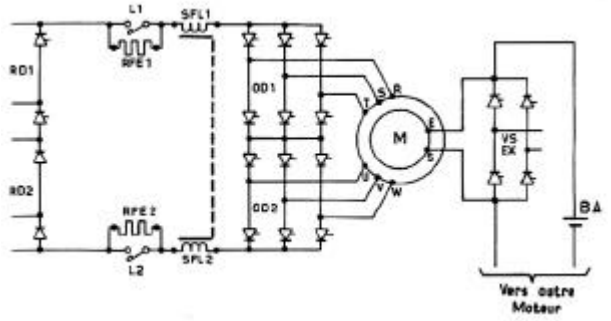
- Le freinage par récupération, voir la *figure 169 a)* :

Il n'y a aucune transformation du schéma comme avec un moteur à collecteur à excitation série où l'on doit passer en excitation séparée afin d'inverser les polarités du moteur (devenu génératrice) et avoir aussi un second paramètre de réglage du courant de freinage.

Sur une locomotive à moteurs synchrones, telle la BB 10004, si l'on imagine un freinage à courant statorique constant à partir de la pleine vitesse jusqu'à l'arrêt, la succession des modes de fonctionnement suivants va se produire :



a) *Configuration de l'un des 2 moteurs en freinage par récupération. Seul le pont complet RD 1 est actif, les courants statoriques de freinage, redressés par l'onduleur triphasé, circulent via les diodes du pont mixte RD 2 ; l'excitation est alimentée par le pont complet auxiliaire VS.EX. Les contacteurs L 1 et L 2 sont ouverts.*



b) *Le même moteur que ci-dessus mais en configuration de freinage rhéostatique. Le redresseur RD 1 n'est plus actif, les thyristors d'une seule file sont amorcés en permanence afin de permettre le "rebouclage" du courant dans les résistances RFE, seules à absorber l'énergie de freinage. L'excitation est assurée par la batterie et seul l'onduleur triphasé, fonctionnant en redresseur, permet le réglage du courant de freinage.*

Figure 169 *Schémas simplifiés des 2 configurations de freinage électrique.*

(schémas extraits de la Revue JEUMONT-SCHNEIDER n° 34 de décembre 1982)

- Les redresseurs en ponts complets sont commandés en onduleurs monophasés avec contre-tension maximale (angle de retard à l'amorçage des thyristors proche de 180°), le courant circule alors via les diodes des ponts mixtes ; les onduleurs triphasés sont commandés en redresseurs contrôlés des tensions statoriques du moteur dont l'excitation est réduite de façon à limiter les contraintes en tension sur les thyristors. La baisse des tensions du moteur, donc du courant de freinage accompagnant la réduction de la vitesse, sont compensées en augmentant l'excitation.
- A l'excitation maximale, l'influence sur le débit de la baisse des tensions statoriques qui se poursuit est compensée par réduction du retard à l'amorçage des thyristors onduleurs triphasés jusqu'à leur pleine ouverture.
- Tout étant au maximum côté moteurs et onduleurs, on agit alors en réduisant le retard à l'amorçage des thyristors des ponts redresseurs, jusqu'à "refonctionner" en redresseurs pour compenser les chutes de tensions dans les résistances de freinage RFE (qui, en freinage par récupération, sont en circuit en tant que résistances de limitation) et cela jusqu'à l'arrêt.

- Le freinage rhéostatique, voir la *figure 169 b)* :

Ce mode de freinage, dit de sécurité, est mis en œuvre en cas d'absence de la tension caténaire ou d'un arrêt d'urgence. Les seules différences par rapport au mode de freinage précédent consistent :

- à commander en diodes une seule des files de thyristors des ponts complets (RD 11 et RD 21) de façon à permettre, via les diodes des ponts mixtes comme précédemment, le rebouclage sur les 2 résistances RFE, ainsi mises en série, des courants statoriques redressés par les onduleurs triphasés.
- à assurer l'excitation au moyen de la batterie BA par fermeture des contacteurs CEX1 et CEX 2 ; les inducteurs des 2 moteurs sont alors connectés en série.

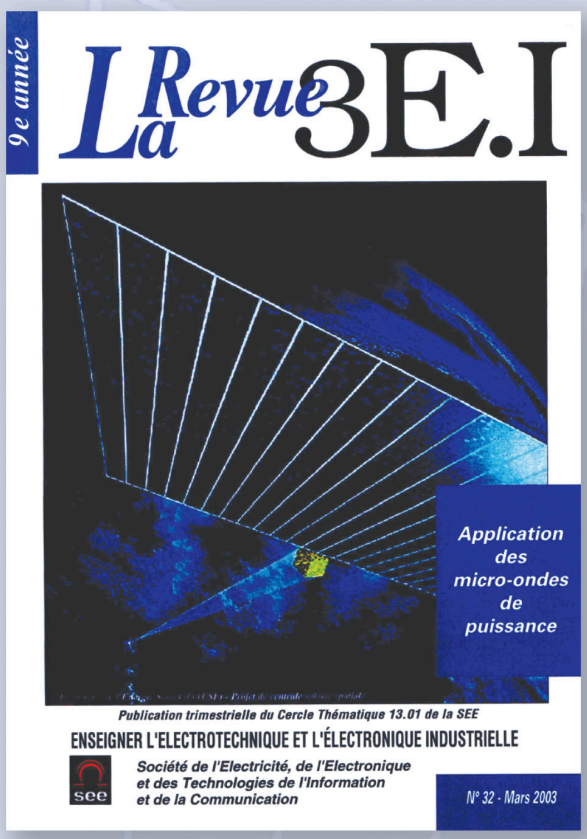
A l'issue de l'installation de ses équipements, la BB 10004, telle que décrite ci-dessus, a commencé ses essais en ligne en 1982. Ils se sont poursuivis jusqu'en 1984 en se terminant par l'expérimentation de la commutation assistée, par condensateur et sans selfs couplées, destinée aux futures locomotives bicourant, puis par l'essai selon un schéma à 2 moteurs simple étoile, alimentés chacun par un onduleur de courant lesquels sont connectés en série sur la source de courant continu, tel qu'envisagé pour les futurs TGV Atlantiques (comme déjà évoqué plus haut). Les futures locomotives bicourant seront le BB 26000, dont la production sera préparée par 2 engins de présérie, les BB 20011 et 20012. Ces matériels, comme les TGV Atlantiques, seront vus au prochain article.

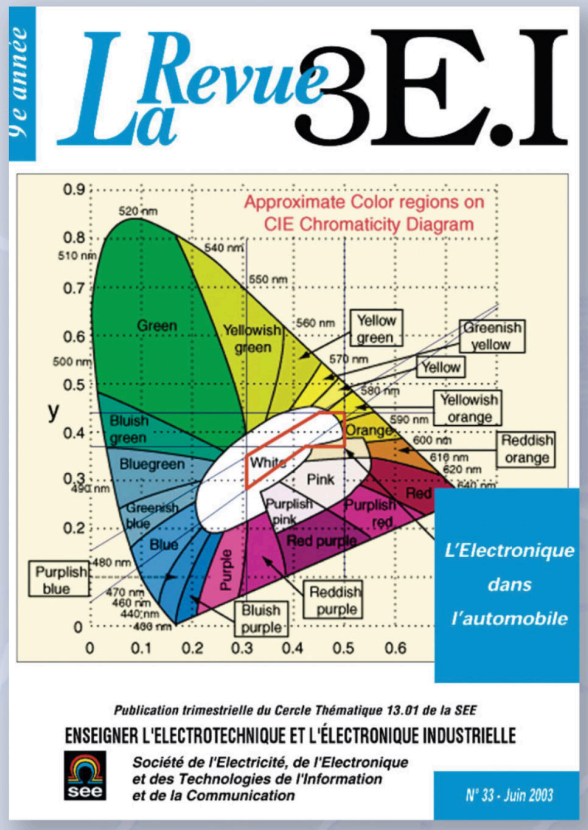
Nous verrons aussi, mais dans la catégorie de la traction par moteurs asynchrones cette fois, que la BB 10004 avait une "concurrente" en la BB 10003.

La traction à moteurs sans collecteur avait recommencé à faire parler d'elle et les résultats furent, cette fois, au rendez-vous.

Bibliographie :

- Documents internes SNCF - Direction du Matériel (DETE)
- Extrait de la Revue Générale des Chemins de Fer d'octobre 1985, (article "La traction électrique par moteurs sans collecteur" de Y. Machefert-Tassin et A. Gache)
- Revues JEUMONT-SCHNEIDER n° 24 de septembre 1977 et n° 34 de décembre 1982
- Revue "La Vie du Rail" n° 1943 de mai 1984 (article "Les moteurs triphasés, plus que jamais d'actualité" de Ph. Hérissé)





UN SUPPORT

SUPPORT DE COURS

Outil didactique pour les filières préparant à l'enseignement technique

SUPPORT DOCUMENTAIRE

Trame indispensable à la formation continue des "Hommes de terrain".

Les collections des années antérieures sont disponibles sur le Web : http://www.lesite3ei.com

DES DOSSIERS

- **DÉCEMBRE 2003 (N° 35)**
  L'outil informatique dans l'enseignement
- **MARS 2004 (N° 36)**
  L'Energie (dossier 1)
- **JUIN 2004 (N° 37)**
  L'Énergie (dossier 2)
- **SEPTEMBRE 2004 (N° 38)**
  Applications pédagogiques et réalités industrielles

ABONNEMENT 2003/2004

À retourner à la SEE - La Revue 3 E.I - 17 rue Hamelin 75783 Paris cedex 16

❒ Oui, je souhaite m'abonner à La Revue 3 E.I - pour 4 numéros (n° 35 à 38 inclus).

Tarif d'abonnement	1 an (tarif France) (4 numéros)	1 an (tarif à l'étranger) (4 numéros)
Tarif membres SEE Plein tarif (non membres SEE)	❒ 30 € ❒ 32 €	❒ 40 € ❒ 42 €
* Tarif collectif membres SEE Plein tarif collectif (non membres SEE) * Tarif collectif : *Bibliothèques, CDI Laboratoires, Entreprises*	❒ 45 € ❒ 48 €	❒ 60 € ❒ 63 €

PRIX DE VENTE AU NUMÉRO (TARIF FRANCE) :
Liste complète des numéros disponibles sur le site :
www.lesite3EI.com
ou sur demande au service Adhésion :
(Tél. : 01 56 90 37 12 - Fax : 01 56 90 37 19)

- 1 ex 11 €
- 2 ex 22 €
- 3 ex 27 €
- 4 ex 36 €

Nom et prénom (ou raison sociale) : .....
Service/département : ..... Activité (facultatif : .....
Adresse : ..... Code postal : .....
Ville : ..... Pays : .....

Je règle par : ❒ chèque à l'ordre de la SEE/Revue 3 E.I. ❒ carte bancaire (visa, Eurocard, American Express)
N° carte : ⌊⌊⌊⌊⌋⌊⌊⌊⌊⌋⌊⌊⌊⌊⌋⌊⌊⌊⌊⌋ Date de validité : ⌊⌊⌋ ⌊⌊⌋ ⌊⌊⌋
Signature et cachet : Date : ⌊⌊⌋ ⌊⌊⌋ ⌊⌊⌋

Conformément à la Loi Informatique et Libertés du 06/01/1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux informations qui vous concernent. Contacter le Service Gestion des Adhésions de la SEE (adhesion@see.asso.fr ou Tél. : 01 56 90 37 12).

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 futurs

- ☞ *Mars 2004 - La problématique de l'énergie : la place de l'électricité*
- ☞ *Juin 2004 - Les grands outils de production de l'énergie électrique*
- ☞ *Septembre 2004 - Pratiques pédagogiques et réalités industrielles*
- ☞ *Décembre 2004 - Production décentralisée de l'électricité : micro-centrales, éoliennes, co-générateurs ...*

Automatique

Nouveauté

La création de produits nouveaux nécessite la connaissance des phénomènes physiques mis en jeu. A partir de modèles dont la conception est délicate, des simulations simples sont indispensables avant les premières réalisations.
Cet ouvrage explique la modélisation des systèmes dynamiques de différentes technologies : mécanique, hydraulique, électrique, thermique. La modélisation proposée repose sur l'approche Bond Graph, ou graphe de liaison, qui traduit la conservation de puissance.
Cette approche permet de concevoir le modèle comme l'encapsulation de plusieurs modèles élémentaires échangeant de l'énergie. L'efficacité des logiciels et la volonté de créer des bibliothèques de modèles contribuent à sa diffusion rapide dans le milieu industriel.

Un ouvrage pédagogique qui allie théorie et exemples industriels
(avec conception détaillée de modèles et simulations effectuées)

Michel Vergé, *professeur des universités, membre du Laboratoire de mécanique des systèmes et procédés de l'École nationale supérieure des arts et métiers (Paris).*

Daniel Jaume, *professeur des universités, membre du Laboratoire d'automatique du Conservatoire national des arts et métiers (Paris)*

Broché, 400 p. **59 €**

Editions TECHNIP
27, rue Ginoux, 75737 Paris Cedex 15 • Tél. 01 45 78 33 80
Fax 01 45 75 37 11 • E-mail : info@editionstechnip.com
www.editionstechnip.com