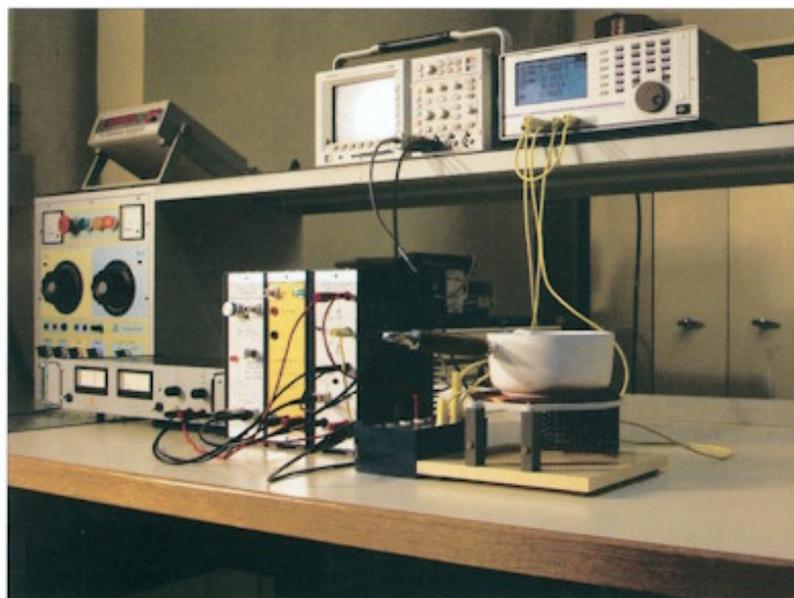


9^e année

La Revue SEE



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



Photos : ENS Cachan

**Applications
pédagogiques
et réalités
industrielles**

Publication trimestrielle du Cercle Thématique 13.01 de la SEE

ENSEIGNER L'ELECTROTECHNIQUE ET L'ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE



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

N° 34 - Septembre 2003

Dates importantes

Date limite de garantie des tarifs hôteliers :
30 septembre 2003

Date limite d'inscription avant majoration :
13 octobre 2003

Mise en place des manipulations :
12 novembre 2003 14h00-19h00

Ouverture du colloque :
Jeudi 13 novembre 2003 8h30

Partenaires



Conseil Régional
MIDI-PYRÉNÉES

J3eA



 **IEEE**
France Section

pels

La **Revue** 3E.I



CETSIS - EEA 2003

Colloque
sur l'**E**nseignement
des **T**echnologies
et des **S**ciences
de l'**I**nformation
et des **S**ystèmes

TOULOUSE

13 et 14 novembre 2003
Centre de Congrès Pierre Baudis

Mél : cetsis@cict.fr

Web : <http://mfca.ups-tlse.fr/cetsis>

Tél : 05 61 55 87 33

Fax : 05 61 55 87 39

CETSIS
Mission Formation Continue et Apprentissage
Université Paul Sabatier
118 route de Narbonne
31062 TOULOUSE CEDEX 4



UNIVERSITE
PAUL
SABATIER

TOULOUSE III

BULLETIN D'ABONNEMENT

Année scolaire 2003-2004
N°35 (décembre 2003), n°36 (mars 2004), n°37 (juin 2004)
et 38 (septembre 2004).

Abonnement individuel :

Adresser le bulletin ci-dessous, accompagné d'un chèque, libellé à l'ordre de :

SEE- La Revue 3EI

à l'adresse suivante :

**SEE-LA REVUE 3EI
17, rue Hamelin, 75783 PARIS CEDEX 16**

d'un montant de 32 € TTC pour la France et pays de la CEE

d'un montant de 42 € pour les pays hors CEE.

Nom : Prénom

Adresse d'expédition de La Revue 3EI :

Rue, n° :

Code Postal : Ville :

Pays :

Activité (pour statistiques) :

Abonnement souscrit pour une collectivité (bibliothèque, CDI, laboratoire, entreprise, université, école d'ingénieurs, lycée, IUT ...)

48 € TTC pour la France et pays de la CEE

63 € TTC pour les pays hors CEE.

Prendre soin de mentionner sur le bon de commande :

Le lieu de livraison de la revue ainsi que son destinataire (personne physique ou service)

Expédier le bon de commande à la

**SEE-LA REVUE 3EI
17, rue Hamelin, 75783 PARIS CEDEX 16**

*Renvoyer ce bulletin d'abonnement
2003/2004
le plus rapidement possible.*



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

17, rue Hamelin, PARIS 75 783 CEDEX 16

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

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

<p>Edition SEE, 17 rue Hamelin 75 783 PARIS CEDEX 16</p> <p>Directeur de la publication Jean-Gabriel REMY Président de la SEE</p> <p>Rédacteur en Chef François BOUCHER</p> <p>Comité de publication Jean BONAL 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</p> <p>Site WEB (lesite3EI.com) Responsable : Philippe LE BRUN</p> <p>Jean-Pierre TAREL Jean-Philippe ILARY</p> <p>Abonnement annuel (4 numéros) Année scolaire 2003 / 2004, tarifs TTC :</p> <p>Individuel : France et CEE.....32 € Pays hors CEE.....42 €</p> <p>Collectivités France et CEE.....48 € Pays hors CEE.....63 €</p> <p>Réalisation et impression (1100 ex) Repro-Systèmes 23, rue de Verdun 77 181 Le Pin</p> <p>Routage et Expédition Départ Presse ZI les Richardets 93 966 Noisy le Grand</p> <p>Dépôt Légal : septembre 2003 Commission Paritaire 1207 G 78028 ISSN 1252-770X</p>	<p style="text-align: right;">Sommaire du n°34</p> <p style="text-align: center;">Thème : Applications pédagogiques et réalités industrielles</p> <p>p. 1 Bulletin d'abonnement 2003 / 2004 p. 3 Sommaire. p. 4 Éditorial, p. 5 Publications, Informations.</p> <hr/> <p style="text-align: right;">Thème.</p> <p>p. 7 L'électronique dans l'automobile : I. Application de l'électronique de puissance dans les motorisations automobiles : problématique et enjeux. II. Électronique de puissance et moteurs électriques. Yves BERRIÉ, Ancien Ingénieur à la Direction de la Recherche de Renault SA.</p> <p>p. 16 Réalisation d'un véhicule électrique en section de technicien supérieur Génie Électrique. Philippe LE BRUN, LT Louis Armand, 94 130 Nogent sur Marne.</p> <p>p. 21 Supervision d'automates en réseau sous Excel. Jean-Louis BIANCHI, LT Jules Ferry, 78000 Versailles .</p> <p>p. 33 L'électronique de puissance "entre dans la cuisine". Gilles FELD, Emmanuel HOANG, Jean-Marie DÉSAGULIER, Département EEA, ENS-Cachan.</p> <p>p. 43 Harmoniques et réseau. François EDDI, Jean-François DING, Consultants techniques de la société EDUWATT ; 75 019 PARIS.</p> <p>p. 55 Conception d'un système numérique de commande d'interrupteur synchronisé sur le réseau. Lionel CIMA, Gilles FELD, Département EEA, ENS-Cachan.</p> <p>p. 59 Réglage d'un système par plans d'expériences (suite). Jean FILIPPINI, 88 000 Épinal.</p> <hr/> <p style="text-align: center;">Histoires des sciences et des techniques.</p> <p>p. 72 L'évolution de l'électronique de puissance en traction ferroviaire : l'ère des thyristors, les derniers grands matériels à courant continu. Christian LECLERC, Ingénieur Honoraire de la SNCF</p> <hr/> <p style="text-align: center;">Inscription au Congrès CETSIS du Club EEA, Publications 3EI</p> <p>p.82 Ventes des publications 3EI.</p> <p>p. 83 & 84 Inscription au congrès CETSIS</p>
---	--

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

Abonnement 2003/2004.

Comme chaque année, ce numéro de septembre nous donne l'occasion de faire le point sur le nombre de nos abonnés. Globalement celui-ci reste stable : un peu plus de 800. Cependant les évolutions constatées au cours des trois dernières années demeurent :

- le nombre d'abonnements individuels de professeurs de lycées ou " PRAG " continue sa lente décroissance au profit de souscriptions collectives passées par les CDI ou médiathèques. Cette tendance, sans être dramatique, présente des conséquences sur l'équilibre financier que nous devons maintenir ;
- le nombre d'abonnements souscrits par des lecteurs du secteur industriel est en régulière augmentation (1 abonnement sur 5 environ) nous pouvons nous réjouir de cette croissance qui a surtout été observée grâce aux offres d'abonnements couplés REE-3EI ;
- les abonnements souscrits par les universitaires sont également en légère évolution.

Le travail de l'ensemble des membres bénévoles du comité de publication, permet d'élaborer et de produire une revue trimestrielle proposée à un tarif très modique ; cependant, les coûts liés à l'impression et à l'expédition évoluent et nous obligent à adapter nos tarifs pour que l'équilibre financier soit maintenu. Le prix de l'abonnement individuel demeure toujours très accessible (32 € pour la CEE).

Le Comité de publication accueille un nouveau membre

Chérif LAROUCI, enseignant-chercheur au laboratoire " Commande et Systèmes " de l'École Supérieure des Techniques Aéronautiques et de Construction Automobile (ESTACA), nous a fait part de son souhait de rejoindre les membres de notre équipe ; c'est avec grand plaisir que nous l'accueillons.

Propositions d'articles et thèmes à venir.

Le numéro 35 (décembre 2003) de La Revue 3EI aura pour thème " **L'outil informatique dans l'enseignement** ". Une fois encore, nous faisons appel à ceux, certainement nombreux, qui font usage de l'informatique sous des formes diverses pour les cours, séances de travaux dirigés et pratiques. Nous leur demandons de nous faire-part de leurs expériences et de leurs réflexions sur l'impact de cet outil dans leur enseignement.

Les numéros de mars et juin (puis certainement d'autres plus tard) aborderont différents aspects de l'énergie (production, transport, économie etc.). Les thèmes précis seront fournis dans le numéro de décembre.

Expédier les propositions d'articles à l'adresse courriel : revue3ei.art@voila.fr

ou par courrier postal (sur disquette ou CD) à
La Revue 3EI-SEE, 17, rue Hamelin, 75 783 PARIS CEDEX 16

lesite3ei.com, à nouveau disponible

Après plusieurs semaines d'interruption, indépendante de notre volonté, le site web est de nouveau accessible grâce en particulier au travail de son responsable Philippe Le Brun. Vous pouvez donc à nouveau utiliser et fournir les documents de travail du domaine 3EI, ainsi que trouver les compléments de certains articles publiés dans Les Revues 3EI.

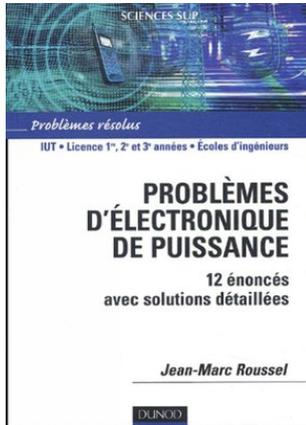
Abonnement à la Revue 3EI, année 2003-2004 :

Numéros : 35 (décembre 2003), 36 (mars), 37 (juin) et 38 (septembre 2004).

<u>Abonnement individuel :</u>	<u>Abonnement collectif souscrit par bon de commande (bibliothèque, CDI, laboratoire, entreprise, etc.)</u>
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**



PROBLEMES D'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE

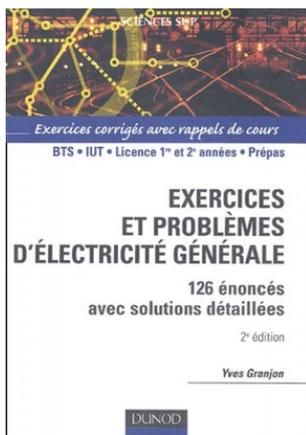
12 énoncés avec solutions détaillées

Jean-Marc ROUSSEL, professeur agrégé à l'IUT de Châteauroux
IUT, Licence 1^{ère}, 2^e et 3^e années, Écoles d'ingénieurs
Éditions DUNOD, 258 pages, 29,50 € TTC.

Cet ouvrage propose douze problèmes d'électronique de puissance qui abordent des applications très diverses. Ces problèmes corrigés, qui font appel à des documents constructeurs, sont élaborés à partir de véritables applications industrielles :

Structure de base d'un convertisseur statique pour moteur à courant continu, à excitation indépendante ; transistor de puissance ; stato compensateur ; transport de l'énergie à courant continu ; bus électrique à hacheur série ; moteur à courant continu alimenté par un hacheur à 4 quadrants ; alimentation à découpage Buck ; onduleur de tension pour variateur de vitesse de type V_s/F_s pour moteur asynchrone ; onduleur de tension à résonances pour table à induction ; moto variateur à courant continu à pont thyristor de type PD3 ; variateur de vitesse pour moteur asynchrone de type V_s/F_s .

Ce livre est plus particulièrement destiné aux étudiants des BTS, IUT, IUP, licences, CAPES, CAPET, écoles d'ingénieurs orientés vers l'électronique de puissance. Il complète le cours d'électronique de puissance de Guy Séguier dans la même collection.



EXERCICES ET PROBLEMES D'ELECTRICITE GENERALE

Yves GRANJON, professeur à l'Institut National Polytechnique de Lorraine.
Éditions DUNOD, 262 p., 22 € TTC.

Destiné aux étudiants en premières années des filières scientifiques et technologiques, cette nouvelle édition des **Exercices sur les circuits électriques** est un recueil d'exercices corrigés avec des rappels de cours, traitant des notions de bases de l'électrocinétique : généralités sur les circuits électriques, lois de Kirchhoff et théorèmes généraux de l'électricité en régime continu, circuits électrique en régime sinusoïdal et transitoire, puissance et énergie électriques, quadripôles en régime sinusoïdal, jonction PN et diodes à semi-conducteurs.

Chaque chapitre propose de nombreux exercices de difficulté croissante avec leur solution détaillée, qui permettent d'assimiler les méthodes, de déjouer les pièges classiques et de retenir les résultats fondamentaux. Le dernier chapitre regroupe 10 problèmes de synthèse résolus. Un formulaire de mathématiques complète l'ouvrage.

Dans cette nouvelle édition sont proposés des exercices inédits, alors que d'autres sont actualisés.



MECANIQUE DU SOLIDE, applications industrielles.

Pierre AGATI, professeur agrégé honoraire à l'Institut National Polytechnique de Grenoble,

Yves BREMONT & Gérard DELVILLE, professeurs agrégés à l'IUFM de Créteil.

Cet ouvrage présente les fondements de la mécanique du solide en trois grandes parties :

- cinématique ;
- statique ;
- dynamique.

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

Cette nouvelle édition est en adéquation avec les programmes et offre une actualisation, des exercices. Elle est complétée par un livre de mécanique appliquée

(résistance des matériaux, mécanique des fluides, thermodynamique) paru dans la même collection.
--

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

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

- un **tarif d'abonnement à la REE à 86 €** au lieu de 138 €
- une **remise de 20% sur l'achat des recueils** des conférences SEE des années 2000 / 2001 / 2002 ;
- des **inscriptions aux Journées d'Études et Congrès SEE**, concernant le domaine 3EI, à des **tarifs réduits**.
liste des manifestations disponible sur demande en contactant la **SEE/Service Congrès**
- tél 01 56 90 37 03 ou 04, par fax 01 56 90 37 08, par Courriel : congres@see.asso.fr
- 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.

Programme rédactionnel 2003 de la REE

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

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

journées " ELECTROTECHNIQUE DE PUISSANCE DU FUTUR "

9 & 10 décembre 2003, Supélec, GIF sur YVETTE.

Tarif préférentiel réservé aux adhérents de la SEE

Voir prochainement les conditions d'inscription sur le site de la SEE :

SEE.asso.fr

ELECTRONIQUE DANS L'AUTOMOBILE.

I. APPLICATIONS DE L'ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE DANS LES MOTORISATIONS AUTOMOBILES : PROBLÉMATIQUE ET ENJEUX.

Yves BERRIÉ

Ancien Responsable du Groupe d'Études de transmissions Électriques et Hybrides
à la Direction de la Recherche de RENAULT SA (Technocentre de Guyancourt)

Introduction : Pour faire comprendre pourquoi l'électronique de puissance est amenée à prendre une si grande place dans la motorisation des véhicules du futur, il est important de justifier d'abord la notion de véhicule hybrideⁱ et de la réduction de consommation qu'il permet d'envisager, réduction de consommation primordiale pour limiter l'émission de gaz à effet de serre.

Mais dans ce cas, pourquoi ne pas aller directement à la voiture électrique ?

ⁱ Véhicule utilisant comme chaîne de traction, un moteur conventionnel associé à un ou plusieurs moteurs électriques.

I-1 Mais qu'est devenue la voiture électrique ?

Au début des années 90 s'est produit pour le véhicule électrique un grand regain d'intérêt lié au "*Clean Air Act*" californien obligeant les grands constructeurs d'automobiles désireux de rester présents sur le marché californien à produire au moins 2% de leurs immatriculations en ZEV (*zero emissions vehicles*) entre 1998 et 2000, 5% en 2001 et 10% en 2003. Tous les constructeurs ont alors craint une contagion de cette réglementation du fait de l'augmentation du niveau de pollution de l'air dans les grandes villes et ils ont pensé que le temps était venu de lancer l'étude de véhicules électriques urbains. Le terme "urbain" est important, car on savait déjà qu'aucune technologie de batterie connue ou en cours de recherche ne permettrait d'atteindre à l'horizon 2000 l'autonomie d'un véhicule routier - à savoir au moins 500 km - avec un poids réaliste et qu'il faudrait pour cela passer aux solutions dites "hybrides", plus lointaines techniquement. Mais comme le but principal était de réduire la pollution urbaine et que des études statistiques avaient montré que 90 % des trajets urbains quotidiens européens ne dépassaient pas 30 km, on pensait qu'une autonomie de 100 à 150 km entre 2 recharges nocturnes de 8h pouvait satisfaire la majorité des besoins. A condition, bien sûr, qu'un tel véhicule ne soit pas plus cher ou même un peu moins cher qu'un véhicule traditionnel puisque de performances plus limitées....

De nombreux projets ont alors vu le jour chez la plupart des constructeurs mondiaux. Le problème était particulièrement difficile, car il ne s'agissait plus de réaliser des "sous-voitures" limitées en performances et en confort telles qu'on avait pu en faire par le passé à de nombreuses reprises en remplaçant le moteur thermique par un moteur électrique et en emplant des

batteries aux places AR ou dans le coffre, véhicules qui ne dépassaient guère 60 km/h en plat, avec une tenue de route médiocre, une habitabilité réduite, un chauffage inexistant. Non, il s'agissait de concevoir de nouveaux types de véhicules construits autour de leurs batteries et possédant les mêmes performances en matière d'accélération, de tenue de route et de confort que leurs homologues à essence. Seule la vitesse de pointe avait le droit d'être relativement limitée (environ 120 km/h). Pour cela, tous les organes ou presque devaient être adaptés ou réétudiés (pensons en particulier au chauffage, nécessairement électrique, à l'assistance au freinage nécessitant une pompe électrique, au réseau de bord 12 V imposant un convertisseur HT / 12V, au chargeur 220 V embarqué, etc.).

Après des années de travail, tous les projets ont abouti à peu près à la même conclusion, à savoir que si faisabilité technique était assurée (de nombreux prototypes répondant au cahier des charges avaient été construits), en revanche la faisabilité économique ne l'était pas pour une raison simple : le coût des organes spécifiques qui pour arriver à des niveaux compatibles avec les coûts "automobiles", auraient nécessairement dû être fabriqués en grande série. Or le concept même de "véhicule urbain" imposait une construction en petite série. De plus, on s'est aperçu que psychologiquement, très peu de gens étaient prêts à acheter un véhicule d'autonomie réduite (à moins qu'il ne soit très peu coûteux, d'où le cercle vicieux) : ils veulent pouvoir occasionnellement couvrir des distances supérieures à 200 km entre deux recharges.

Le *Clean Air Act* n'a donc jamais pris effet aux USA, faute de véhicules ad-hoc disponibles sur le marché.

En Europe, quelques constructeurs¹ se sont lancés dans l'aventure de produire des versions électrifiées de modèles standards, beaucoup plus pour des raisons d'image de marque que par nécessité commerciale, en adoptant des technologies relativement peu performantes mais disponibles industriellement : le Plomb / acide ou le Nickel / Cadmium pour les batteries, et le moteur à courant continu piloté par un hacheur pour le groupe moto-propulseur. Ces véhicules, surtout destinés à des usages professionnels (petites flottes pour Pouvoirs Publics et entreprises), n'ont pas pénétré le marché grand public. Actuellement, seuls PSA et RENAULT commercialisent encore respectivement des versions électrifiées des 106, Saxo et Partner d'une part; et de la Kangoo d'autre part (voir plus loin la description de leur chaîne de traction). Le nombre total de véhicules électriques en Europe est d'environ 11000, dont 8000 en France.

Il faut ajouter qu'entre temps l'argument "pollution urbaine" s'était modifié: à partir de 1993, l'obligation du pot catalytique associé à une injection électronique ayant permis de réduire considérablement les émissions polluantes des véhicules (d'un facteur largement supérieur à 10)². Il ne restait donc pour justifier le VE, que les arguments de silence et d'agrément de conduite, intéressants certes, mais insuffisants (l'économie d'entretien et de carburant étant masquée par le coût d'achat ou de location des batteries).

I-2 Le vrai défi de la pollution : les gaz à effet de serre

Les émissions polluantes du genre oxydes de carbone et d'azote ayant été ou étant en passe d'être ramenées à la limite du mesurable, de même que les particules et les imbrûlés, il reste un autre type d'émissions, incontournable celui là car intimement liée à la combustion : l'émission de CO₂, gaz à effet de serre. Or le véhicule électrique ne résout pas vraiment le problème, il ne fait que le déplacer. En effet, il faut bien fabriquer l'électricité quelque-part, et sauf en France où elle est d'origine nucléaire à 75 %, elle est d'origine thermique (charbon ou pétrole) dans la plupart des autres pays. Certes, les centrales ont un meilleur rendement qu'un moteur de voiture, mais cet avantage est presque annulé par l'ensembles des rendements de la chaîne de transport et de conversion : centrale / ligne / chargeur / batterie.

On sait que la plupart des gouvernements des pays industrialisés (sauf – hélas ! les USA) se sont engagés à Kyoto à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre. En particulier pour ce qui concerne l'automobile, les constructeurs visent, pour se

conformer à ces décisions, à diminuer un certain indice de consommation (l'indice CAFE ou Corporate Average Fuel Economy) pour le ramener en 2012 en dessous de 120 g de CO₂ par km parcouru, valeur moyenne pour l'ensemble de leur gamme, avec une étape intermédiaire à 140 g en 2008. Or la plupart des véhicules actuels sont très au-dessus de cette dernière valeur. Il est donc primordial de diminuer de façon drastique la consommation des véhicules; mais comment ?

I-3 Diminuer la consommation pour lutter contre l'effet de serre

Le seul moyen de réduire les émissions de CO₂ d'un véhicule consiste à diminuer la consommation de son moteur. Différents moyens sont envisageables :

- agir sur le poids du véhicule ; mais actuellement, ce poids a plus tendance à augmenter qu'à diminuer du fait de l'augmentation générale de la taille des voitures et des équipements de confort et de sécurité toujours plus nombreux (résistance aux chocs, insonorisation ...)

- agir sur le rendement des organes auxiliaires : (alternateur, moteurs de climatisation, pompes et ventilateurs, direction assistée ...) en optimisant leur fonctionnement. Dans ce domaine, l'électronique peut apporter une aide précieuse (voir l'article sur l'électronique de puissance dans les organes auxiliaires).

- agir sur le rendement de la chaîne de traction : de gros progrès ont déjà été faits grâce aux dispositifs d'injection associés à des calculateurs sophistiqués. Pour s'en convaincre, il suffit de comparer les consommations de 2 véhicules de classe équivalente à 15 ans d'intervalle : le gain avoisine 30 %.

Mais là, on peut aller encore plus loin en mariant moteur thermique et moteur électrique.

I-4 La solution du futur : l'hybridation (figure I-1)

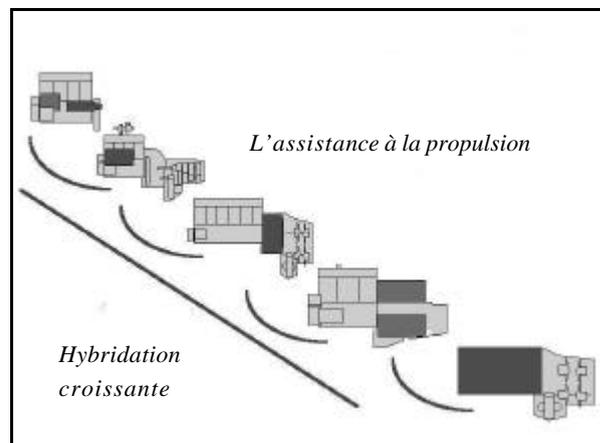


Figure I-1

Dans tout véhicule routier, le moteur est extrêmement surdimensionné en puissance à seule fin

¹ PSA (106 Electrique), RENAULT (Express Electrique), FIAT (ElectroPanda), VW (Citystromer), Ford...

² 80 % de la pollution due aux automobiles est générée par les véhicules antérieurs à cette date

de pouvoir fournir des crêtes importantes pendant un temps relativement court. Ces crêtes sont dictées par des impératifs d'agrément de conduite (accélération, franchissement de rampes), et pour tenir compte des variations de charge et de l'air conditionné qui consomme plusieurs kW par temps chaud. A titre d'exemple, on installe fréquemment 80 à 100 kW sur une berline routière alors que quelques kW lui suffisent pour rouler en ville, et 50 kW pour rouler à 130 km/h. Or le rendement d'un moteur thermique est mauvais aux charges partielles. Et de plus, pour avoir un comportement et une dépollution correctes à toutes les charges, on est obligé d'adopter des compromis de réglage qui éloignent du maximum possible si le moteur fonctionnait au voisinage de sa puissance nominale.

D'où l'idée d'utiliser un moteur thermique de puissance plus faible et de l'associer à un ou plusieurs ensembles moteur électrique/convertisseur électronique ayant pour rôle de :

- le charger mécaniquement lorsqu'il fonctionne en dessous de son point nominal, en récupérant la puissance sous forme d'électricité stockée dans une batterie.

- lui fournir le supplément de puissance nécessaire lorsque l'agrément de conduite l'exige en consommant l'énergie de la batterie.

- éventuellement assurer une propulsion en électrique pur à faible vitesse pour la traversée d'un centre ville

- dans certains cas et selon la structure adoptée, l'une de ces machines pourrait également servir de démarreur

On voit que dans ce cas, la batterie peut être de petite taille car elle n'a plus à stocker que de faibles quantités d'énergie et elle peut être rechargée à tout instant.

De même, la ou les chaînes de traction électrique (moteur + électronique de puissance) restent de taille modeste.

Ce principe, appelé hybride parallèle, est très différent de l'hybride série qui vient plus spontanément à l'esprit et qui consiste à générer l'électricité par un alternateur entraîné par le moteur thermique, et à alimenter ainsi un ou plusieurs moteurs électriques (l'arbre électrique). Certes, on peut ainsi, au prix d'une batterie tampon, optimiser la taille et le rendement du moteur thermique, mais il faut dimensionner la chaîne électrique pour la puissance crête et de plus le rendement de l'ensemble est le produit des rendements

des diverses machines, donc toujours moins bon sur route qu'un simple moteur thermique, ce qui va à l'encontre du but recherché.

I-5 Les problèmes posés par l'électronique de puissance

Beaucoup trop de gens (et même des scientifiques) ont cru qu'il suffisait pour faire une voiture électrique de remplacer le moteur thermique par un moteur électrique industriel. La même erreur pourrait être faite au sujet de l'hybride. En fait, le groupe motopropulseur hybride sera nécessairement, pour des raisons de compacité et de fiabilité, un organe spécifique dans lequel auront été intégrées des parties actives (bobinages, aimants...) de machine électrique. Ces parties actives seront elles mêmes spécifiques : pour des raisons de coût, hors de question d'utiliser les composants classiques des moteurs industriels à hautes performances. En ce qui concerne l'électronique de puissance, des technologies nouvelles seront à développer pour le convertisseur triphasé qui ne se présentera plus sous forme d'un boîtier séparé difficile à intégrer sous le capot, à raccorder et à refroidir mais devra s'intégrer harmonieusement à la fonderie du groupe moto-propulseur.

I-6 Et la pile à combustible ?

C'est un principe qui paraît bien séduisant puisqu'on génère ainsi directement l'énergie nécessaire au moteur électrique sans passer par des batteries mais il faut garder à l'esprit l'origine du carburant utilisé : si c'est de l'hydrogène, fabriqué par électrolyse de l'eau, on retombe sur le problème précédent concernant les centrales électriques. Si c'est un carburant classique (essence ou gazole) dont on récupère l'hydrogène grâce à un reformeur, alors le handicap de l'émission de CO₂ reste entier. Quoi qu'il en soit, il faut prévoir 2 convertisseurs électroniques de puissance : l'un pour élever la tension jusqu'à l'onduleur du moteur de traction, l'autre pour générer le réseau auxiliaire de bord.

I-7 CONCLUSION

L'utilisation de l'électronique de puissance est un enjeu majeur pour la propulsion des véhicules du futur puisque c'est un moyen privilégié pour réduire les émissions de CO₂ de leur moteur. Quand les organes nécessaires auront été développés pour les besoins de la grande série, et seront donc tombés dans les zones de prix "automobile", ils pourront aussi être utilisés économiquement dans d'autres véhicules de niche comme les petites voitures urbaines électriques.

II. ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE ET MOTEURS ÉLECTRIQUES.

Le tableau, figure II-1 rappelle les principaux types de moteurs électriques industriels susceptibles d'être utilisés dans des chaînes de tractionⁱⁱ.

Les moteurs à courant continu présentent principalement l'avantage d'être simples à piloter : un vulgaire rhéostat pourrait faire l'affaire. C'était d'ailleurs le moyen utilisé dans les premiers véhicules avant l'avènement des semi-conducteurs de puissance. Pour des raisons de rendement, on emploie maintenant des hacheurs à semi-conducteurs. Pour travailler à couple constant, il suffit de maintenir l'excitation constante, mais pour travailler à puissance constante, ce qui permet de se passer de boîte de vitesse, il faut rendre l'excitation inversement proportionnelle à la vitesse (défluxage ou "field weakening"). Aucun capteur ni calculateur n'est en principe nécessaire. Mais la présence d'un collecteur mécanique avec ses balais, encombrant et relativement fragile, limite leur rapport puissance / poids et leur vitesse de rotation. Les balais eux-mêmes sont des pièces d'usure. C'est pourquoi ils tendent à être remplacés dans les applications exigeantes par les moteurs sans collecteur dont le fonctionnement nécessite une électronique de puissance pour générer le champ tournant.

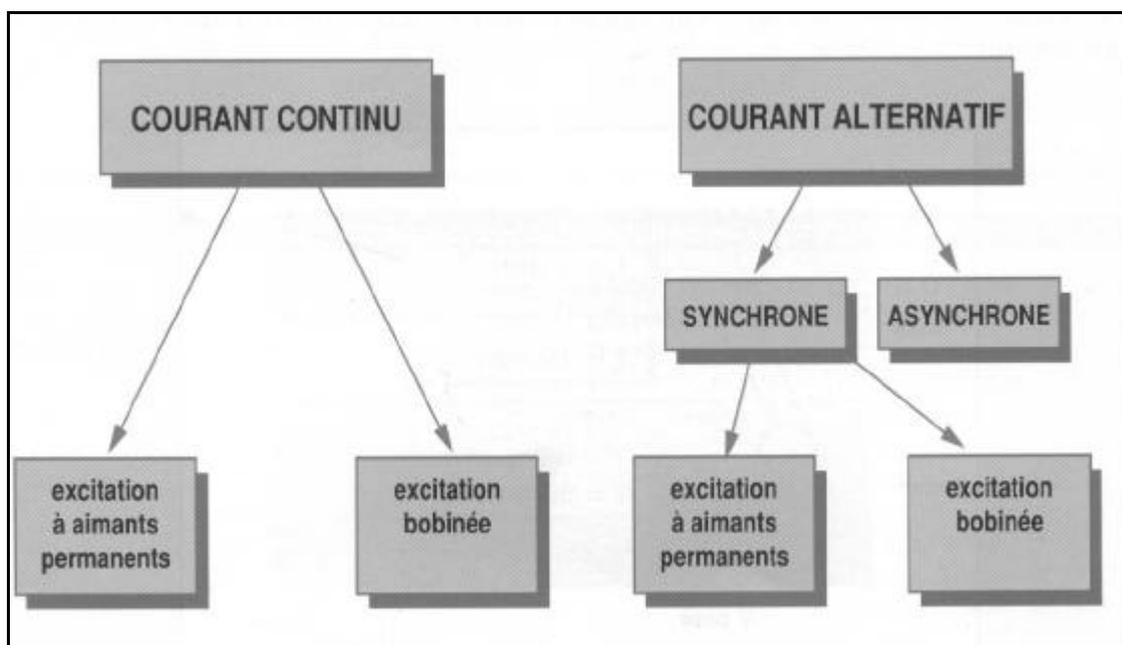


Figure II- 1 : principaux types de moteurs électriques industriels susceptibles d'être utilisés dans des chaînes de traction

ⁱⁱ Les moteurs à réluctance, prometteurs mais encore du domaine de la recherche pour les fortes puissances, ne figurent pas dans ce tableau.

II-1 Le moteur à courant alternatif, principe de fonctionnement.

Pour piloter un moteur à courant alternatif à vitesse variable, (en triphasé dès que la puissance excède quelques kW), il faut réaliser un onduleur dont la tension et la fréquence doivent être asservies en temps réel à la vitesse de rotation du rotor (dans le cas du moteur asynchrone) ou à sa position (dans le cas du moteur synchrone) au moyen d'un capteur calé sur le rotor, avec asservissement de la tension statorique à la vitesse de rotation.. On peut parfois se contenter d'ondes rectangulaires, mais on diminue le taux d'harmoniques, donc l'échauffement, en réalisant de vraies sinusoïdes. La simple commande en tension des enroulements statoriques réalise alors ce qu'on appelle

une commande scalaire, relativement simple, mais qui ne permet pas des performances dynamiques élevées ni l'optimisation du rendement aux charges partielles sur tous les points du plan couple / vitesse. Pour cela, il faut mettre en oeuvre un procédé de commande appelé "commande vectorielle" (Field Oriented Control) qui permet de plus le travail à puissance constante (field weakening) même pour les moteurs synchrones à aimants et asynchrones par réglage séparé des composantes en phase et en quadrature du courant statorique (voir encadré en fin d'article).

Le moteur synchrone à rotor bobiné, lui, peut facilement être réglé au flux optimal ou "défluxé" par simple action sur le courant rotorique.

Toutes ces diverses commandes sont implé-

menté sur un micro-calculateur puissant intégré au bloc d'électronique de puissance.

Les semi-conducteurs employés dans les ponts redresseurs / onduleurs de puissance destinés à ces motorisations sont des transistors bipolaires ou Mosfet pour les petites puissance (quelques centaines de watts), des IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) pour les puissances moyennes (jusqu'à quelques dizaines de kW et 1000 V), et des thyristors ou GTO (Gate Turn Off) pour les fortes puissances (plusieurs centaines de kW à plusieurs MW, plusieurs milliers de volts).

L'électronique de commande des moteurs à courant alternatif est donc beaucoup plus complexe que celle du moteur à courant continu, (les versions asynchrones ou synchrones ne diffèrent en fait que par le logiciel de commande implémenté), mais les progrès permanents des composants de puissance et des circuits intégrés à grande échelle rendront cet inconvénient de moins en moins sensible. En revanche, ces moteurs sont plus simples à fabriquer et à refroidir, plus petit, plus léger, plus performant, et d'une robustesse à toute épreuve, particulièrement en ce qui concerne le moteur asynchrone. Le moteur synchrone offre pour sa part le meilleur rapport puissance / poids ainsi qu'un rendement généralement supérieur, avec en contrepartie un surcoût dû aux aimants ou au bobinage du rotor.

II-2 Quelques applications à l'automobile.

Décrire une chaîne de traction hybride sortirait un peu du sujet, et de plus les projets actuels sont encore du domaine de la recherche, donc confidentiels. Nous allons donc nous limiter, à titre d'exemple, à la description succincte de quelques chaînes développées pour les besoins des véhicules électriques prototypes ou commercialisés sur chacun des principes évoqués ci-dessus, étant entendu que ces principes se retrouveraient dans une chaîne hybride.

II-2-1 Chaîne de traction à courant continu LEROY-SOMER / SAGEM (PSA)

Elle équipe actuellement les 106 et Saxo électriques. Il s'agit d'un moteur à courant continu à excitation séparée dont l'induit est alimenté par un hacheur à IGBT alors que l'excitation est alimentée par un hacheur à transistors bipolaires. La puissance nominale (unihoraire) est de 11 kW et la puissance de crête de 20 kW à 6500 t./min pour une tension batterie de 120 V. la zone de défluxage du moteur atteint la valeur relativement élevée de 4 à 1, ce qui autorise un couple élevé à faible vitesse (127 N.m) et donc permet de se passer de boîte de vitesse. Le bloc électronique intègre – outre l'onduleur - un convertisseur 12 V et un chargeur de batterie 220 V. Le refroidissement de l'ensemble est à air pulsé.

II-2-2 Chaînes de traction asynchrone ou synchrone à aimants SIEMENS (projet ELEGIE³)

La figure II-2 montre une réalisation prototype de chaîne de traction d'environ 18 kW de puissance permanente et 30 kW crête composée d'un moteur réalisable en version *asynchrone* ou *synchrone à aimants permanents* issue de synergies avec des applications industrielles. L'électronique de puissance est réalisée au moyen de transistors IGBT 400 A.. La fréquence de découpage est de l'ordre de 5 kHz.

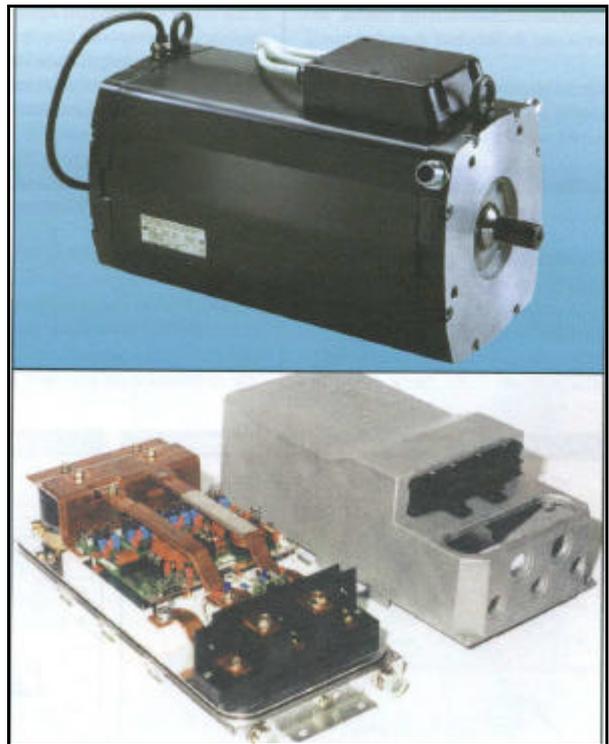
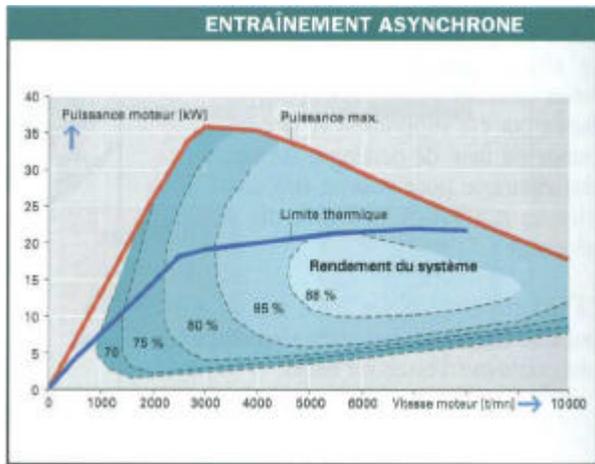
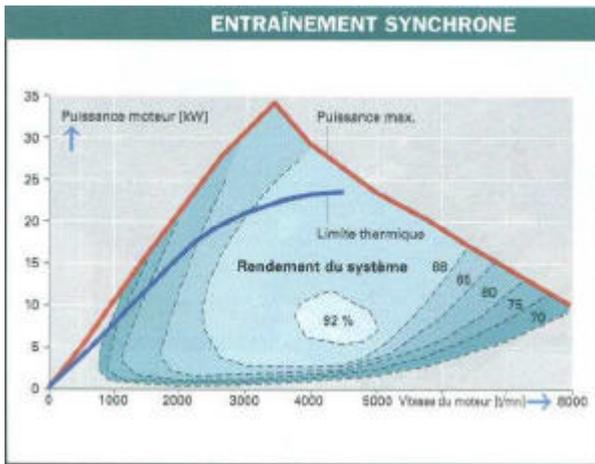


Figure II-2 Moteur et onduleur Siemens pour véhicule électrique (documents Siemens)

Caractéristique puissance-vitesse de la chaîne Siemens.

Les performances du système peuvent être décrites par des courbes puissance-vitesse sur lesquelles sont tracées les courbes d'iso rendement. La limite thermique est également indiquée (figure II-3). Ainsi qu'on peut le voir sur cette comparaison, c'est le moteur asynchrone qui possède la meilleure capacité de puissance aux vitesses élevées, et permet donc de se passer de boîte de vitesse, mais le moteur synchrone offre de meilleures performances aux faibles vitesses en terme de rendement. Dans cette version, d'autres stratégies de commande seraient possibles en vue d'étendre la région de puissance maximale au moyen de courants magnétisants statoriques additionnels ("field weakening" ou "défluxage").

³ Projet cofinancé par la C.E. dans le cadre du programme EUREKA entre 1992 et 1996 et regroupant Renault, EDF, Siemens, Fiamm, ABB, AEG, Valéo).



Figures II 3 : cartographies d'iso rendement de la chaîne Siemens

II-2-3 Chaîne de traction synchrone à rotor bobiné AUXILEC / SAGEM (RENAULT SA) (figure II-4)

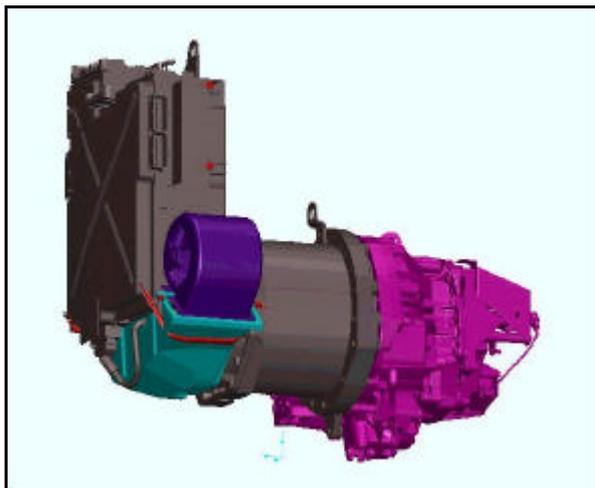


Figure II-4 : Chaîne de traction AUXILEC / SAGEM

Il s'agit d'un moteur synchrone triphasé à rotor bobiné, (ce qui permet un réglage aisé du flux par action sur le courant rotorique et donc une commande facile dans la zone à puissance constante avec un bon rendement permettant de se passer de boîte de vitesses) alimenté par un onduleur triphasé à transistor IGBT intégrant aussi le convertisseur 12 V et le chargeur 220 V.

Il est refroidi par air (ventilateur) et a un rendement moyen supérieur à 90% (hors électronique). La puissance uni horaire est de 15 kW, la puissance maximale de 30 kW, la fréquence de découpage de 10 kHz.

Les performances puissance et couple sont données figure II-5. Cette chaîne équipe actuellement la Renault Kangoo dans sa version électrique.

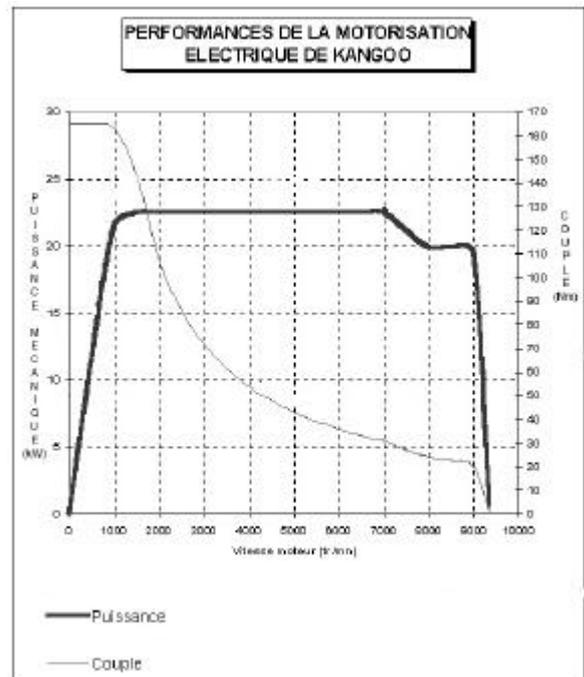


Figure II-5 : performances puissances et couple de la chaîne de traction synchrone à rotor bobiné AUXILEC / SAGEM (RENAULT SA)

La figure II-6 donne l'architecture électrique générale alors que la figure II-7 en fin d'article donne une idée de la complexité d'intégration sous capot de l'électronique de puissance.

II-3 Conclusion.

Un problème majeur : la fiabilité

La fiabilisation de l'électronique de puissance est un enjeu très important pour son introduction à grande échelle dans l'automobile. Utilisée jusqu'ici sur des applications industrielles (process d'usines par exemple) ou des applications ferroviaires, où les volumes de production restent modestes et le coût est assez élevé, la question de sa fiabilisation a été en partie traitée par la marge de dimensionnement. Dans les applications électroménager, où les puissances restent faibles, la fiabilité et la durée de vie sont moins critiques. Mais sur les applications automobile où les volumes de production sont très élevés (plusieurs centaines à plusieurs milliers par jour) l'optimisation coût/performance/fiabilité est fondamentale. Il faut donc développer dans ce domaine l'étude de la fiabilité statistique sur des grands nombres d'équipement.

L'électronique de puissance, beaucoup plus que l'électronique de traitement de l'information, vieillit du fait de son utilisation (cycles thermiques, contraintes mécaniques). La connaissance détaillée des facteurs physiques de vieillissement et la maîtrise de ces facteurs sont des éléments déterminants pour une mise

en oeuvre optimale. Pour ces raisons, le succès de l'introduction de l'électronique de puissance dans l'automobile repose sur l'acquisition d'un savoir faire poussé dans la maîtrise de l'équilibre coût/fiabilité et durabilité. Ce savoir-faire doit s'appuyer sur des validations très approfondies qui devront prendre en compte, au-delà de la vérification habituelle de l'aptitude à fonctionner au point nominal, un balayage très large :

- d'une part, de toutes les configurations possibles de fonctionnement (une automobile est conduite par l'homme, les profils de mission sont donc très variés).
- d'autre part, de tous les cas extrêmes de dispersion de fabrication.

Malgré tout, une validation exhaustive n'existant pas, la maîtrise de la qualité de l'électronique de puissance restera une maîtrise statistique du taux de défaillance.

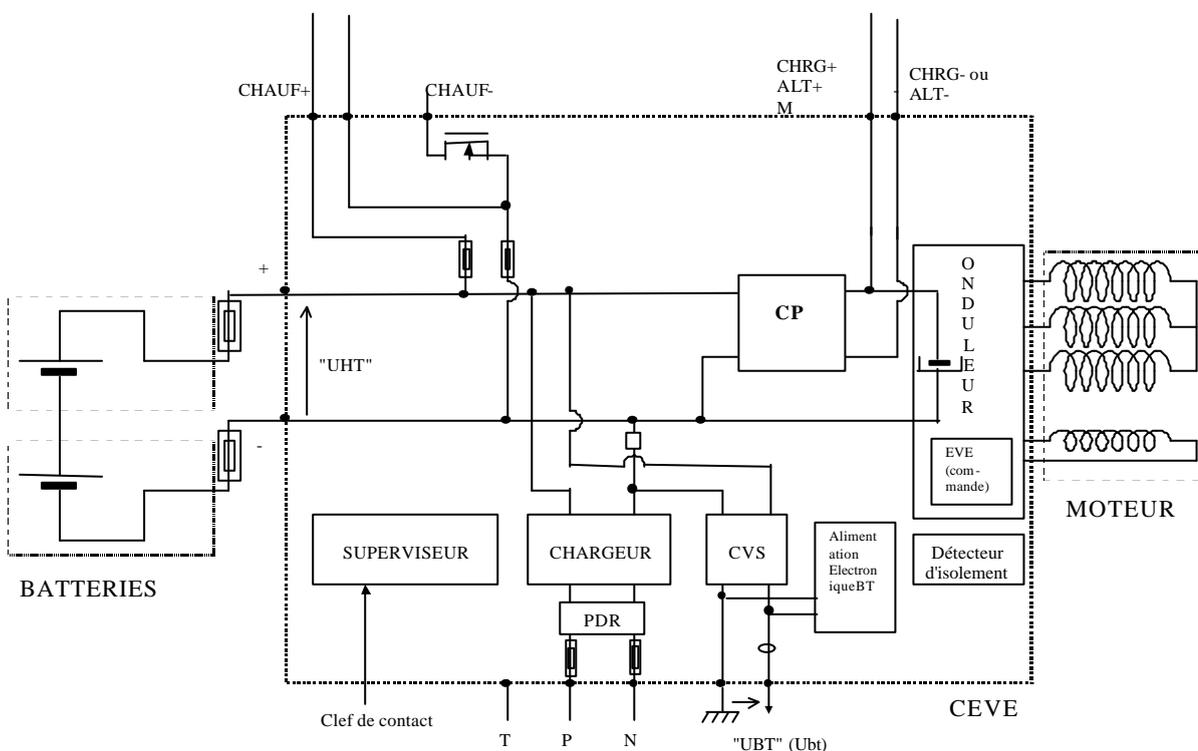


Figure II-6 : architecture électrique générale.

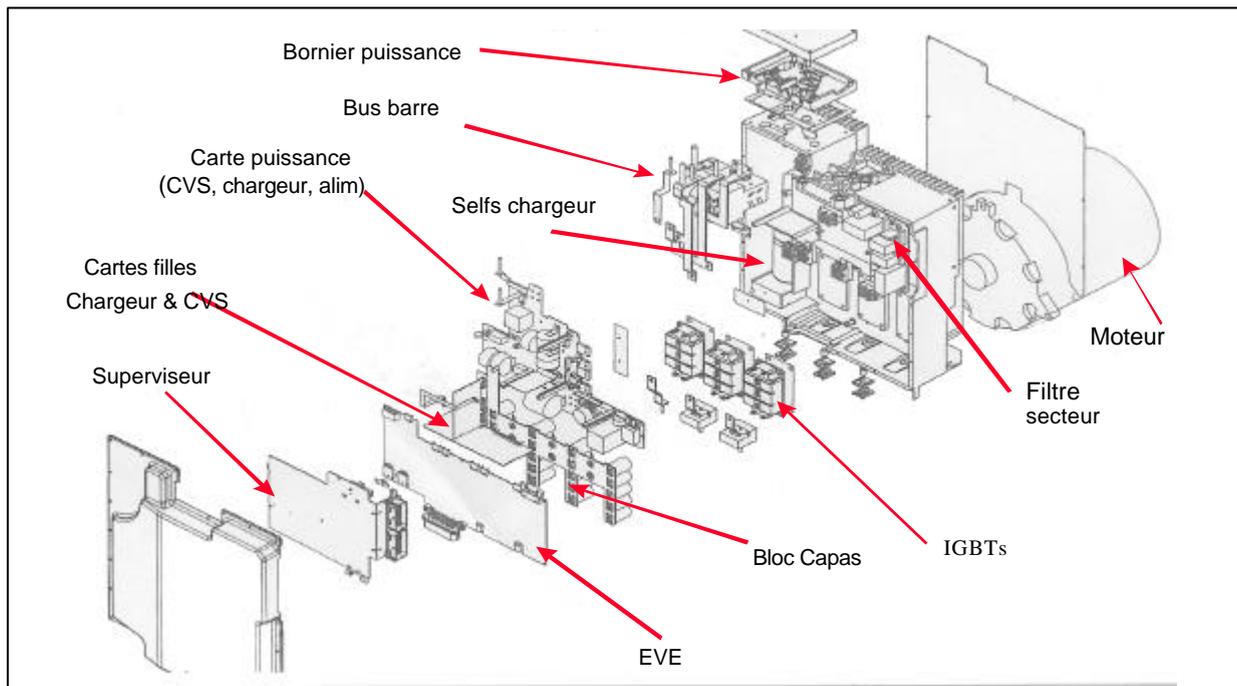


Figure II-7 : la complexité de l'intégration sous capot de l'électronique de puissance.

LA COMMANDE VECTORIELLE.

Il est fréquent de voir associé à un moteur triphasé alimenté par un onduleur le terme "**commande vectorielle**".

Mais qu'est-ce au juste qu'une "**commande vectorielle**" ?

Actuellement, tous les moteurs auxiliaires utilisés dans l'automobile sont encore des moteurs à courant continu à collecteur. Mais depuis longtemps les applications performantes (militaires, aviation, machines-outils, robotique) se sont tournées vers les machines à courant alternatif sans collecteur, machines synchrones, (à rotor bobiné ou à aimant) ou asynchrones. Par exemple, la dernière-née de Renault, la **KANGOO ELECTRIQUE**, est équipée d'un moteur synchrone à rotor bobiné. (Voir plus haut).

Toutes ces machines ont un point commun : leur fonctionnement nécessite la génération d'un champ tournant (créé par des courants triphasés dans l'immense majorité des cas) au moyen d'un onduleur à semi-conducteurs qui remplace en quelque sorte le collecteur. Le point crucial du fonctionnement réside alors dans le calage de la phase des courants statoriques par rapport au flux rotorique. Alors qu'il est relativement simple de faire fonctionner de tels moteurs dans de bonnes conditions à vitesse et couple constants au moyen d'une simple commande en tension dite scalaire, la recherche de performances dynamiques ainsi que l'optimisation du rendement sur tous les points du plan vitesse / couple rendent indispensable une commande dite vectorielle (ou à flux orienté).

Voici très brièvement le principe de cette commande qui repose sur une modélisation de la machine dans un repère lié au rotor, suivi d'une transformation rotor / stator pour générer les courants d'alimentation (transformation de Park).

Principe de la commande vectorielle ou "à flux orienté".

La commande à flux orienté consiste en une commande non plus des tensions mais des courants statoriques (représentés par un vecteur d'espace à 3 composantes a, b, c). Cette commande est basée sur des projections qui transforment un système triphasé fonction du temps et de la vitesse en un système à 2 variables d et q indépendantes du temps, ce qui conduit à une commande semblable à celle d'un moteur à courant continu. La chaîne de calculs est la suivante:

Une première transformation (*transformation de Clarke*) convertit les vecteurs représentant les 3 courants de phase mesurés i_a, i_b, i_c en 2 vecteurs orthogonaux α et β . (figure. A)

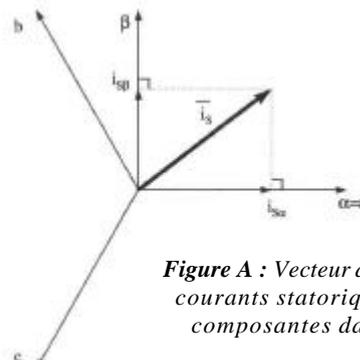


Figure A : Vecteur d'espace des courants statoriques et ses composantes dans (a,b)

Une deuxième transformation (*transformation de Park*) convertit ces vecteurs tournants α et \hat{a} en vecteurs fixes dans un repère tournant d et q.(figure B)

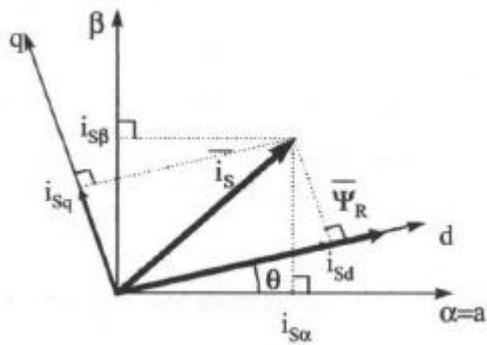


Figure B : vecteur d'espace des courants statoriques et ses composantes dans (d,q)

A partir de d et q, on génère alors les mesures des courants i_{sd} et i_{sq} qui sont comparées aux consignes i_{sdref} et i_{sqref} . L'erreur est amplifiée et corrigée par un correcteur du genre Proportionnel/Intégral ce qui génère les consignes fixes d et q

Enfin, une troisième transformation (*transformation de Park inverse*) recrée les consignes tournantes α et \hat{a} qui attaquent le générateur de Modulation de Largeur d'Impulsion ou PWM (Pulse Width Modulation) pilotant l'onduleur triphasé à IGBT (figure C).

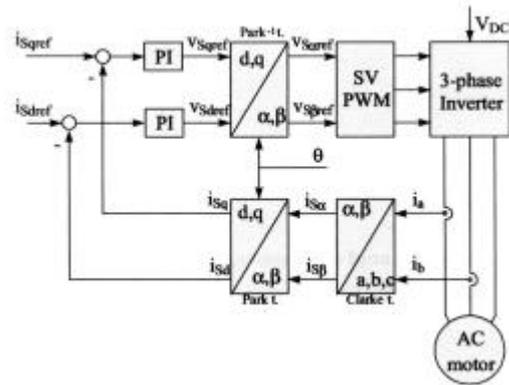


Figure C : schéma fonctionnel d'une commande vectorielle pour moteur à courant alternatif.

Remarque : Le schéma ci-dessus ne fait pas apparaître le circuit de l'onduleur qui permet de générer un système triphasé de phase convenable par rapport au champ rotorique grâce à un capteur de position ou de vitesse calé sur le rotor.

On voit que cette méthode est gourmande en calculs exécutés en temps réel, et notamment en calculs trigonométriques et matriciels. Quand on sait que ces moteurs sans collecteurs ont des vitesses de rotation maximales de l'ordre de 10 000 t/min, on comprend que la vitesse de calcul soit un facteur primordial. De plus, l'alimentation en courant en non en tension des enroulements statoriques nécessite des boucles de courant à bande passante élevée, donc des fréquences d'échantillonnage très élevées (plusieurs MHz). C'est pourquoi ces méthodes n'ont pu se généraliser que depuis la disponibilité de micro-contrôleurs rapides (16, puis 32 bits) souvent associés à des coprocesseurs mathématiques.

REALISATION D'UN VEHICULE ELECTRIQUE EN SECTION DE BTS GENIE ELECTRIQUE

Philippe LE BRUN

professeur en STS Électrotechnique
Lycée Louis ARMAND
173 B^d de Strasbourg
94736 NOGENT sur MARNE CEDEX
Florence.vadee@wanadoo.fr

Avant propos : Le développement du véhicule électrique a toujours été freiné à cause du problème de stockage de l'énergie électrique et de l'autonomie relativement faible en résultant. Aujourd'hui, ce sont la recherche d'une meilleure qualité de vie et le respect de l'environnement qui constituent les facteurs essentiels de l'intérêt que suscite ce mode de transport. La voiture électrique, avec moins de bruit, moins d'émission de gaz d'échappement apparaît donc comme une nouvelle façon de se déplacer en milieu urbain. Son développement pourrait bien connaître un nouvel élan si des décisions politiques étaient prises pour compenser son coût encore peu incitatif pour les particuliers. Cependant ce type de véhicule est devenu incontournable lors de déplacement en milieu fermé (usines, grands halls recevant du public...) ou pour des déplacements en atmosphère explosive (certaines zones aéroportuaires, quelques industries...) en dehors des chariots élévateurs ou autres transpalettes utilisés depuis de nombreuses années en milieu industriel.

Introduction

L'idée d'utiliser l'énergie électrique pour mouvoir des véhicules n'est pas nouvelle : les premières voitures sans chevaux ont été propulsées en grande partie par des moteurs électriques. En effet, c'est en **1880** que les ingénieurs **Charles Jeantaud**, **Camille Faure**, **Gustave Trouvé** et **Nicolas Raffard** réalisent les premiers véhicules électriques. Cette prouesse technologique est rendue possible grâce à l'invention, vingt et un ans plus tôt, de l'accumulateur au plomb par **Gaston Planté** et **Camille Faure**.

En **1896**, **Louis Krieger**, un autre ingénieur français, créa un « fiacre » électrique qui participa avec succès au premier concours de parcours en ville : 12 jours de circulation et 50 km par jour.



Mais c'est en mai **1899** que la viabilité de la voiture électrique éclate aux yeux du monde entier. En effet, la "**Jamais Contenté**" pilotée par le belge **Camille Jenatzy**, dépassa les 105 km/h.

Quelques années plus tard, en **1901**, de nouveau **Krieger**, avec une voiture électrique emportant trois voyageurs, portait le rayon d'action à 307 km en reliant Paris à Châtellerault, sans recharge, à une moyenne horaire de 40 km. **L'électromobile**, munie d'une remorque de batteries, disposait en **1903**, d'une autonomie de 375 km. Ces performances ne donnaient pas la mesure réelle de la voiture électrique, parce

qu'elles étaient réalisées avec des matériaux spéciaux et sans souci de ménager les batteries d'accumulateurs. Lorsqu'on passa aux applications pratiques, on s'aperçut que l'on était limité à la fois par la vitesse moyenne et par le rayon d'action, les accumulateurs devant être, normalement rechargés tous les 100 à 150 km. En outre, le rapport poids / puissance, qui détermine en partie la valeur des accélérations, était trop élevé.

Actuellement, le record de vitesse de la voiture électrique appartient à **Oscar de Vita** (début **1995**) qui, sur le prototype **ZER** (Zero Emission Record) dessiné par Bertone, a atteint 303,977 km/h, tandis que la distance maximale parcourue à 60 km/h de moyenne est de 540 km pour un « concept car », de **Fisher Electric Motor Technology**, munie d'une remorque spécifique (Range Alternator Trailer) de 175 kg.

C'est donc la recherche d'une meilleure qualité de vie et d'une meilleure utilisation de l'énergie électrique qui fera de la voiture électrique un élément incontournable du transport de demain. La voiture électrique se recharge surtout la nuit, et, en France comme dans la plupart des pays d'Europe, l'énergie électrique d'origine nucléaire et hydraulique est particulièrement abondante la nuit. De plus les piles à hydrogène pourraient dans les années à venir donner un second souffle au développement du parc de véhicules électriques.

Objectifs

Le cahier des charges peut être récapitulé par le tableau suivant :



La "FUN-TEC"

Charge utile maximum	100 Kg
Vitesse moyenne	45 Km/h
Vitesse maximum	60 Km/h
Accélération	De 0 à 45 Km/h en moins de 15 s
Autonomie	15 min. ou 10 Km
Temps de recharge	8 h

Le châssis, que nous souhaitons motoriser, a été conçu par la société **SECMA**. La "FUN-TEC" est une voiturette carrossée à deux places, homologuée aux **nouvelles normes européennes**. Le véhicule possède deux roues arrière motrices (130/90 x 10) sans différentiel, et deux roues avant directrices (130/90 x 10). Le châssis est en tube d'acier traité anticorrosion par cataphorèse, la coque est roto moulée en polyéthylène haute résistance, la carrosserie en ABS PMMA teinté dans la masse. Les suspensions sont de type Mc Pherson à l'avant et Cantilever mono-amortisseur à l'arrière. La sécurité est assurée grâce à des ceintures de sécurité trois points à enrouleurs, un pare brise feuilleté et des freins à tambours avec répartiteur de freinage. Un frein de parking, un tableau de bord (compteur de vitesse, compteur totalisateur de kilomètres, témoins de phares, témoins de clignotants...), un klaxon, un essuie-glace_lave-glace, des jantes aluminium viennent compléter les équipements.

Longueur :	2,01 m
Largeur :	1,06 m
Hauteur :	1,47 m
Poids à vide :	146 kg
Surface frontale :	1,25 m ²
Volume du coffre :	87 dm ³

Dimensionnement et choix de la motorisation

Caractéristiques mécaniques requises pour l'entraînement d'un véhicule roulant :

L'effort total de résistance (F_r) à l'avancement que doit vaincre le système de motorisation peut s'écrire sous la forme suivante :

$$F_r = F_{\text{roul}} + F_{\text{aéro}} + M \cdot g \cdot p\% + M \cdot \gamma$$

Dans laquelle :

- F_{roul} est la **force de résistance au roulement** liée au coefficient de roulement des pneus. En pratique, avec des pneumatiques modernes à très faible résistance au roulement, avec une pression de gonflage comprise entre 1,8 et 2,2 daN/cm², le coefficient de résistance au roulement (CRR) vaut environ $100 \cdot 10^{-4}$.

L'effort de résistance au roulement vaut :

$$F_{\text{roul}} = \text{CRR}_{\text{moy}} \cdot M \cdot g$$

- CRR_{moy} = couple de résistance au roulement, sur le goudron: $\text{CRR}_{\text{moy}} = 0,0024$
- M est la masse totale en charge (véhicule + tout ce qui est à l'intérieur) : $M = 250 \text{ kg}$
- g est l'accélération de la pesanteur : $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

- $F_{\text{aéro}}$ est la **force de résistance aérodynamique**, proportionnelle à la masse volumique de l'air ($1,28 \text{ kg/m}^3$), au carré de la vitesse relative (compte tenu du vent) par rapport à l'air, à la section frontale S_f du véhicule et à son coefficient C_x de pénétration dans l'air (environ 0,3 à 0,4 habituellement) :

$$F_{\text{aéro}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot C_x \cdot S_f$$

- ρ est la densité de l'air à l'endroit où l'on se situe : $\rho = 1,28 \text{ kg/m}^3$
- V est la vitesse relative par rapport à l'air
- C_x est le coefficient de pénétration dans l'air (donnée constructeur : $C_x = 0.37$)
- S_f est la section frontale de notre véhicule : $S_f = 1,25 \text{ m}^2$

- $M \cdot g \cdot p\%$ est la **force nécessaire, pour vaincre une pente à p%**.

- M est la masse totale en charge (véhicule + tout ce qui est à l'intérieur) : $M = 250 \text{ kg}$
- g est l'accélération de la pesanteur : $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$
- $p\%$ est la pente exprimée en pourcentage

- Enfin, $M \cdot \gamma$ est le **terme dynamique d'accélération** ($\gamma > 0$ pour une accélération et $\gamma < 0$ pour une décélération).

- M est toujours la masse en charge ($M = 250 \text{ kg}$)
- Selon le cahier des charges : $\gamma = 0,83 \text{ m.s}^{-2}$

Rq : Les énergies cinétique et de gravitation peuvent être récupérées si le système de motorisation le permet.

Couple nécessaire aux roues pour obtenir cette force :

$$C_r = F_r \cdot R_r = \left[\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_f \cdot C_x \cdot V^2 + CRR_{\text{moy}} \cdot M \cdot g + M \cdot g \cdot p\% + M \cdot \gamma \right] \cdot R_r \quad (R_r \text{ rayon roue} = 0,14 \text{ m})$$

A **vitesse stabilisée**, la puissance à fournir comprend un terme de frottement proportionnel à la vitesse et un terme de résistance aérodynamique proportionnel au cube de la vitesse. Cependant dans notre cas de fonctionnement où la vitesse reste faible (à moins de 50 km/h, les efforts aérodynamiques sont négligeables), l'effort total ainsi que la puissance sont sensiblement proportionnels à la masse du véhicule :

$$C_s = F_r \cdot R_r \approx [CRR_{\text{moy}} \cdot M \cdot g + M \cdot g \cdot p\%] \cdot R_r$$

Le couple maximal permanent requis à 60 km/h doit donc être voisin de 0,82 Nm pour une pente nulle.

Dans notre cas, une accélération de $0,83 \text{ m.s}^{-2}$ est souhaitée ; il faut pour cela un surcroît de couple transitoire :

$$C_d = F_r \cdot R_r = [M \cdot \gamma] \cdot R_r$$

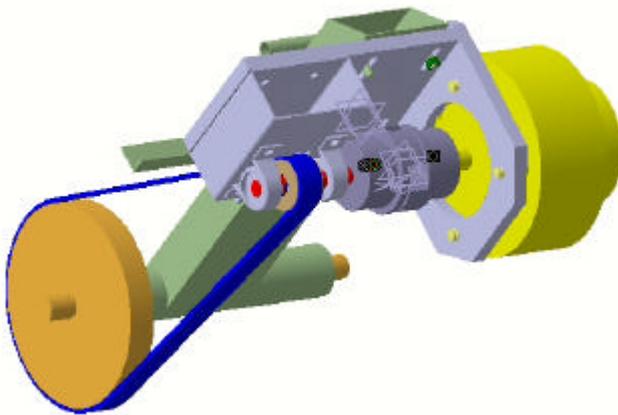
Le couple d'accélération requis doit donc être voisin de 29 Nm pour une pente nulle.

Puissance nécessaire au niveau du moteur

La transmission finale est assurée par un réducteur de type courroie crantée pignons (vue de gauche). Les mécaniciens savent dimensionner ce type de transmission en fonction de la puissance à transmettre. Il était de plus souhaitable qu'il ne soit pas trop volumineux, pour ne pas toucher la coque du véhicule. On obtient finalement un rapport de réduction m :

$$m = \frac{80}{18} = 4,44$$

Le rendement de cette transmission est voisin de 85% cela dépend de la tension sur la courroie. (Le moteur est à droite sur le dessin).



Le couple C_e du moteur devra donc être égal à : $C_s + C_d$ majoré de 20 % pour prendre en compte les différents couples de pertes dans la transmission.

$$C_e = 1,2 \cdot \frac{1}{m} F_r \cdot R_r = 1,2 \cdot \frac{1}{m} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_f \cdot C_x \cdot V^2 + CRR_{\text{moy}} \cdot M \cdot g + M \cdot g \cdot p\% + M \cdot \gamma \right] \cdot R_r$$

Soit pour une accélération et une vitesse maximale sur le plat

$$C_e = \frac{C_r}{m \cdot h} = 8,1 \text{ N.m} \quad \text{et} \quad \Omega_e = m \cdot \Omega_r = 530 \text{ rad / s (soit 5000 tr/min)}$$

Nous pouvons donc choisir le moteur équipant la voiture électrique selon le cahier des charges qui nous a été confiés. Voici les caractéristiques principales du moteur nécessaire à notre application :

- $P_e = C_e \cdot \Omega_e = 4500 \text{ W}$
- $\Omega_e = 526,46 \text{ rad / s}$ et $N_e = 5027,3 \text{ tr / min}$
- Tension d'alimentation de 48 V (4 batteries de 12 V chacune en séries)
- Refroidissement par air ambiant

Notre choix de motorisation s'est porté plus particulièrement vers une solution à courant continu présentant l'ensemble moteur + variateur le plus économique (environ 700 €^{HT}).

Le moteur choisi est le moteur électrique Etek™ de *Briggs and Stratton*.



Tension nominale	50 V
Courant nominal	120 A
Puissance nominale	»5 KW
Courant maximum en 1 minute	500 A
Vitesse	5000 tr/min
Rendement	88 %
Poids	10 kg

Performances du moteur sous 75 ° C

Notre choix s'est porté vers ce moteur offrant de nombreux avantages non négligeables.

En voici quelques uns :

- ◆ Une inertie très faible puisque le rotor plat est quasi sans fer
- ◆ La technologie à rotor plat diminue considérablement la résistance de l'induit (pertes extrêmement réduites).
- ◆ La technologie à rotor plat diminue considérablement l'inductance d'induit (dynamique du courant favorisée).
- ◆ Il n'y a pas besoin de hacheur de petite puissance pour créer le champ inducteur, les aimants en terre rare le créent.
- ◆ Malgré sa conception à base d'aimants en terre rare, son coût reste raisonnable.
- ◆ Deux fois plus petit (cela facilite son implantation) et 20% plus léger (seulement 10 kg) qu'un moteur électrique traditionnel, son rapport Puissance/Poids élevée nous permet de ne pas le prendre en compte lors du calcul de la puissance.
- ◆ Fournit une puissance maximale de près de 2,7 ch en continu.



Alimentation du moteur

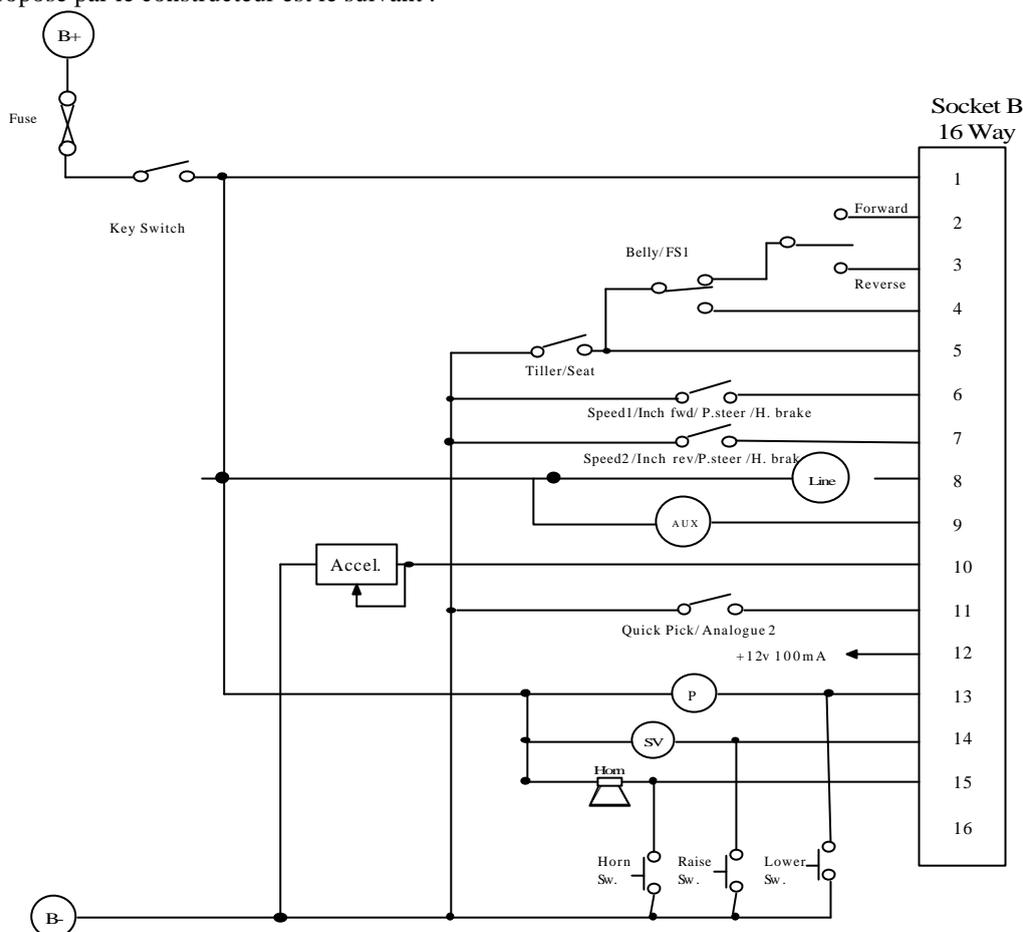
Différentes possibilités s'offrent à nous. Il faut au minimum assurer un freinage récupératif en plus du fonctionnement moteur, pour optimiser l'utilisation de l'énergie embarquée. Une marche arrière est aussi souhaitable. Un hacheur 2 quadrants (avec réversibilité du couple) et une inversion du sens de rotation du moteur grâce à un contacteur est une solution sensiblement aussi coûteuse qu'un hacheur 4 quadrants. Nous nous sommes donc tournés vers cette dernière solution. Le fabricant anglais SEVCON proposait un modèle intéressant et peu coûteux compatible avec notre moteur.

Les caractéristiques sont : 60 V, 325A, électronique de commande numérique entièrement paramétrable grâce à une console séparée.



Schéma de mise en oeuvre commenté (partie commande)

Le schéma proposé par le constructeur est le suivant :



- ◆ Contact de mise sous tension à clef situé sur le tableau de bord : **KEY SWITCH**
- ◆ Contrôle de la présence d'un pilote dans le véhicule : **TILLER/SEAT**
- ◆ Contrôle sécurités (ceinture, niveau batteries correct, chargeur débranché, coffre fermé, etc...) : **BELLY**
- ◆ Interrupteur à trois positions (Marche avant, arrière ou arrêt) : **FORWARD REVERSE**
- ◆ Pilotage du contacteur de puissance : **LINE**
- ◆ Potentiomètre 5k **W** d'accélérateur : **ACCEL**
- ◆ Gestion du freinage électrique récupératif : **ANALOGUE 2**

Nota : Les bornes non commentées ne sont pas utilisées, tous les autres paramètres sont programmés

Quelques adresses utiles pour terminer



- SECMA** (voiture) <http://pro.nordnet.fr/secmavehicule.com/>
tel : 03 27 92 46 46 / fax: 03 27 95 42 42
- SEVCON** (hacheur moteur) <http://www.sevcon.com>
tel : 01 34 10 95 45 / fax: 01 34 10 61 38
- CURTIS** (hacheur) <http://www.curtisinst.com>
tel : 01 53 99 95 40 / fax: 01 53 99 95 69
- ZAPI/URMA** (hacheur) <http://www.zapiinc.com>
tel : 01 45 60 94 77 / fax: 01 46 75 08 71
- HAWKER** (Batterie) <http://www.hawker.invensys.com/francais/produits/hb05-3.htm#traction>
tel : 03 21 60 25 25 / fax: 03 21 73 16 51
- EXIDE** (batteries) <http://www.exide.fr/index.asp>
Batteries DRYFIT de SONNENSCHNEIN

SUPERVISION D'AUTOMATES EN RESEAU SOUS EXCEL

Jean Louis BIANCHI

Professeur en STS Électrotechnique
LP Jules Ferry, 78 000 Versailles

1 Présentation :

A l'heure où l'orientation de l'épreuve professionnelle de synthèse du BTS électrotechnique semble imposer le projet dit «*ensemblier*» sur la base de systèmes à vocation industrielle, et bien que cette démarche nouvelle semble renier un peu plus encore la spécificité électrotechnicienne à vocation plus conceptuelle, il apparaît nécessaire de dégager sur ces bases de nouvelles voies de travail en correspondance avec l'activité du technicien supérieur dans l'industrie.

L'Automate programmable industriel (API) se trouve au centre de ces préoccupations pédagogiques ; au delà des aspects traditionnellement abordés en STS électrotechnique au niveau des applications d'automatisme (interface de capteurs et actionneurs, programmation structurée, gestion des modes de marche), un champ d'étude important semble apparaître concernant

la mise en réseau de ces machines et la supervision des applications.

La mise en réseau suppose la réalisation de bus de terrain permettant l'échange d'informations dans des architectures distribuées. Actuellement ces architectures descendent de plus en plus bas vers les capteurs / actionneurs permettant de déléguer une partie de l'intelligence de l'API vers des capteurs / actionneurs intelligents.

La montée en puissance des réseaux est incontournable, les technologies sont multiples de même que les protocoles utilisés par ces bus de terrains, les outils de supervision sont nombreux et performants mais quels objectifs pédagogiques peut on raisonnablement viser avec des étudiants de STS sans investir le terrain des informaticiens ?

L'expérience simple présentée ici aborde les points suivants :

- Constitution d'un réseau de terrain utilisant un protocole simple de type maître/esclave (type **MODBUS**).
- Mode de communication, structure des échanges entre API dans un protocole de type maître/esclave.
- Description d'un composant logiciel (**ACTIVEX**) exploitable dans l'environnement **WINDOWS** permettant la gestion simplifiée des tâches de programmation destinées aux communications entre un PC superviseur et des API de marque **OMRON**.
- Exploitation de l'**ACTIVEX COMPOLET** de **OMRON** pour une application simple de supervision sous **EXCEL**, par des étudiants non informaticiens.

2 L'application :

On dispose de **trois systèmes convoyeurs identiques**, (voir figure 1), composés de :

- Une partie opérative constituée d'un tapis convoyeur sur lequel est fixé un plateau permettant de positionner des charges mécaniques. Le convoyeur est entraîné par un moteur de type **BRUSHLESS**. Deux capteurs de type inductif situés aux extrémités gauche et droite du convoyeur permettent de déterminer la présence du plateau à ces positions extrêmes.

- Une armoire électrique, permettant la mise en énergie du système et sa commande selon différents modes, comprenant :
 - Un automate programmable de type **OMRON CPM2A**.
 - Un variateur de vitesse **OMRON** pour moteur **BRUSHLESS**.
 - L'équipement électrotechnique de distribution et de protection du matériel et des personnes.

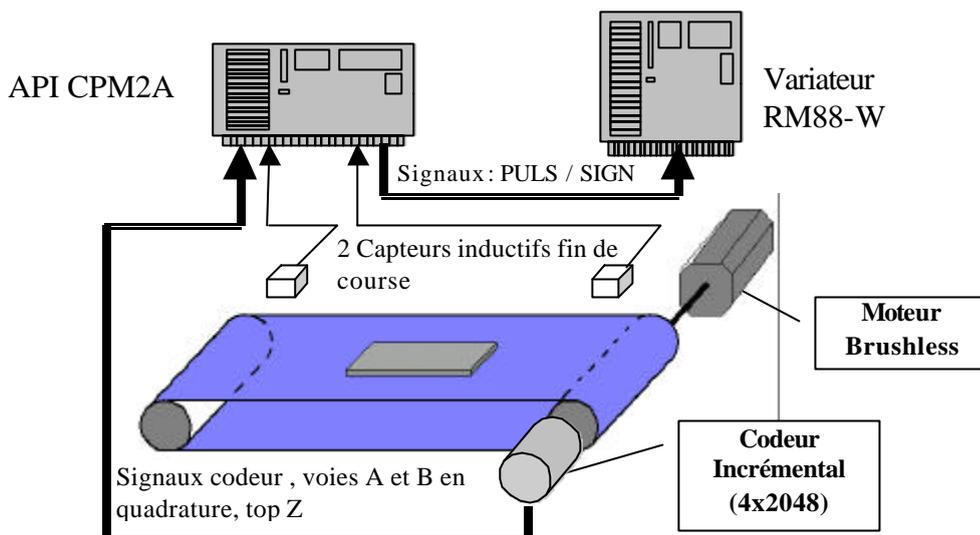


Figure 1 : description de chacun des trois convoyeurs

3 Caractéristiques techniques :

- La vitesse linéaire de défilement maximale est fixée à 1m/s.
- Masse additionnelle de charge transportable maximale : 1Kg.
- Distance entre les extrémités repérées par deux capteurs inductifs *fin de course* : 1 mètre.
- Entraînement direct du tambour par moteur de type *BRUSHLESS*.
- Mesure de position et vitesse par codeur incrémental deux pistes en quadrature de 2048 points par tour; soit une résolution de 8192 points / tour. Le codeur est entraîné par l'axe d'un des deux tambours du convoyeur.
- Le moteur de type *BRUSHLESS* est une machine synchrone autopilotée, équipée d'un codeur incrémental permettant de connaître la position du rotor avec une précision de 8192 pas pour un tour.

- Le variateur de fréquence, associé au moteur *BRUSHLESS*, de référence OMRON RM88-W peut-être commandé par :
 - Entrées analogiques : REF (référence de vitesse) et TREF (référence de couple).
 - **Entrées impulsives** selon le tableau fourni en annexe. C'est la solution qui a été retenue ici.

4 Cahier des charges de l'application :

Le cycle de fonctionnement retenu est volontairement simple : si le plateau convoyeur n'est pas en position initiale (face au fin de course gauche) alors au premier démarrage (front montant de KA1) il vient se positionner en position initiale. Lorsque le plateau se trouve dans cette position, un cycle automatique peut alors être effectué ; il consiste à déplacer plusieurs fois (CYC) le plateau de la position gauche à la position droite puis retour à gauche avec des arrêts à chacune de ces deux positions. Ce GRAFCET (figure 2) traduit le fonctionnement souhaité pour chaque application.

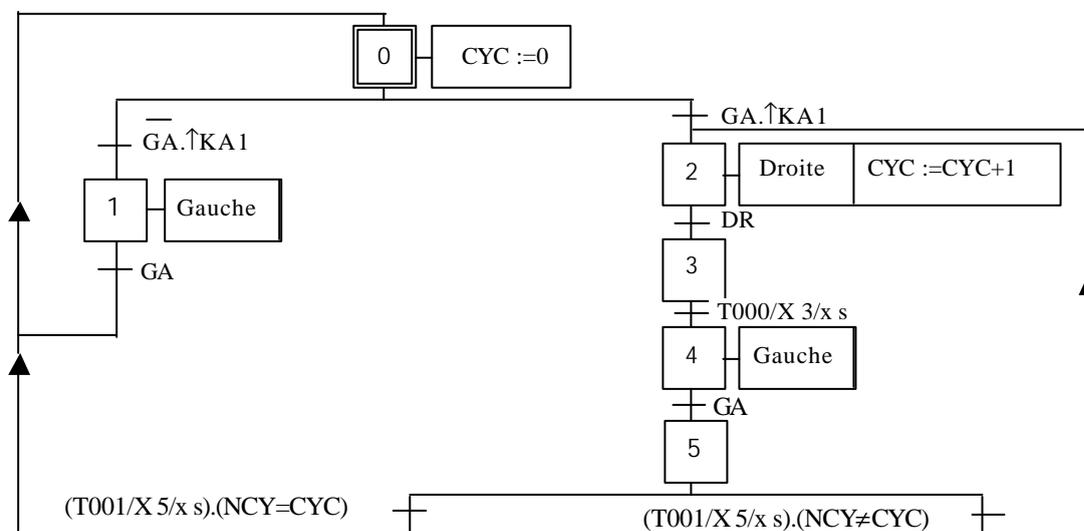


Figure 2 : GRAFCET de chaque application.

La démarche de développement est la suivante :

- Ecriture du GRAFCET à partir du cahier des charges de l'application.
- Affectation des entrées / sorties de l'API.
- Transcription du GRAFCET vers le langage *LADDER* utilisé par les API OMRON, selon une méthode structurée.
- Ecriture et test du programme *LADDER* sur la cible API à l'aide de l'outil de développement *CX PROGRAMMER* de OMRON.
- Rappelons que les automates utilisés ici sont de type CPM2A et que pour un prix très abordable ils proposent en standard :
 - 8 entrées et 4 sorties T.O.R.
 - 2 entrées de comptage d'impulsions grande vitesse (20 KHz) configurable en différents modes parmi lesquels le mode retenu avec signaux en quadrature issus du codeur incrémental.
 - Fonctions de sorties d'impulsions de 10 Hz à 10 KHz, avec rampes d'accélération et décélération programmables (Signaux PULS et SIGN).
 - Entrées et sorties analogiques bipolaires (+/- 10 Volts).
 - 2 ports de communication série type RS232.

5 Cahier des charges de la supervision :

Pour un premier TP il convient de savoir limiter ses ambitions afin de ne pas déplacer la problématique. L'objectif est dans un premier temps, de configurer un réseau de terrain, d'installer les composants logiciels nécessaires à son exploitation sous EXCEL, et d'effectuer quelques tâches simples de supervision de chaque API en réseau.

Nous avons retenu les impératifs suivants :

- Monitoring de chaque API en fonctionnement ; cela consiste à représenter le GRAFCET de l'application en utilisant les cases d'EXCEL pour chaque étape et visualiser l'étape active (inversion ou couleur différente) en temps réel.
- Possibilité depuis le PC de supervision de choisir la durée des temporisations et vitesse de déplacement ainsi que le nombre de cycles désirés pour le mode automatique ce pour chaque API.
- Affichage du cycle en cours.

6 Le réseau de terrain pour la supervision des A.P.I:

Topologie du réseau de terrain avec A.P.I CPM2A (figure 3):

Les automates OMRON CPM2A possèdent deux ports RS232 qui sont scrutés à chaque cycle de l'automate :

- Le port série RS232.
- Le port périphérique RS232 également.

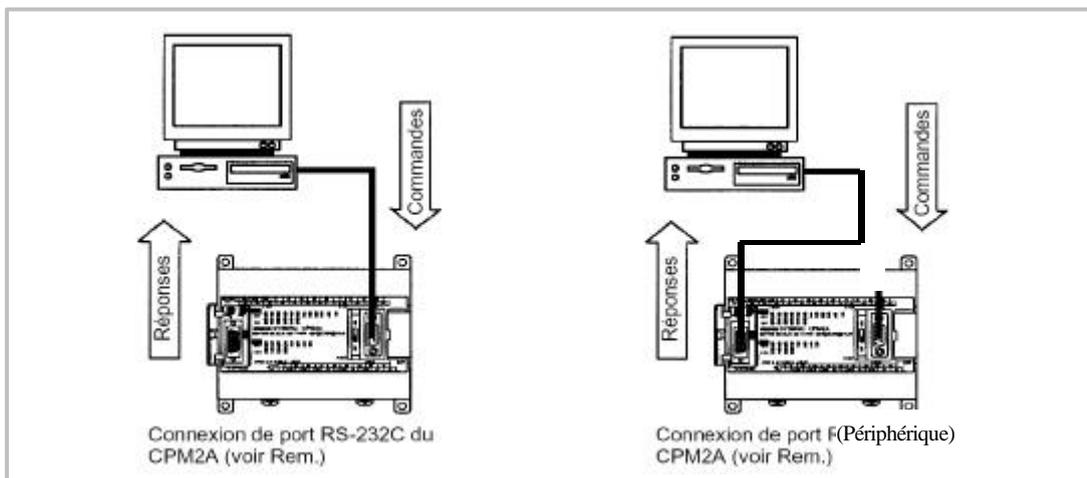


Figure 3 : topologie du réseau de terrain avec API CPM2A

On peut donc communiquer avec l'A.P.I. à partir d'un ordinateur équipé d'au moins un port série RS232. La communication s'effectue selon un protocole de communication de type conversationnel dans lequel

l'A.P.I. renvoie une réponse à une requête de l'ordinateur, que ce soit sur le port RS232 ou sur le port périphérique, comme l'illustre le schéma de la figure 4.

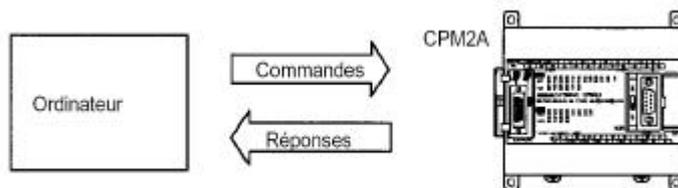


Figure 4 : communication entre API et ordinateur.

Toutefois la jonction RS232C est une jonction de type Bi-point destinée à mettre en relation deux ETDD (Equipement Terminaux de Traitement de Données). Cette liaison est de type asymétrique et se prête donc mal aux communications en milieux perturbés typiques des A.P.I.

Par ailleurs la jonction RS232 étant bi-points, elle ne permet pas de connecter plus d'un A.P.I. pour communiquer avec l'ordinateur et exclut donc la constitution d'un réseau local (ou bus de terrain) mettant l'ordinateur en relation avec plusieurs A.P.I.

On peut placer plusieurs A.P.I. en réseau si on utilise une liaison de type RS422 ou RS485. Ce sont deux jonctions symétriques (mode différentiel) se prêtant donc

mieux aux milieux perturbés et permettant de raccorder 32 stations en Emission/Réception. Dans ce cas toutes les stations sont toujours en écoute, seule la station qui désire émettre passe en basse impédance durant la transmission.

Toutefois, aussi bien l'ordinateur que les A.P.I. connectés sont munis d'un port RS232, il est donc nécessaire de placer sur chaque équipement un coupleur de réseau qui va assurer une conversion RS232/RS422.

On peut utiliser aussi bien le port RS232 que le port périphérique pour constituer le réseau de terrain permettant la **communication de l'ordinateur vers " N " A.P.I.**, comme représenté sur la figure 5.

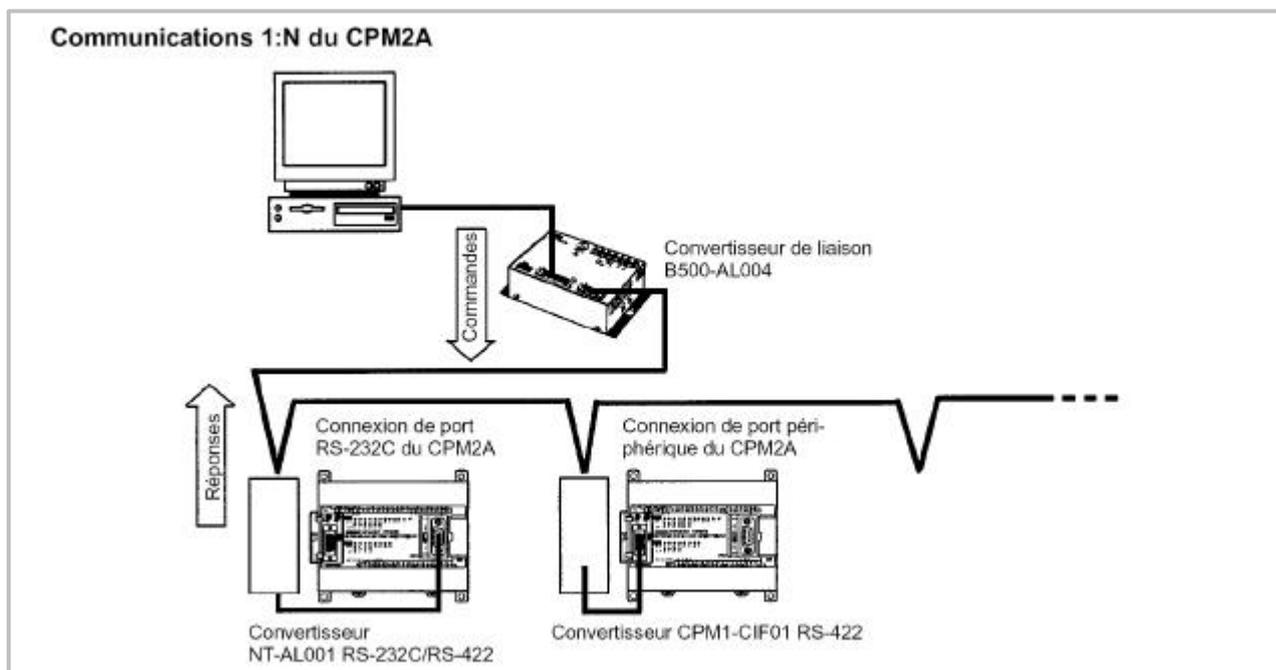


Figure 5 : réseau de terrain permettant la communication de l'ordinateur vers " N " A.P.I.

7 La communication avec les API CPM2A de OMRON :

Cette communication s'effectue indifféremment par le port série RS232 ou par le port dit périphérique RS232 également (notons que si un port est utilisé pour le développement de l'application sous CX Programmer l'autre reste disponible pour la mise en réseau ce qui procure un certain confort de travail).

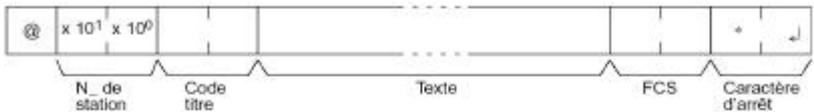
Il s'agit d'un protocole de type conversationnel dans lequel un maître unique (ici le PC superviseur) envoie des requêtes auxquelles répond l'API esclave adressé. Ces

informations binaires délimitées en unités de longueur et de structure bien déterminées sont appelées **TRAMES**.

On distingue donc deux types de trames, les trames de commande émises par le PC et les trames de réponses renvoyées par les API. On notera que chaque trame débute par un caractère identificateur, suivi du numéro de la station API esclave adressée puis du code titre de la fonction demandée ; en fin de trame on note la présence d'un caractère de « checksum » destiné à vérifier l'intégrité du message suivi d'un caractère d'arrêt.

- **Les trames de commande** émises par l'ordinateur ont le format suivant :

Format de commande Pour émettre une commande à partir de l'ordinateur, préparer les données dans le format ci-dessous :



@
Un symbole "@" doit être placé au début.

N. de station
Identifie l'API CPM2A/CPM2C communiquant avec l'ordinateur. Indiquer le numéro de station CPM2A/CPM2C dans la configuration de l'API (DM 6648, DM 6653).

Code titre
Définir le code de commande à 2 caractères.

Texte
Définir les paramètres de commande.

FCS
Définir un code de séquence de vérification de trame (FCS) à 2 caractères. Se reporter à la commande FCS décrite un peu plus loin dans ce chapitre.

Caractère d'arrêt
Définir deux caractères, "*" et le retour chariot (CHR\$(13)) pour indiquer la fin de la commande.

- **Les trames de réponse** émises par l'A.P.I ont le format suivant :

Format de réponse La réponse émise par le CPM2A/CPM2C est au format ci-dessous. Préparer le programme de manière à ce que les données de la réponse puissent être interprétées et traitées.



@, N. de station, Code titre
Un contenu identique à celui de la commande est retourné.

Code de fin
L'état de fin de la commande (par ex., s'il s'est produit une erreur ou non) est retourné.

Texte
Du texte est retourné uniquement lorsque des données telles que des données en lecture existent.

FCS
Le code de séquence de vérification de trame (FCS) défini à 2 caractères est retourné.

Caractère d'arrêt
Définir deux caractères, "*" et le retour chariot (CHR\$(13)) pour indiquer la fin de la réponse.

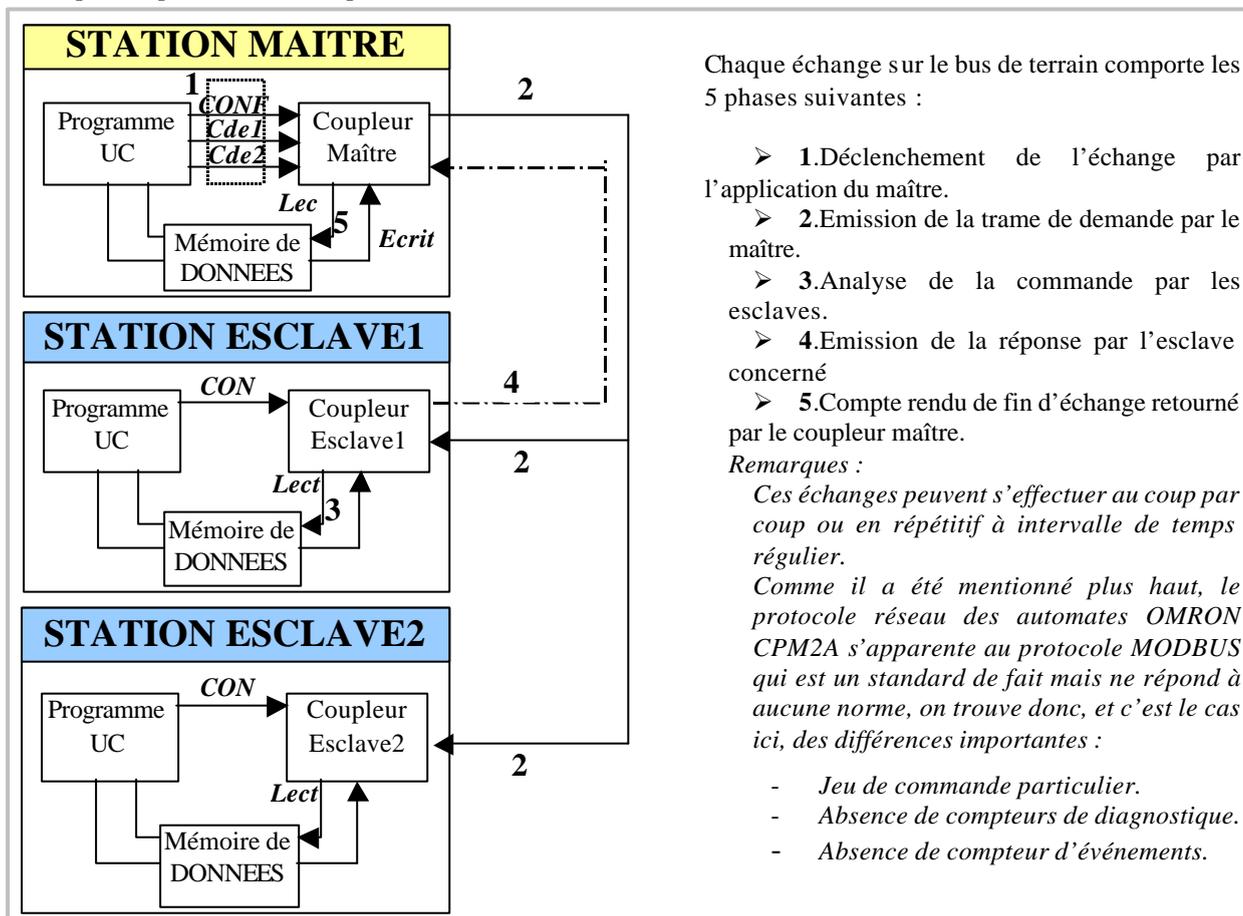
8 Principe des échanges :

La mise en oeuvre du réseau consiste à :

- Configurer le coupleur (**CONF**) au niveau de chaque station (format, vitesse, numéro d'esclave, etc..).
- Envoyer, au niveau de la station Maître, périodiquement au coupleur les commandes

(**CDEi**) d'échange en lecture ou écriture de mots. Ces échanges concernent généralement le maître et un seul esclave.

La figure 6 représente la configuration et le séquençement des échanges entre un maître et deux esclaves.



Chaque échange sur le bus de terrain comporte les 5 phases suivantes :

- 1. Déclenchement de l'échange par l'application du maître.
- 2. Emission de la trame de demande par le maître.
- 3. Analyse de la commande par les esclaves.
- 4. Emission de la réponse par l'esclave concerné
- 5. Compte rendu de fin d'échange retourné par le coupleur maître.

Remarques :

Ces échanges peuvent s'effectuer au coup par coup ou en répétitif à intervalle de temps régulier.

Comme il a été mentionné plus haut, le protocole réseau des automates OMRON CPM2A s'apparente au protocole MODBUS qui est un standard de fait mais ne répond à aucune norme, on trouve donc, et c'est le cas ici, des différences importantes :

- Jeu de commande particulier.
- Absence de compteurs de diagnostique.
- Absence de compteur d'événements.

Figure 6 : configuration et séquençement des échanges entre un maître et deux esclaves.

9 Commandes A.P.I :

On peut ainsi envoyer des commandes à l'A.P.I. permettant de lire ou écrire dans ses différentes zones mémoires selon son mode de fonctionnement ; L'API possède en effet trois modes de fonctionnement (Programm, Monitor et Run) dans lesquels les opérations d'écriture ou lecture à partir des ports de communication et donc du réseau ne sont pas toutes forcément possibles.

Parmi les commandes qui ont été utilisées citons :

- Lecture/écriture de la zone mémoire HR : cette zone (Holding Relays) contient un ensemble de bits mémoire sauvegardés à la coupure d'alimentation API. Nous avons utilisé ces bits pour mémoriser les bits d'état de la machine séquentielle (mémoire d'étapes GRAFCET) ; sa lecture nous permet donc de savoir à tout moment quelles sont les étapes actives et donc dans quel état se trouve l'application.

- Lecture/écriture de la zone IR : cette zone est celle des bits image de l'état des entrées/sorties.
- Lecture/écriture de la zone AR : cette zone (Auxiliary Relays) contient un ensemble de bits mémoire non sauvegardés en cas de coupure de l'alimentation, elle a été utilisée pour mémoriser l'état des transitions GRAFCET.
- Lecture/écriture de la zone DM : cette zone contient des mots mémoires (16 bits). Elle a été utilisée pour mémoriser les paramètres tels que le nombre de cycles à effectuer, la durée de telle ou telle temporisation, la vitesse de déplacement etc..

Les tableaux 1, 2 & 3 suivants résument les différentes affectations mémoire.

Tableau 1 :Table des affectations en sortie

Actionneurs	Sorties A.P.I.	Affectation variable A.P.I.(Zone IR)	Commentaire
PULS	0	Port 000	Port 000 impulsions
SIGN	1	010.01	Sortie Sens
H1	2	010.02	Voyant
KM1	3	010.03	Validation
CN1	4	010.04	Validation variateur

Tableau 2 :Table d'affectation des variables internes .

Variables	Commentaire	Adresse Interne	Zone A.P.I.
CYC	N° cycle en cours	DM003	DM(16bits)
NCY	Nombre de cycles à effectuer	DM000	DM(16bits)
T000	Temporisation position droite	DM012	DM(16bits)
T001	Temporisation position gauche	DM010	DM(16bits)
SP_DR	Vitesse mouvement droit	DM005	DM(16bits)
SP_GA	Vitesse mouvement gauche	DM006	DM(16bits)

Tableau 3 : affectation des bits d'état du GRAFCET .

ETAPE	Activation (SET)	Désactivation(RESET)	Bit d'état(Zone HR)
X0	AR10.00 + AR10.08+AR10.02	AR10.01+AR10.03	HR00.00
X1	AR10.01	AR10.02	HR00.01
X2	AR10.03+AR10.07	AR10.04	HR00.02
X3	AR10.04	AR10.05	HR00.03
X4	AR10.05	AR10.06	HR00.04
X5	AR10.06	AR10.07+AR10.08	HR00.05

10 Les outils pour la supervision:

La supervision va consister à venir lire ou écrire dans les différentes zones mémoires de l'API à partir du poste PC maître par l'intermédiaire du réseau. Cela suppose donc qu'on écrive un programme d'application dans l'environnement Windows capable de :

- Réaliser une interface graphique utilisateur.
- Former les trames de requêtes vers les API.
- Analyser les réponses API.
- Assurer la gestion des erreurs.

Ces tâches peuvent être réalisées à partir de plusieurs outils de développement dans l'environnement Windows, certains logiciels permettent de réaliser des interfaces graphiques plus ou moins conviviales assez facilement ; dans tous les cas un certains nombre de tâches bas niveau répétitives devront être réalisées comme la formation des trames, l'analyse des trames de réponse, l'ouverture des ports de communication. Ces tâches sont considérablement réduites si on utilise les composants logiciels fournis par OMRON et notamment l'ActiveX COMPOLET.

L'activeX COMPOLET :

Le composant logiciel SYSMAC COMPOLET distribué par OMRON, permet lorsqu'il est installé sur un PC maître de réseau, de faciliter la gestion de certaines tâches des programmes d'application destinés aux communications entre maître PC et A.P.I. OMRON.

Ainsi, parmi les fonctions qu'incorpore le composant logiciel COMPOLET, nous trouverons les plus importantes:

- Lecture ou écriture de l' adresse réseau d'un esclave A.P.I.
- Lecture ou écriture des différentes zones mémoires d'un A.P.I. esclave.
- Paramétrer le time out des temps de réponse A.P.I.
- Mise à l'heure ou lecture de l'horloge d'un A.P.I.
- Lecture et initialisation du temps de cycle A.P.I.
- Lecture ou écriture du mode de fonctionnement d'un A.P.I.
- Information d'état d'erreur de l'A.P.I.

Pour assurer ces fonctions, il est nécessaire que le composant logiciel (activeX) FINSGATEWAY soit également installé. Ce composant s'interface dans une couche logicielle inférieure et permet le contrôle des communications pour différents réseaux, notamment : configuration et ouverture des ports série. Ces logiciels sont compatibles Windows 95, 98 ou NT.

Configuration du COMPOLET dans l'environnement EXCEL :

COMPOLET est destiné à une utilisation dans les environnements suivants :

- MICROSOFT EXCEL97.
 - MICROSOFT VISUAL BASIC 6.
- (Toutefois nous avons pu vérifier qu'il s'interface également avec LABVIEW ainsi que VISUAL C++)

Nous utiliserons **EXCEL** pour développer notre exemple d'une application simple de supervision.

A partir de l'écran **EXCEL** après avoir installé FINSGATEWAY et COMPOLET :

- Dans le menu **AFFICHAGE**, (figure 7) sélectionner: **BARRE D'OUTILS** et valider **VISUAL BASIC**

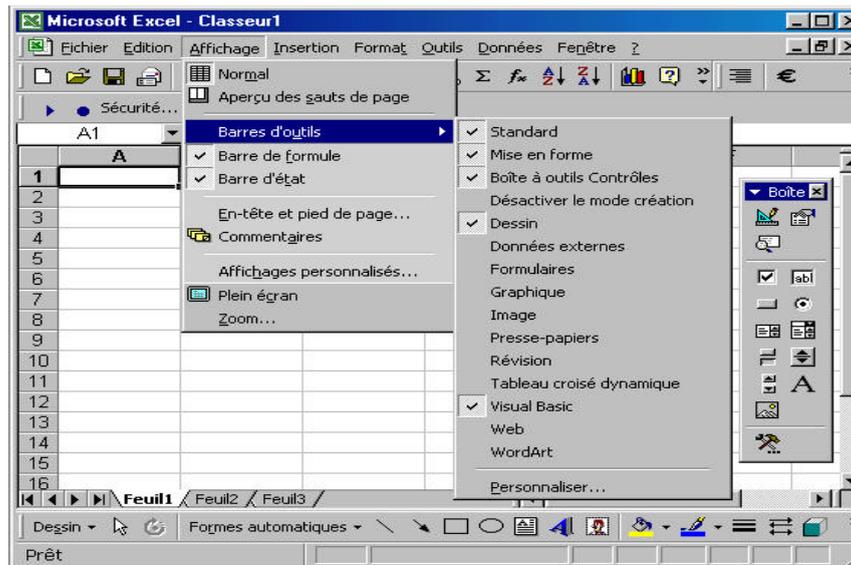


Figure 7 : écran EXCEL

La boîte à outils Visual Basic apparaît alors avec les différents contrôles à disposition. Pour activer le COMPOLET sélectionner dans la boîte à outils de Visual Basic OMRON SYSMAC , figure 8.

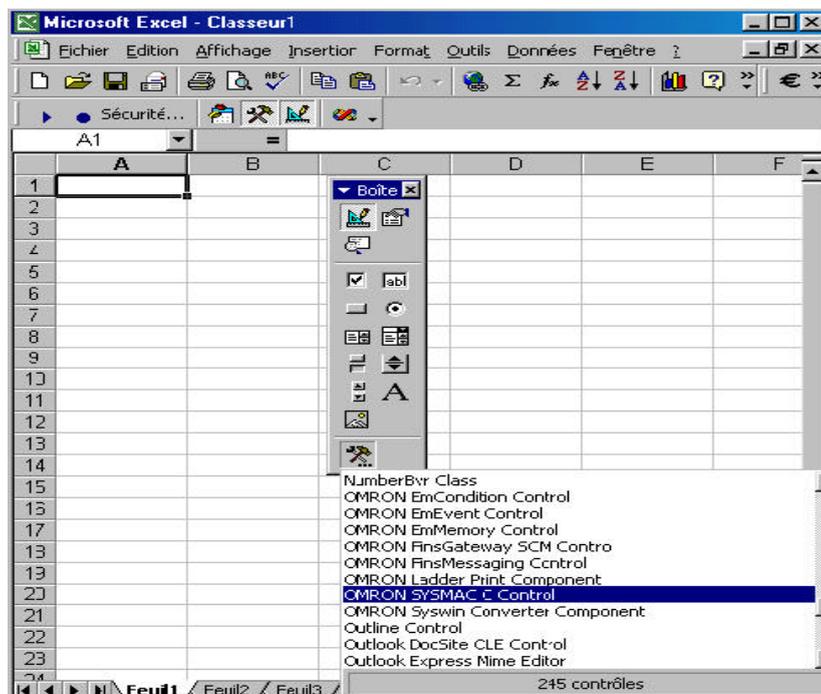


Figure 8

Dès lors, il est possible de placer sur la feuille EXCEL le contrôle *COMPOLET* permettant de disposer des fonctions de communication avec un A.P.I., figure 9.

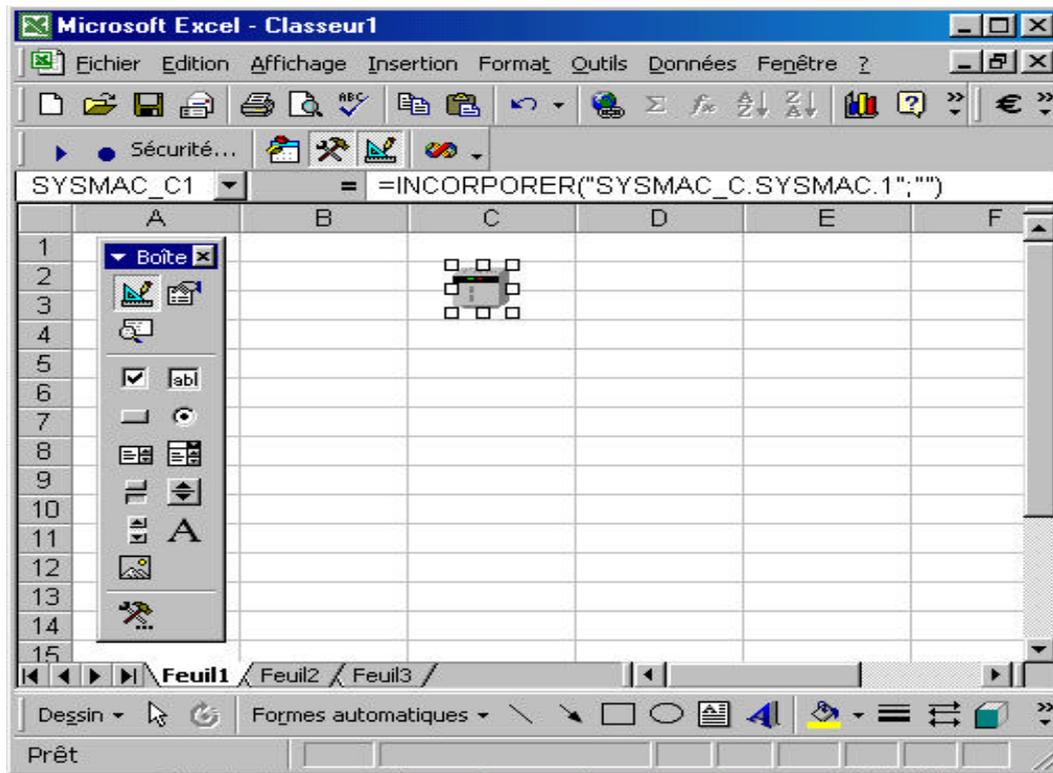


Figure 9

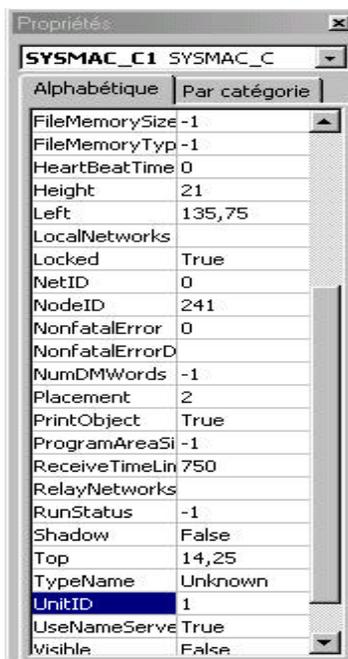


Figure 10

Il est nécessaire de définir pour chaque A.P.I. un contrôle SYSMAC COMPOLET en attribuant pour chaque A.P.I. (figure 10):

- Son numéro de nœud réseau NODE ID à partir de 240.
- Son numéro d'identification d'unité :1 pour API 1...

Puis, configurer le réseau de terrain :

Il est nécessaire de configurer le réseau de terrain en répertoriant tous les automates présents sur le réseau avec comme caractéristiques leur N° de station (Unit ID), l'adresse du nœud (Node address) ainsi que l'adresse réseau (Network address). Ceci est possible par l'intermédiaire de l'outil FINSGATEWAY d'OMRON.

Il est possible alors de supprimer ou de rajouter un automate sur le réseau. Il faut à chaque automate ajouté au réseau configurer son numéro de nœud, le type de l'automate, son protocole ainsi que son N° de station. Voici l'écran FINSGATEWAY permettant cette configuration (figure 11).

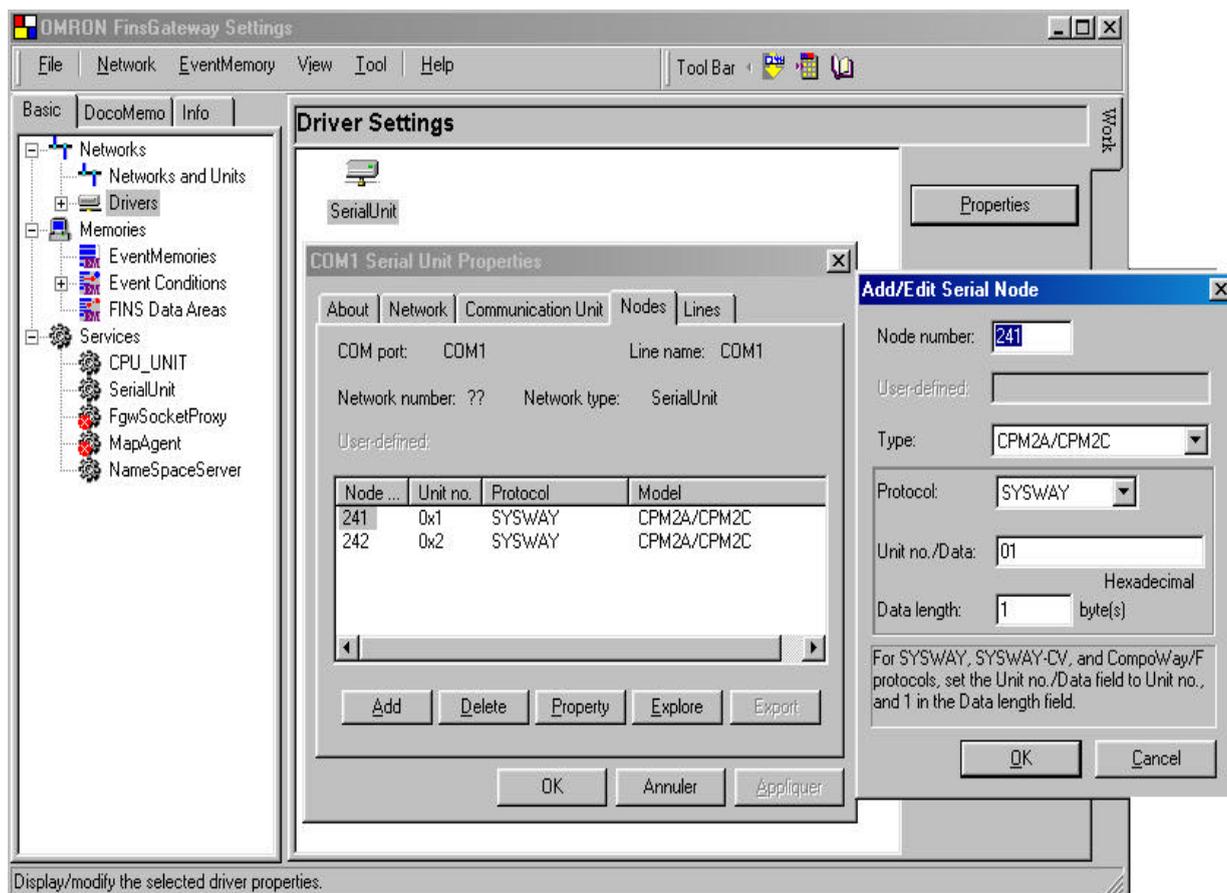


Figure 11.

11 Programmer une commande de communication API à l'aide de COMPOLET :

Compolet met à la disposition du programmeur un certain nombre de fonction commentées dans l'aide associée au logiciel ; parmi les plus importantes nous trouvons :

➤ *Ecrire un mot en mémoire A.P.I :*

Plusieurs zones peuvent être ciblées : **CIO, DM, TIM, CNT, WR, HR, AR.**

La valeur hexadécimale contenue dans la variable « TEXT1 » est placée dans le mot d'adresse 0 de la zone CIO (Entrées/sorties).

```
Text1 = "FFFF"
SYSMAC_C1.CIO(0) = CLng("&H" & Text1)
```

➤ *Lire un mot en mémoire A.P.I:*

Plusieurs zones peuvent être ciblées : **CIO, DM, TIM, CNT, WR, HR, AR.**

La valeur hexadécimale contenue dans le mot DM d'adresse 100 et placée dans la variable chaîne de caractère : Text1

```
Text1 = Hex$(SYSMAC_C1.DM(100))
```

➤ *Attribuer un numéro de noeud réseau et un numéro de station à l'A.P.I :*

```
SYSMAC_C1.Active = False
SYSMAC_C1.NodeID = CInt(Text2)
SYSMAC_C1.UnitID = CInt(Text3)
SYSMAC_C1.Active = True
```

Exemple: Lire le mot DM (000) de l'A.P.I à partir d'une feuille EXCELL, afficher ce mot dans la cellule A1 de la feuille1 après appui sur un bouton de commande :

Placer un bouton de commande sur la feuille ainsi que le contrôle Compolet (figure 12):

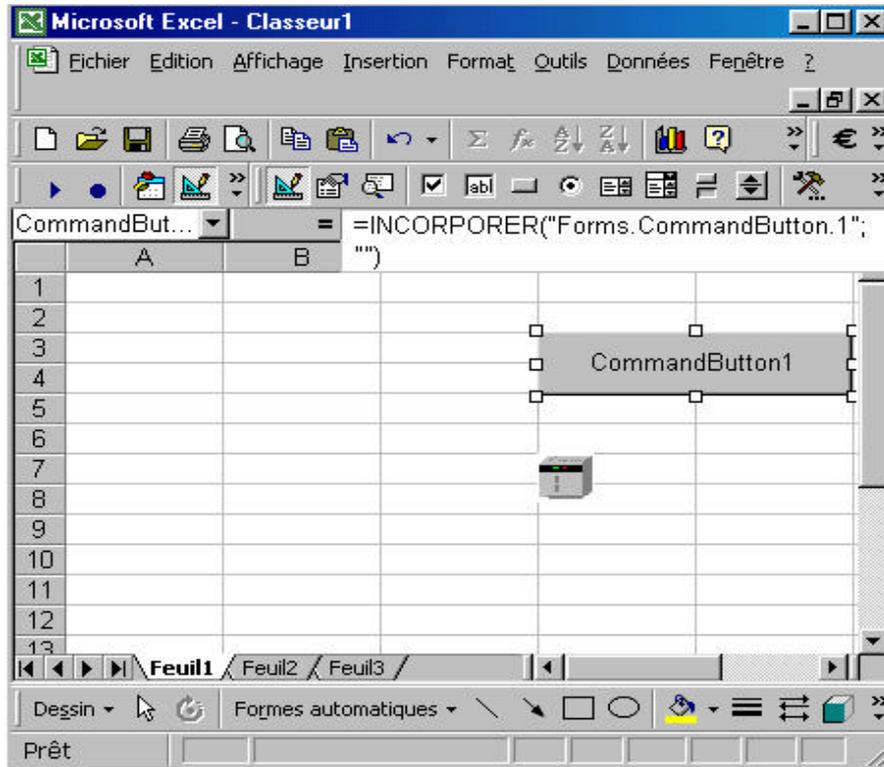


Figure 12

Ecrire le code VB associé au bouton de commande (figure 13):

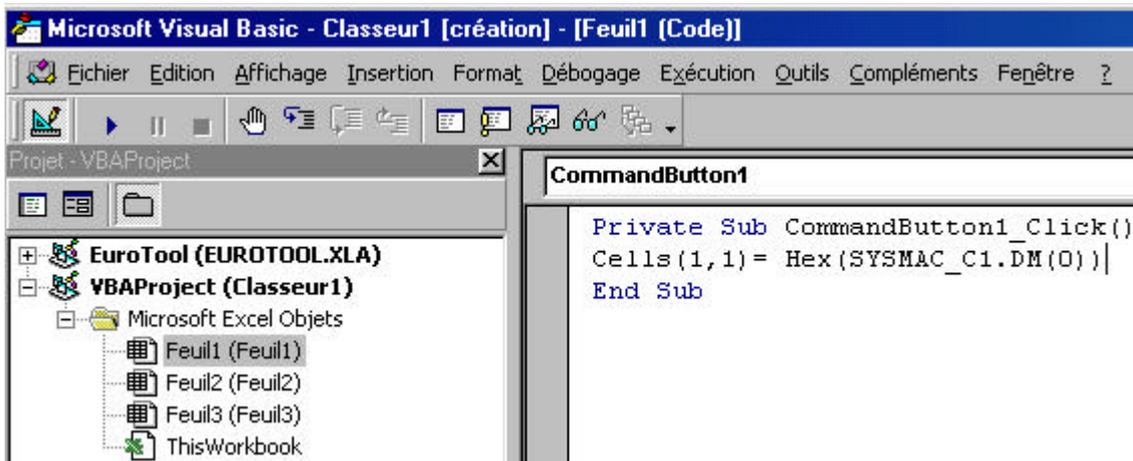


Figure 13

12 La feuille EXCEL de l'application en supervision :

En ce qui nous concerne nous avons choisi d'utiliser EXCEL pour représenter le GRAFCET de l'application et suivre son développement sur l'une quelconque des stations. Le code associé est écrit à l'aide

de VBA (Visual Basic Application disponible sous EXCEL) ; notons toutefois que tous les contrôles VB ne sont pas disponibles sous VBA, c'est le cas notamment et hélas du contrôle Timer. Voici un exemple de feuille EXCEL (figure 14)

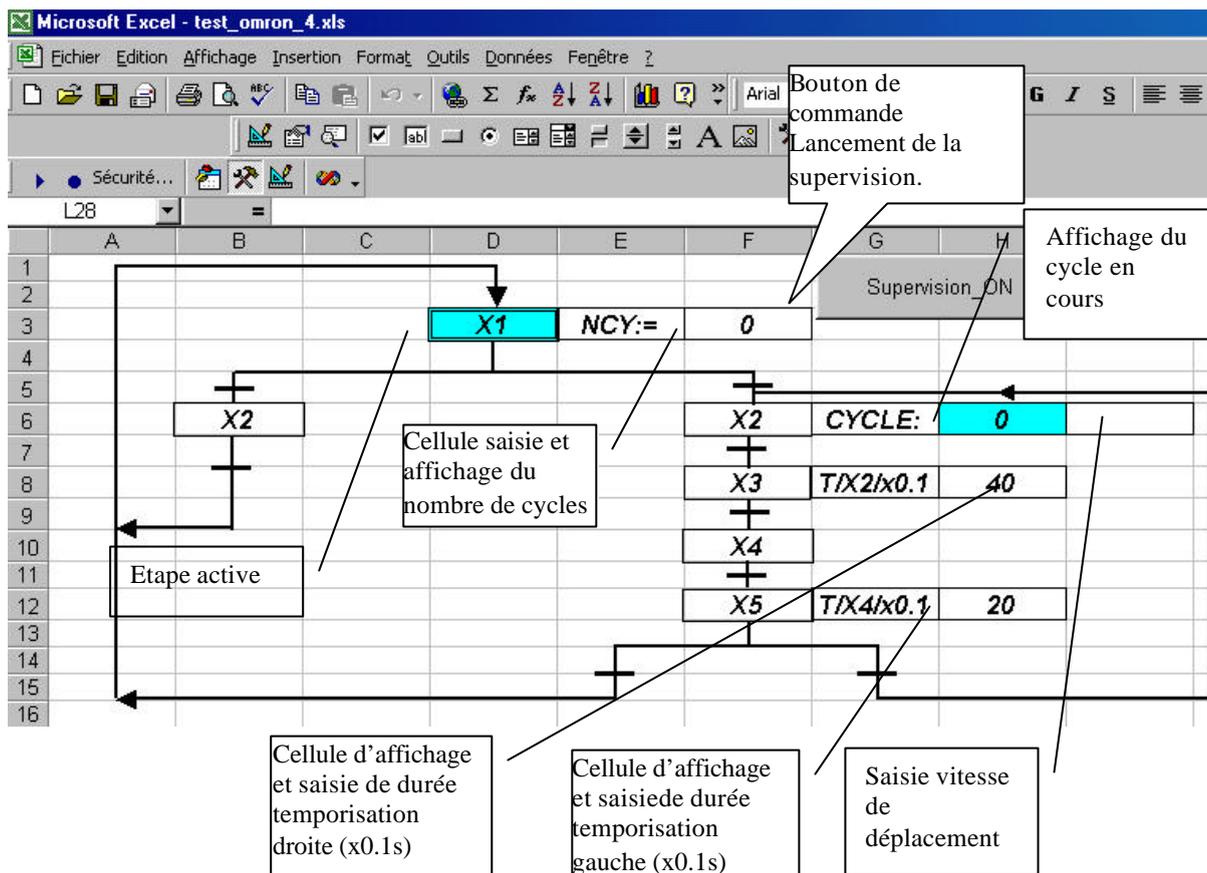


Figure 14

13 Conclusion

Cet exemple propose une première approche de la supervision pour des élèves de STS électrotechnique ; les outils matériels et logiciels utilisés ne demandent pas d'investir trop lourdement le domaine de l'informatique industrielle. Par ailleurs, ces outils ou leurs équivalents, notamment les composants logiciels, existent chez la plupart des constructeurs d'automates.

Le protocole mis en oeuvre ici est de type maître esclave, c'est un des plus répandus et son principe est ancien . Il permet néanmoins dans une deuxième phase d'aborder des aspects plus conceptuels tels que :

- Contraintes de la supervision sur la gestion du processus.
- Notions de temps critique.
- Performances du bus de terrain (gestion des collisions, latences etc...).

- Utilisation d'un véritable logiciel de supervision.

Un prolongement intéressant de ce travail pourra consister à faire coexister ce type de bus de terrain avec d'autres bus plus spécifiques sur le même site, notamment :

- Les bus de bas niveau destinés à la gestion des capteurs, le bus ASI par exemple ou le bus DEVICENET qui utilise le protocole CAN très répandu dans l'industrie automobile.
- Les bus de niveau plus élevé destinés à ouvrir le site sur des réseaux de type INTRANET ou INTERNET, de plus en plus de constructeurs proposent notamment des API incorporant une pile TCP/IP.

L'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE ENTRE DANS LA CUISINE

Gilles FELD, Emmanuel HOANG, Jean Marie DÉSAGULIER

Département EEA, ENS Cachan 61 Avenue du Président Wilson, 94235 Cachan

Introduction : Le texte qui suit, présenté aux journées 3EI 2003, pourrait être le compte rendu de travaux pratiques aussi bien d'étudiants en préparation à l'agrégation de génie électrique que d'un étudiant en préparation à l'agrégation de physique, option physique et électricité appliquées. Les différents thèmes abordés, à travers l'étude de cette plaque de cuisson domestique sont :

Bilan énergétique

Identification comportementale d'un système électromagnétique

Etude d'un onduleur à résonance

Amélioration du facteur de puissance



Figure 1 : Plaque à induction



Figure 2 : Les inducteurs

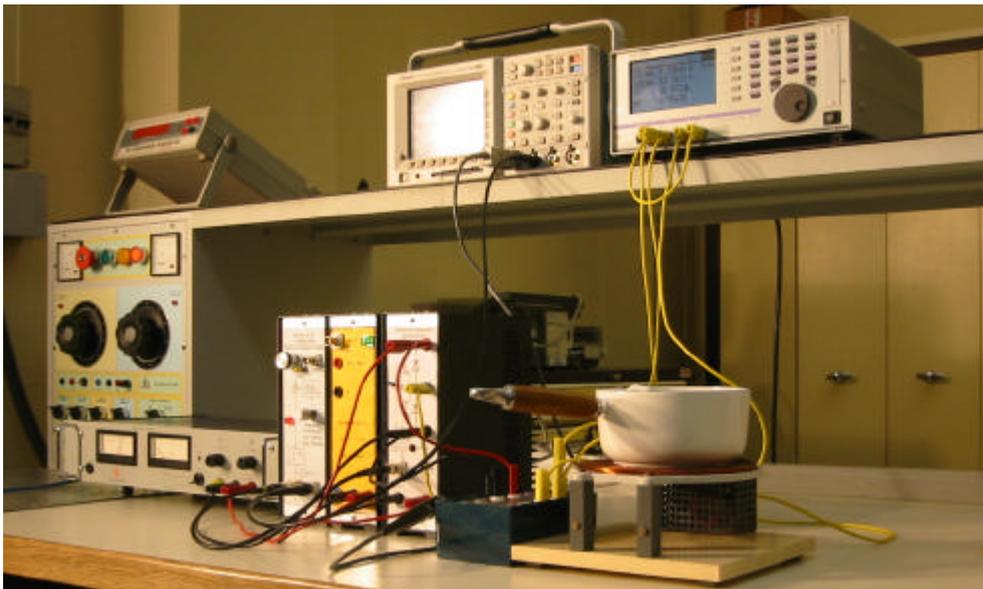


Figure 3 : La manipulation

1 Principe du chauffage par induction.

Un inducteur, constitué d'un enroulement en spirale en fil de Litz, produit un champ magnétique variable dans un matériau conducteur (la casserole). Celui-ci est donc siège d'un courant induit, qui chauffe le matériau et, par conduction, les aliments.

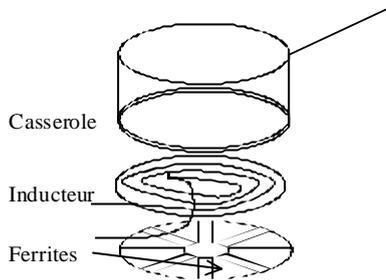


Figure 4: Les éléments constituant le transformateur équivalent

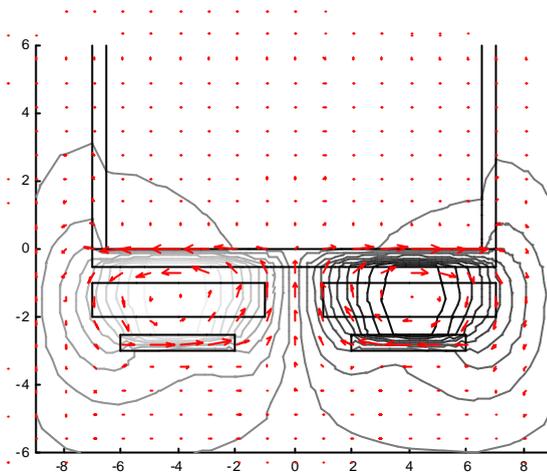


Figure 5: Carte éqiflux

Il est à noter que le fond de la casserole joue à la fois le rôle :

- ✓ de circuit magnétique
- ✓ d'enroulement secondaire

2 Modèle de l'ensemble inducteur-casserole.

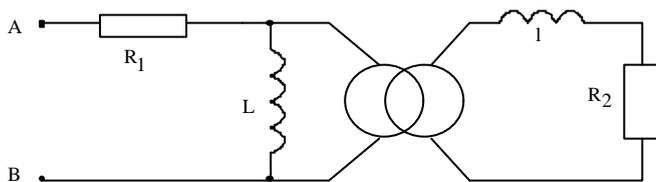


Figure 6-a : Transformateur équivalent

- R_1 : Résistance du bobinage inducteur.
- R_2 : Résistance équivalente correspondant aux courants induits dans la casserole
- L : Inductance de magnétisation
- l : Inductance de fuites

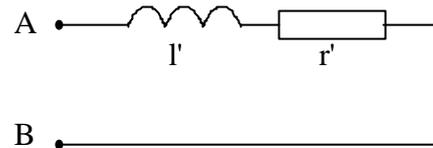


Figure 6-b : Dipôle équivalent

Le champ d'induction créé par les courants circulant dans le fond de la casserole a tendance à s'opposer au champ inducteur. Il en résulte que la profondeur de pénétration des courants, donc les paramètres du dipôle équivalent sont fonctions de la fréquence.

La détermination expérimentale des éléments du modèle sera effectuée en utilisant une méthode de résonance pour différentes valeurs de capacité du condensateur. La mesure de la fréquence de résonance et de la puissance absorbée conduisent aux résultats donnés figure 7. En pratique sur les plaques domestiques, les fréquences utilisées vont de 20 kHz à environ 50 kHz, les mesures seront effectuées dans ce domaine.

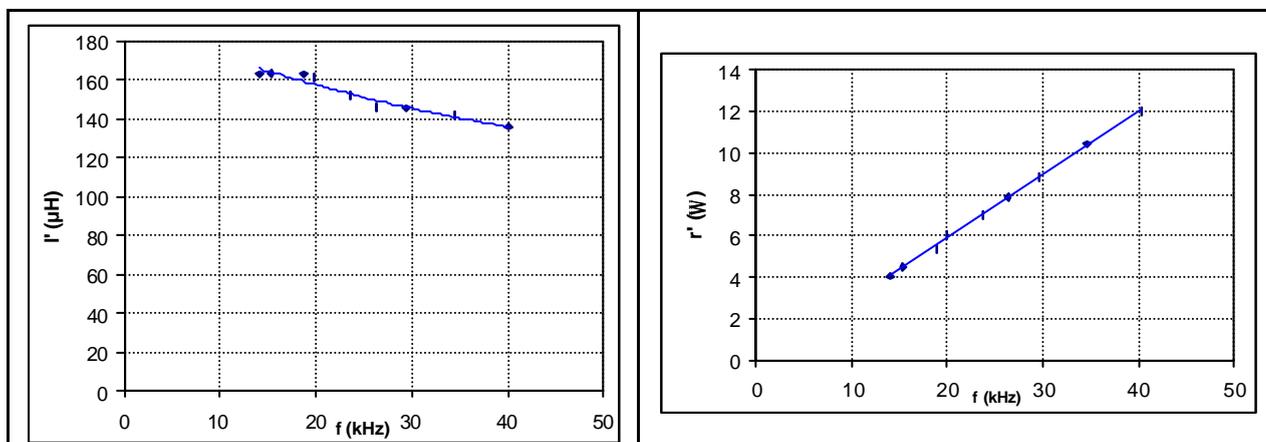


Figure 7: Evolution des paramètres de l'inducteur chargé (inductance l' et résistance r')

3 Intérêt de la résonance.

Pour montrer l'intérêt de la résonance, nous allons comparer les puissances fournies à l'ensemble inducteur-récepteur alimenté par un onduleur commandé en pleine onde à la fréquence f_0 (figure 8) dans les deux cas suivants :

1. Inducteur seul (K fermé)
2. Inducteur en série avec un condensateur de capacité C (K ouvert) telle que $L'C.(2\pi.f_0)^2 = 1$

La figure 9 représente le rapport : courant efficace obtenu dans le cas 2 sur courant efficace obtenu dans le cas 1 en fonction du rapport constante de temps τ sur période avec $\tau = L'/r'$. Pour une fréquence de résonance de 4 kHz, le rapport sur les courants est de 3,6 pour le système inducteur récepteur soit un gain de 13 sur les puissances. L'expérience figure 10 confirme cette prédétermination, le rapport mesuré étant de 11.

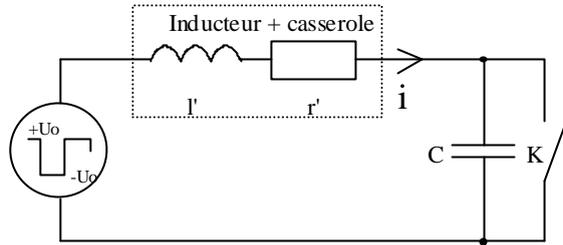


Figure 8 : Schéma d'alimentation permettant la comparaison

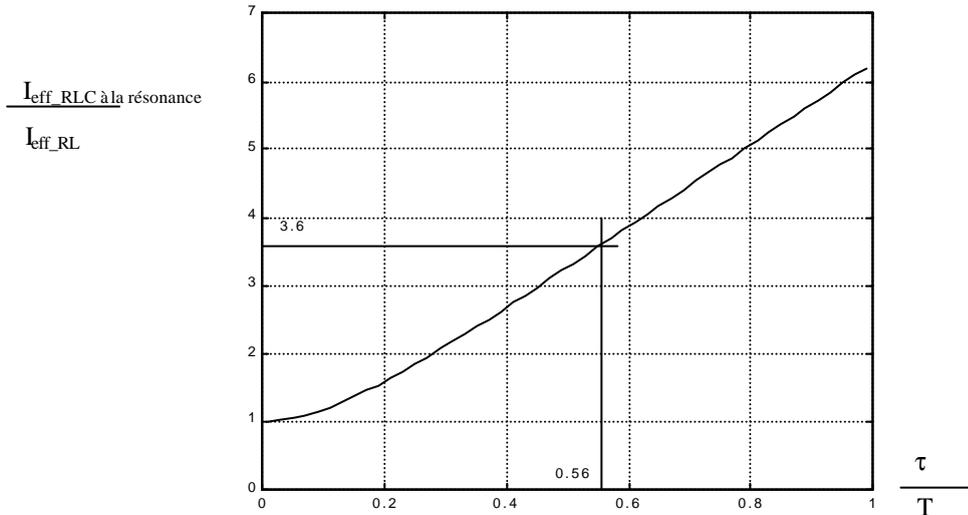


Figure 9 : Gain théorique sur les courants par utilisation de la résonance

Pour des raisons liées au matériel, nous serons amenés à limiter l'excursion de fréquence et à fixer la fréquence de résonance à $f_0 = 14$ kHz. Dans ces conditions, les formes d'ondes sont les suivantes :

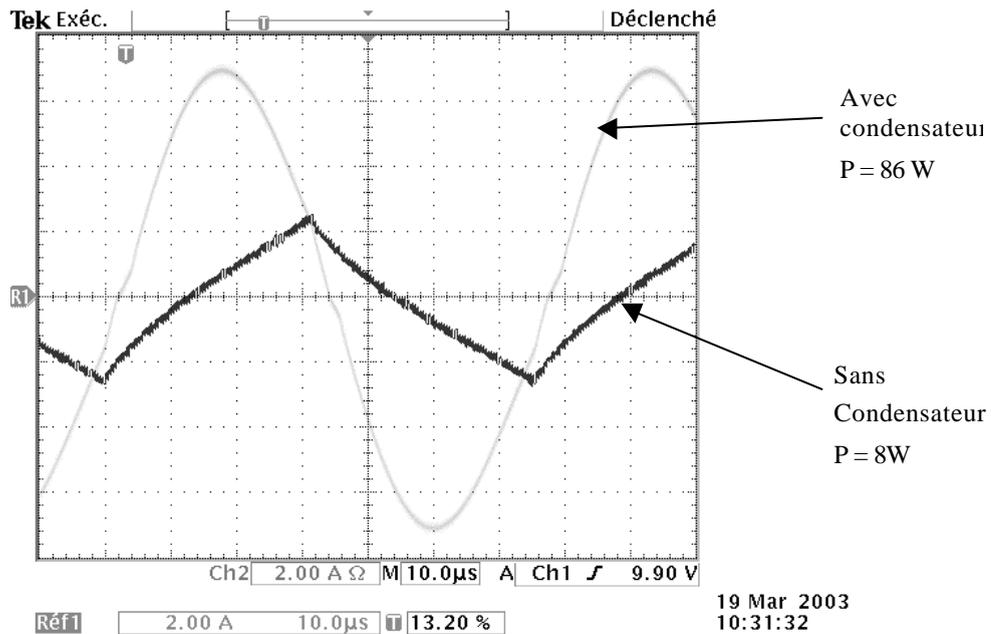


Figure 10 : Courant avec ou sans condensateur de résonance pour $U_0 = 45$ V

A tension et fréquence données, la mise en série avec l'inducteur d'un condensateur, dont la valeur de la capacité est calculée pour correspondre à la résonance, permet d'augmenter la puissance fournie.

3 Réglage de la puissance fournie.

Elle se fera par action sur la fréquence de commande d'un onduleur à résonance.

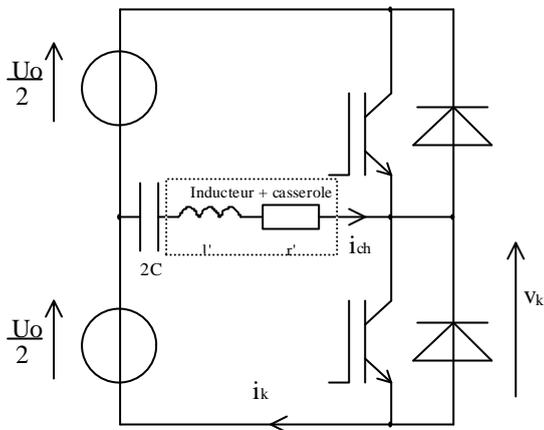


Figure 11-a : Schéma de principe d'un onduleur à point milieu

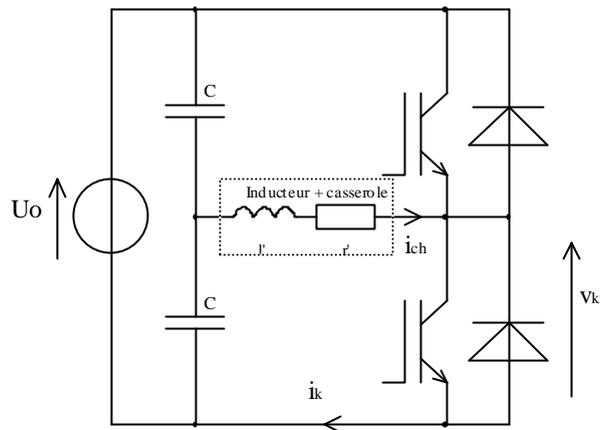


Figure 11-b : Schéma de réalisation de l'onduleur à point milieu

Le montage utilisé est celui de la figure 11b équivalent au montage de la figure 11a à condition que le rapport cyclique de commande des interrupteurs soit de 0,5.

Les différents essais ont été réalisés avec des condensateurs de capacité $C = 330 \text{ nF}$ ce qui fixe la fréquence de résonance à $f_0 \approx 14,5 \text{ kHz}$. Dans ces conditions, on obtient la caractéristique théorique de réglage de la figure 12

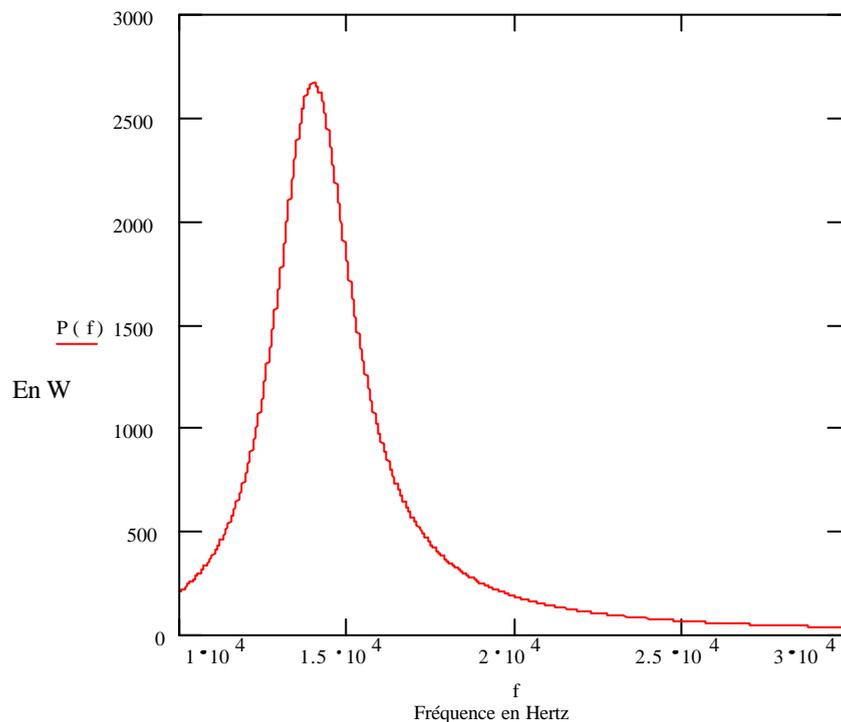


Figure 12 : Caractéristique puissance en fonction de la fréquence

Remarque : Sur les plaques à induction domestiques, le réglage de la puissance s'effectue de deux façons :

- Pour les faibles puissances ($P < 100 \text{ W}$ environ). Commande en train d'ondes avec modification du rapport cyclique.
- Pour les puissances supérieures ($100 \text{ W} < P < 3 \text{ kW}$) : Réglage par la fréquence.

A la résonance, les formes d'ondes sont données par la figure suivante :

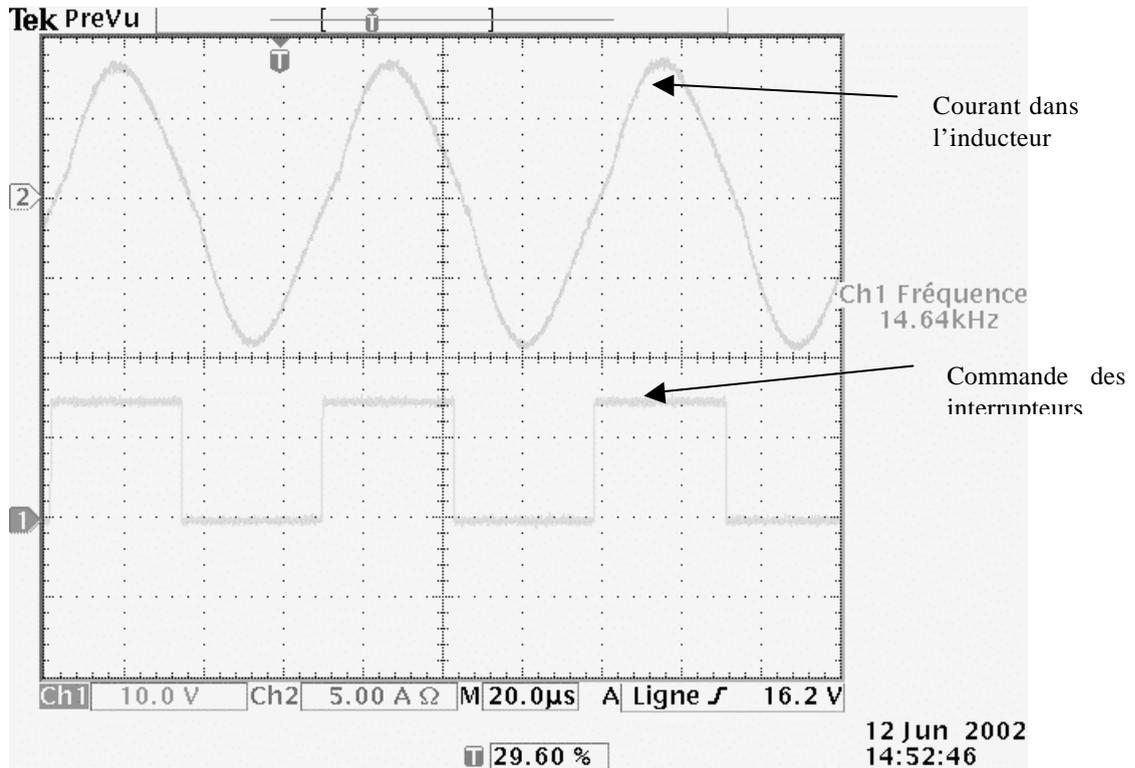


Figure 13 : Courant traversant l'inducteur à la fréquence de résonance

4 Nature des commutations.

La nature des commutations est différente selon que l'on se place avant ou après la fréquence de résonance :

- **Fréquence de commande inférieure à la fréquence de résonance. $f < f_0$**

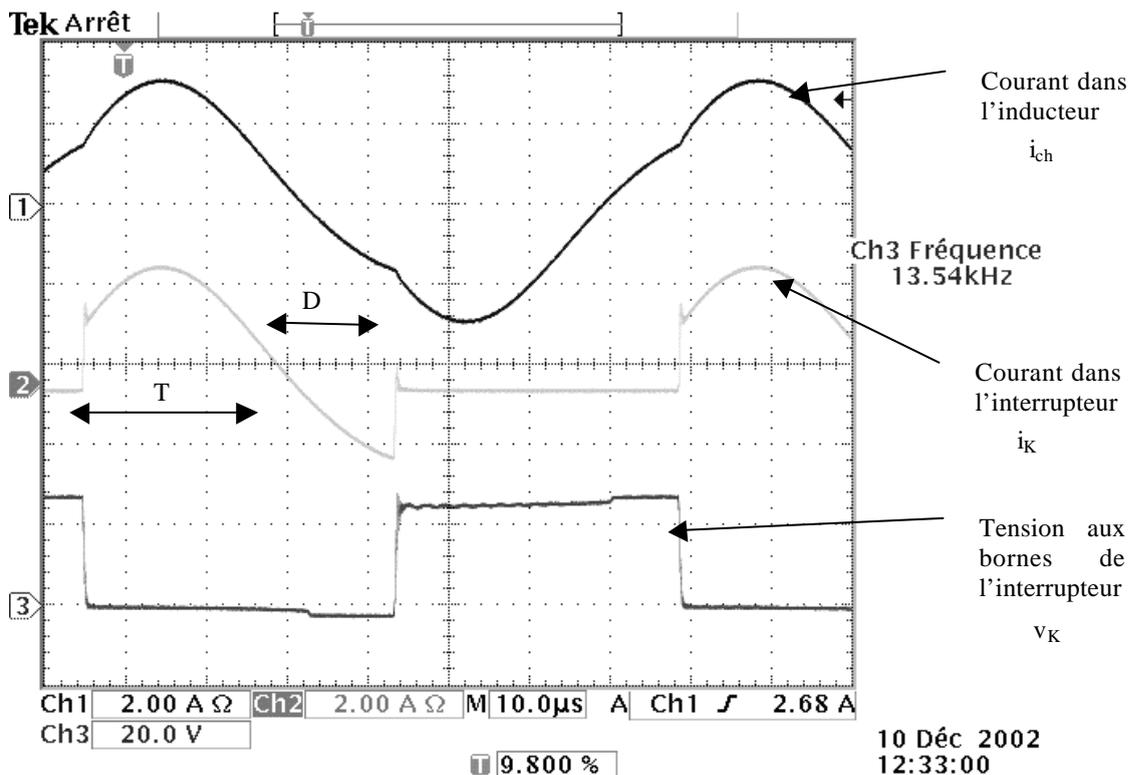


Figure 14 : Formes d'ondes pour $f < f_0$

Pour $f < f_0$, on observe une commutation dure à la mise en conduction du transistor accentuée par la conduction inverse de la diode précédemment conductrice

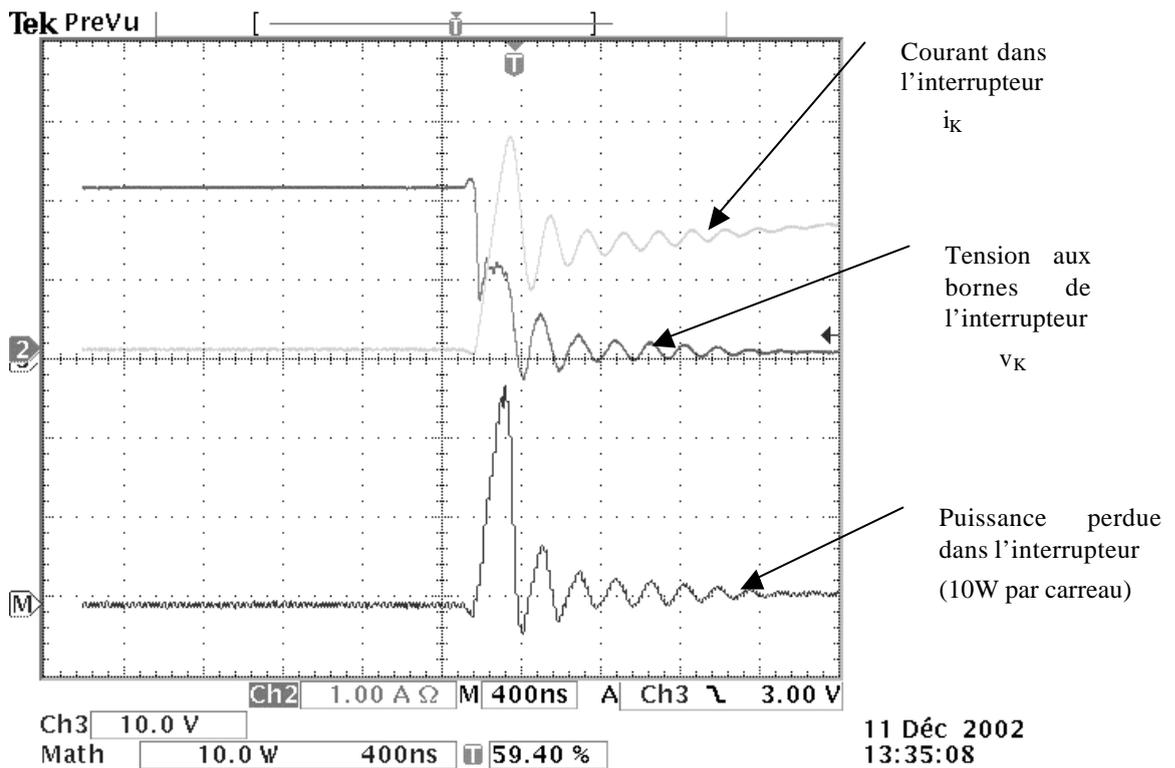


Figure 15 : Loupe sur la commutation dure à la mise en conduction

- Fréquence de commande supérieure à la fréquence de résonance. $f > f_0$

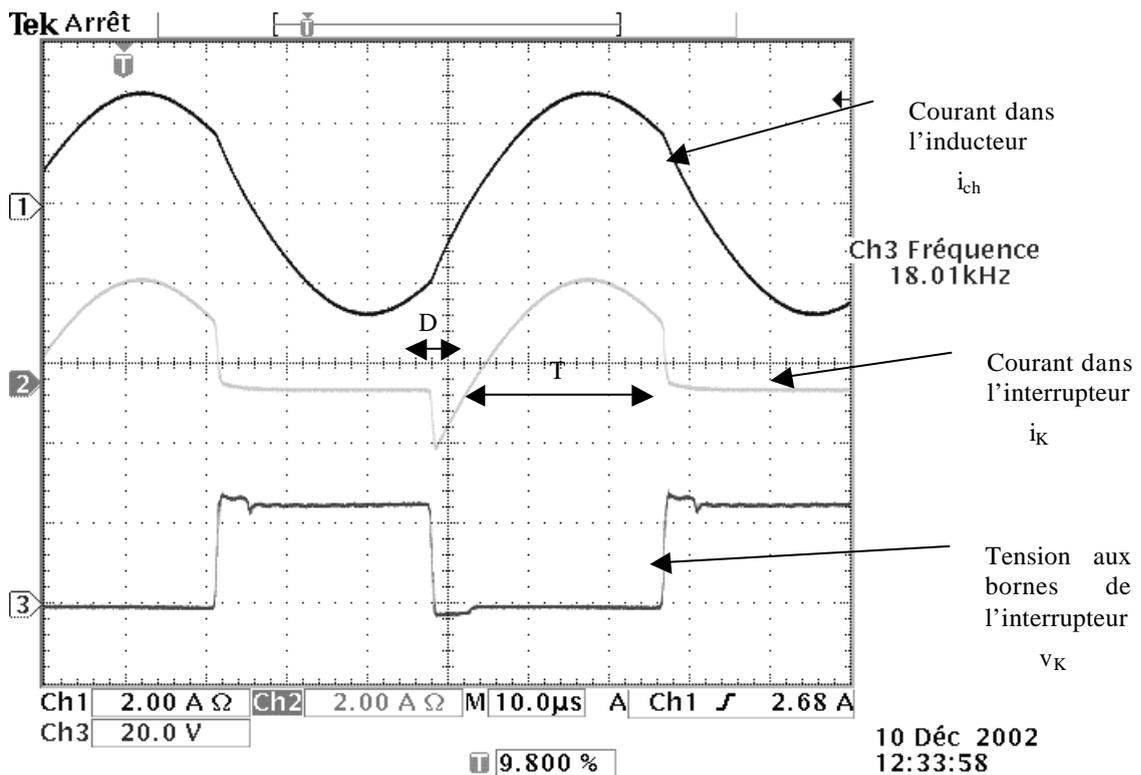


Figure 16 : Formes d'ondes pour $f > f_0$

Pour $f > f_0$, on observe une commutation dure au blocage du transistor

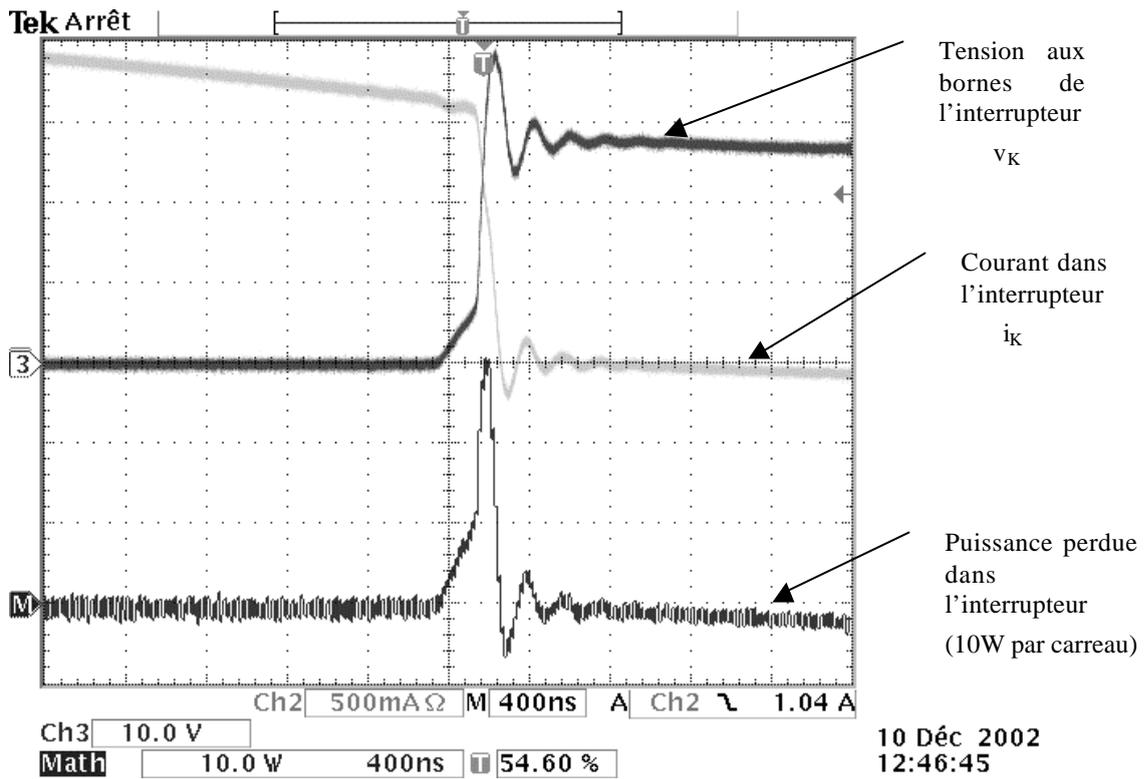


Figure 17: Loupe sur la commutation dure au blocage

A condition que toutes les commutations soient de même nature, il est possible d'adoucir la commutation dure restante, en plaçant un simple condensateur de capacité C_b en parallèle avec l'interrupteur K pour $f > f_0$.

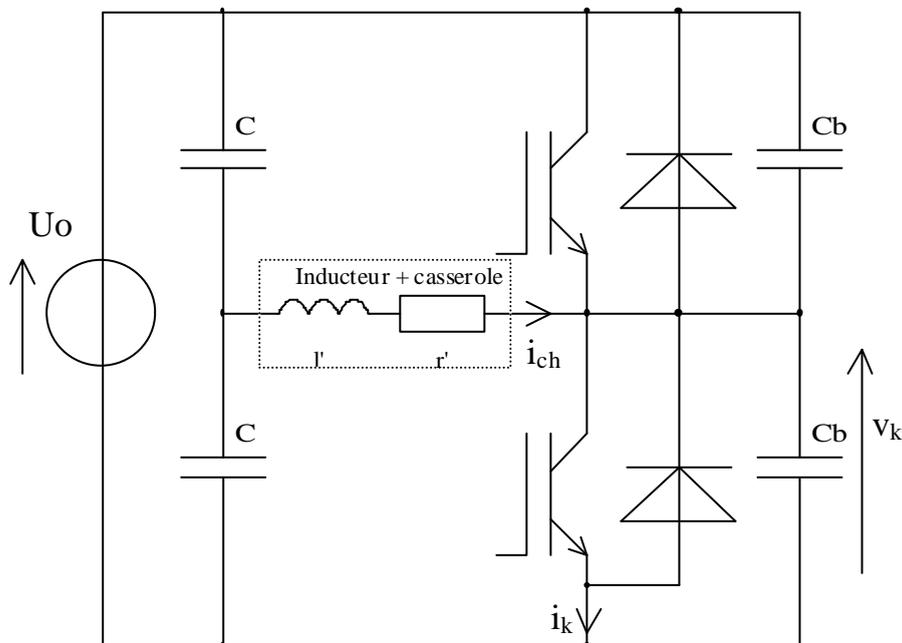


Figure 18 : Schéma permettant d'adoucir les commutations au blocage des transistors

Sur les plaques domestiques, la fréquence de résonance est légèrement inférieure à 20kHz et la plage de réglage est comprise entre 20 et 40 kHz ce qui permet d'utiliser un circuit d'aide à la commutation non dissipatif identique à celui de la figure 18.

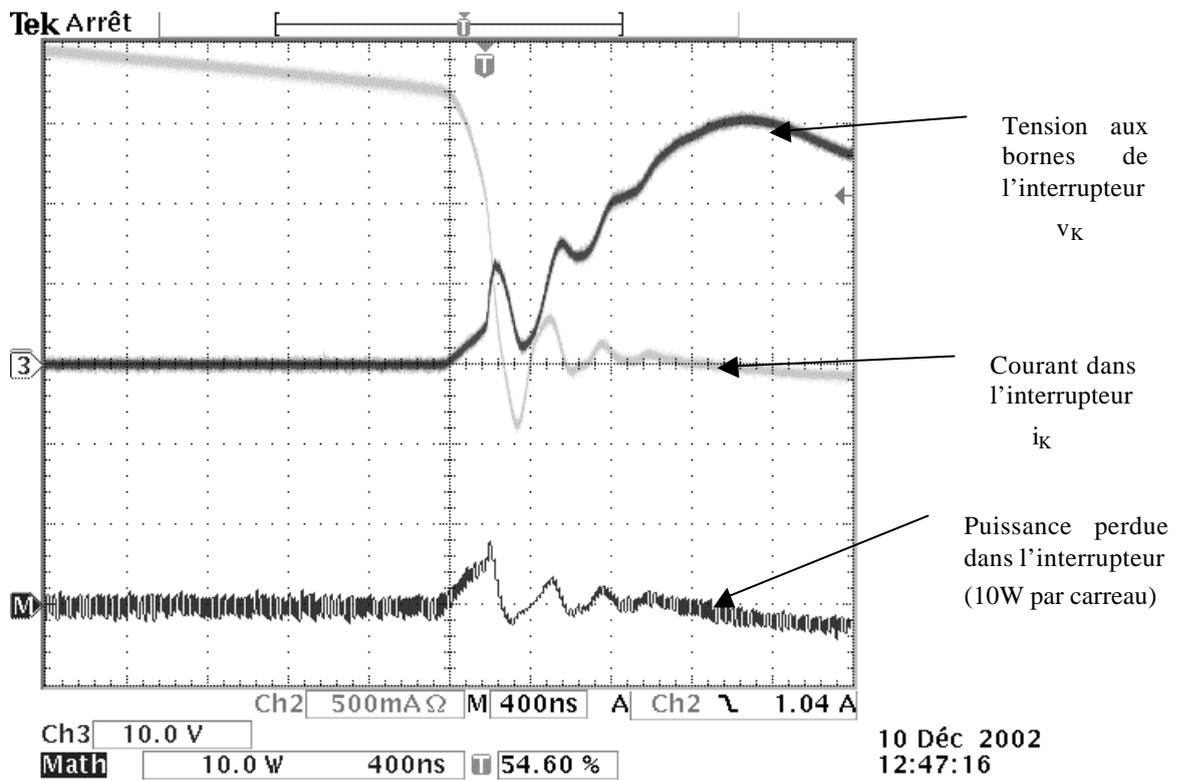


Figure 19 : Loupe sur la commutation au blocage en présence du condensateur $C_b = 47nF$

5 Alimentation de l'inducteur.

Le cahier des charges imposait que les plaques à induction puissent délivrer une puissance de 3 kW à partir d'un branchement sur une prise domestique 16 A (valeur efficace). Il était donc nécessaire d'utiliser un étage d'entrée ayant un facteur de puissance supérieur ou égal à 0,85.

A partir de l'écriture d'un bilan de puissance, on peut montrer que l'ensemble onduleur inducteur (figure 20 a) est équivalent au sens du premier harmonique au modèle donné par la figure 20 b

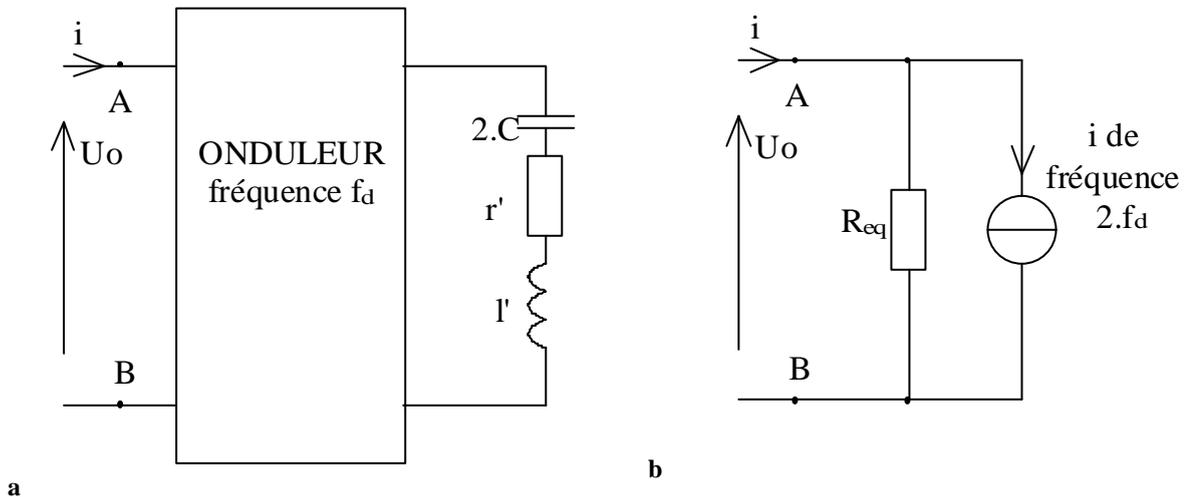


Figure 20 : Dipôle équivalent au sens du premier harmonique

Pour respecter le cahier des charges, il suffit pour cela de placer un dipôle en sortie du pont présentant :

- une impédance négligeable devant l'impédance du réseau aux fréquences supérieures à la fréquence de découpage.
- une impédance grande devant la résistance équivalente à l'étage d'entrée de l'onduleur pour la fréquence de 100 Hz.

Un condensateur de capacité $C_f = 4,7\mu F$ permet de respecter les deux conditions précédentes.

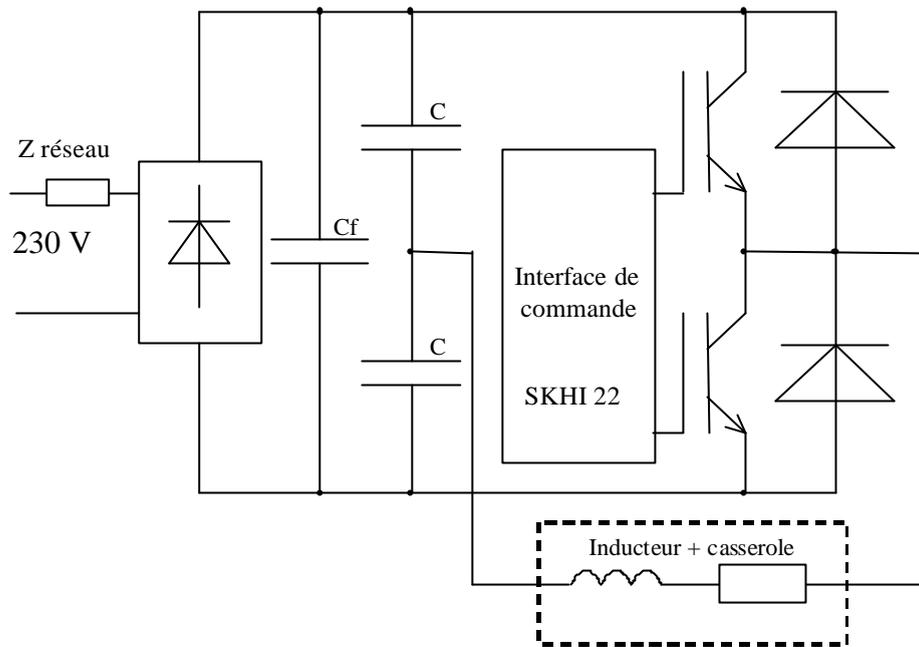


Figure 21: Schéma de l'alimentation

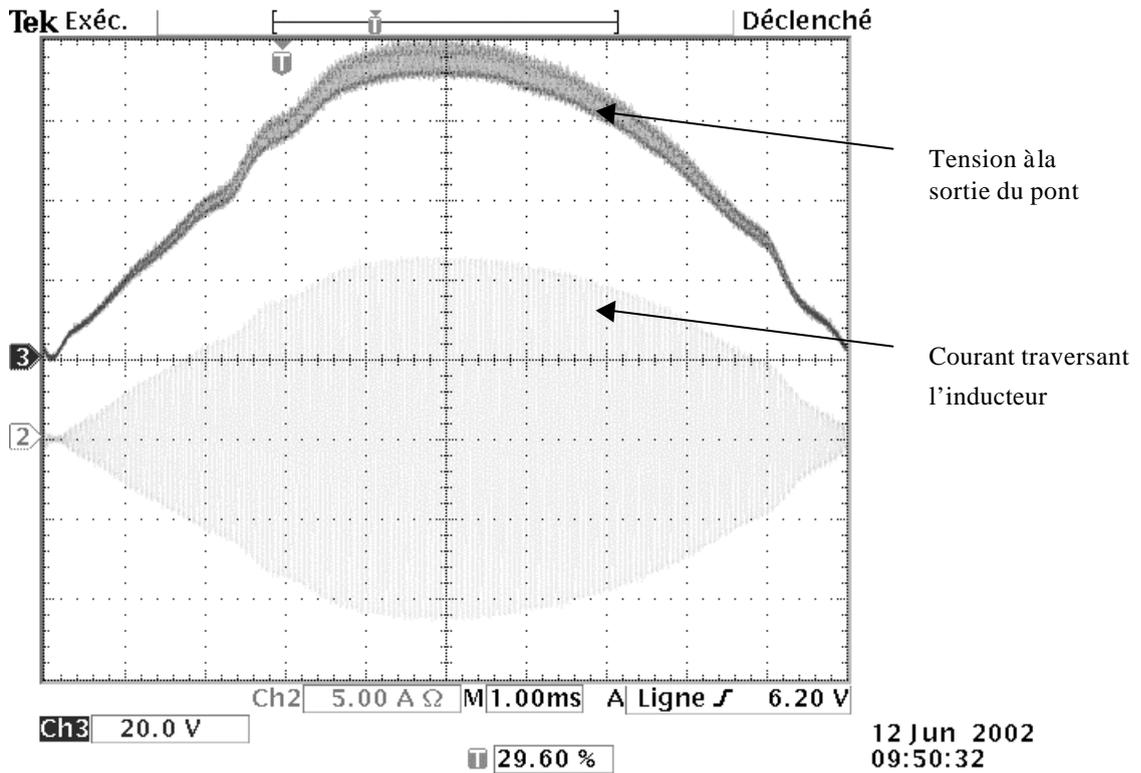


Figure 22 : Courant traversant l'inducteur et tension en sortie du pont

Remarque :

L'inductance du réseau prépondérante à la fréquence de découpage peut être déterminée en mesurant le temps de commutation du courant dans un pont à diodes alimenté par le réseau et débitant sur une charge fortement inductive. (Court circuit sur un temps limité)

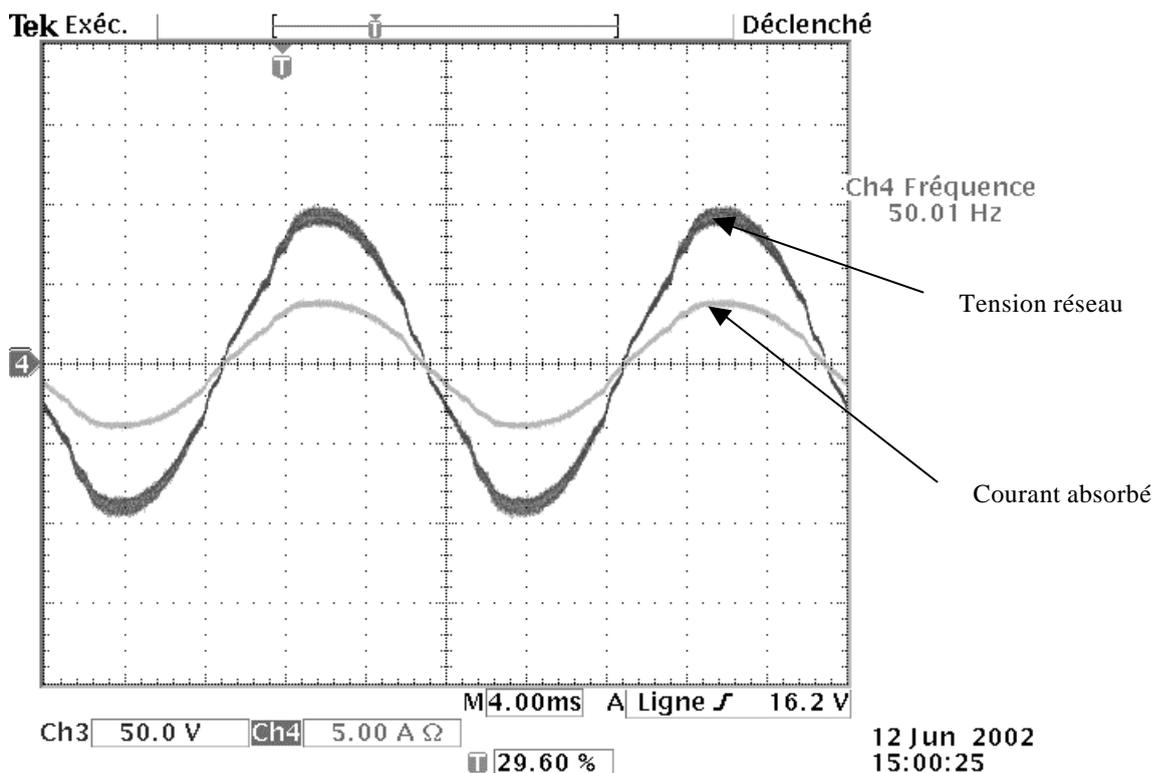


Figure 23 : Courant et tension sur le réseau

6 Étude comparative des différentes plaques de chauffage.

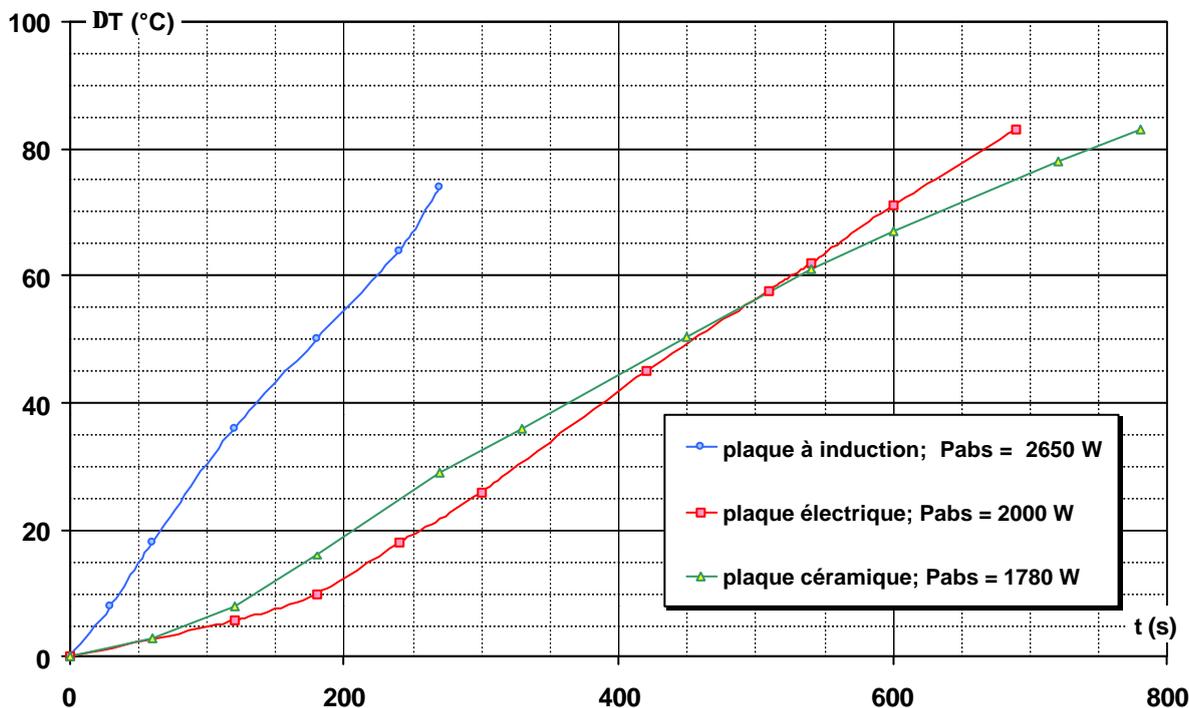


Figure 24 : Elévation de température en fonction du temps pour différentes plaques

7 Conclusion.

Le remplacement d'une charge R-L par une plaque à induction dans le TP "onduleur à résonance" a permis de donner un regain d'intérêt pour ce type d'étude sans pour cela en altérer le contenu scientifique. Ce système de faible coût, peut très facilement être utilisé des classes de terminale, BEP jusqu'au niveau agrégation.

HARMONIQUES ET RESEAU

François EDDI et Jean-François DING

Consultants techniques, Société EduWatt ;
13, rue Georges Auric, 75019 PARIS
Email : eduwatt@wanadoo.fr

Résumé : le contenu de cet article reprend pour l'essentiel deux rapports d'expertise effectués à la demande de clients inquiétés par l'apparition de dysfonctionnements sur leur distribution et dont l'analyse a montré qu'ils étaient dus à la présence de courants harmoniques sur les installations. Il met en évidence comment il a été possible, à partir de mesures réalisées sur site, de définir les causes exactes, de poser le diagnostic et de prescrire des solutions

1 Introduction

Suite à l'article "puissances : l'actif et le réactif et la complication des harmoniques" de Monsieur Michel MEUNIER¹, professeur à Supélec, il nous a paru intéressant de fournir au lecteur de *La Revue 3EI* deux exemples de mesures de terrain concernant les notions de puissance et les nécessités de prendre en compte les phénomènes harmoniques basses fréquences sur les réseaux d'énergie électrique, afin d'éviter les multiples dysfonctionnements qui peuvent en résulter. Nous proposons donc ci-dessous deux rapports d'expertises effectués sur site industriel étroitement corrélés au sujet. Ces deux rapports mettent en évidence que la circulation de courants harmoniques imposée par les charges sur les distributions sont à analyser prioritairement en fonction des sources qui alimentent ces charges.

Le premier met en évidence comment on est conduit à procéder au déclassement de transformateurs alimentant des charges informatiques dont le contenu spectral de courants appelés est toujours riche en composantes harmoniques ; le second rappelle les interactions inattendues entre les courants harmoniques générés par les charges et une source d'impédance inductive associée à une batterie de relèvement de facteur de déplacement, cette situation conduisant à l'apparition d'une résonance sur un rang multiple du 50 Hz.

Nous espérons que ces deux textes pourront servir de matière concrète lors de la présentation des notions de puissances en présence de courants déformés, aujourd'hui monnaie courante sur les réseaux, après la multiplication de charges non-linéaires et avant l'avènement prochain de l'absorption sinusoidale.

2 Rapports d'expertises

2.1 Rapport 1 : déclassement d'un transformateur en présence de courants harmoniques.

2.1.1 Instrumentation mise en oeuvre :

Analyseur harmonique de réseau Metrel PHS 50
Pincés ampèremétriques Universal 1000 A AC
Pincés ampèremétriques Lemflex 3000 A AC

2.1.2 Objet de l'étude

L'objet de cette étude est

- de vérifier si les onduleurs X1 160 kVA et X2 160 kVA, en service actuellement et situés sur la partie d'installation dite 112 satisfont au principe de redondance défini par XXXX pour un site de classe 1.
- de définir le choix le mieux adapté pour le remplacement à court terme de ces deux onduleurs.

Le passage du schéma de liaison à la terre TT au schéma de liaison à la terre TN est actuellement réalisé en sortie de chacun des 2 onduleurs par respectivement deux transformateurs : MGTR1 (80 kVA) et MGTR2 (70 kVA) pour X1 et EMTR1 (50 kVA) et EMTR2 (80 kVA) pour X2.

La température de fonctionnement actuelle de 2 de ces transformateurs (MGTR2 et EMTR1) dépasse la température de fonctionnement dans des conditions normales et il semblerait que ces échauffements, apparus il y a quelque temps déjà, aient pu provoquer la dégradation de certains isolants de ces équipements.

La redondance est basée sur le principe suivant : en cas de perte d'un onduleur, les modules de transfert automatique (MTC) commuteront l'ensemble de la charge sur l'autre onduleur, celui-ci devant donc être capable de fournir toute la puissance actuellement appelée en aval des 4 transformateurs MGTR1, MGTR2, EMTR1 et EMTR2. Ceci conditionne la

¹ La Revue 3EI n°31, décembre 2002.

méthode mise en oeuvre pour répondre au cahier des charges de l'étude.

2.1.3 Méthode

La vérification de la possibilité qu'a un seul onduleur à reprendre l'ensemble de la charge pour satisfaire au principe de redondance défini par XXXX, pour un site de classe 1 nécessite le contrôle :

- de la capacité en puissance apparente et facteur de crête d'un seul onduleur à reprendre la charge en totalité ;
- de la capacité en puissance apparente du transformateur réseau 2, après déclassement du fait des harmoniques, à reprendre la charge en totalité. Le déclassement pour chacune des phases est défini par la formule empirique suivante (CENELEC, HD428.4 S1):

$$d = \sqrt{1 + \frac{0.3 \sum_{n=2}^{20} I_n^2}{1 + 0.3 \sum_{n=2}^{20} I_n^2} + 1.7 \frac{0.3 \sum_{n=2}^{20} I_n^2}{\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2}}}$$

Pour évaluer la charge totale, des mesures ont été réalisées en aval des 4 transformateurs MGTR1, MGTR2, EMTR1 et EMTR2.

Le courant à prendre en compte est la somme des courants en sorties de ces transformateurs.

Nous avons relevé les formes d'ondes de courants sur les trois phases pour pouvoir, par simulation, les additionner phase à phase, et prédéterminer ainsi le courant total qui pourrait circuler dans chaque phase, dans le cas de l'alimentation des charges par un seul onduleur.

Cependant, afin de pouvoir retrouver la situation qui apparaîtra réellement après remplacement des onduleurs, il a également fallu prendre en compte le fait suivant : actuellement les tensions simples en sortie de MGTR1 et MGTR2 sont de 223 V, tandis que celles en sortie de EMTR1 et EMTR2 sont de 233 V. Afin de simuler l'alimentation par une source unique de 230 V, nous avons donc appliqué un coefficient d'ajustement sur les valeurs instantanées issues des mesures de tensions et le coefficient inverse sur les valeurs de courants.

	Sortie MGTR1	Sortie MGTR2	Sortie EMTR1	Sortie EMTR2
V1	222.648	221.265	235.207	233.754
V2	220.846	218.706	234.588	231.609
V3	223.612	224.710	234.029	233.413

Tableau 1

2.1.4 Mesures effectuées

Les relevés de formes d'ondes de tension et de courants des trois phases présentés ont été effectués sur :

- la sortie transformateur MGTR1
- la sortie transformateur MGTR2
- la sortie transformateur EMTR1
- la sortie transformateur EMTR2

D'autres mesures, dont les résultats sont déjà en votre possession, ont été effectuées dans le TGBT du bâtiment 112. Elles ne sont pas fournies dans ce rapport car elles ne fournissent pas d'information sur l'objet de l'étude.

Les résultats sont présentés en annexe sous la forme suivante :

- ✓ Formes d'ondes de tension et de courant
- ✓ Analyse spectrale tensions courants
- ✓ Valeurs efficaces de tensions et de courants, puissances apparentes, actives, réactives et déformantes, facteur de puissance, facteur de déplacement (cos φ), taux de distorsion harmoniques en tensions et en courants.

La simulation permettant d'obtenir le niveau de charge total est présentée, sous la même forme, à la suite des mesures dont elle est issue.

2.1.5 Analyse et interprétation des mesures

Nous résumons,

- dans le tableau 1, les valeurs de tensions en sortie des transformateurs et qui permettent d'établir les coefficients d'ajustement définis ci-dessus.
- dans le tableau 2, les résultats principaux sur les grandeurs caractéristiques actuellement en sortie de transformateurs.
- dans le tableau 3, les résultats principaux issus de la simulation dans la situation où un seul onduleur est amené à reprendre toute la charge.

MGTR1	Tension (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Déclassement du transformateur réseau 2	Facteur de puissance (P/S)	Facteur de déplacement (cosφ fondamental)	Facteur de crête
Phase 1	222.648	40.253	8.96	1.491	0.809	0.963	2.181
Phase 2	220.846	78.205	17.27	1.439	0.781	0.970	2.307
Phase 3	223.612	78.013	17.44	1.375	0.743	0.963	2.456
Neutre		107.647					
Total			43.68				
MGTR2	Tension (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Déclassement du transformateur réseau 2	Facteur de puissance (P/S)	Facteur de déplacement (cosφ fondamental)	Facteur de crête
Phase 1	221.265	96.124	21.27	1.274	0.862	0.989	1.99
Phase 2	218.706	110.811	24.23	1.289	0.857	0.980	2.123
Phase 3	224.710	46.208	10.38	1.45	0.808	0.958	2.757
Neutre		123.665					
Total			55.89				
EMTR1	Tension (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Déclassement du transformateur réseau 2	Facteur de puissance (P/S)	Facteur de déplacement (cosφ fondamental)	Facteur de crête
Phase 1	235.207	31.828	7.486	1.574	0.791	0.908	2.633
Phase 2	234.588	46.273	10.86	1.512	0.798	0.945	2.66
Phase 3	234.029	43.279	10.13	1.62	0.743	0.938	2.9
Neutre		54.648			0.791	0.908	
Total			28.47				
EMTR2	Tension (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Déclassement du transformateur réseau 2	Facteur de puissance (P/S)	Facteur de déplacement (cosφ fondamental)	Facteur de crête
Phase 1	233.754	31.987	7.477	1.265	0.702	0.899	3.192
Phase 2	231.609	42.232	9.781	1.278	0.716	0.938	2.972
Phase 3	233.413	34.561	8.067	1.205	0.660	0.874	2.972
Neutre		53.946					
Total			25.33				

Tableau 2

MGTR1 + MGTR2 + EMTR1 + EMTR2	Tension (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Déclassement du transformateur réseau 2	Facteur de puissance (P/S)	Facteur de déplacement (cosφ fondamental)	Facteur de crête
Phase 1	229,58	188,70	43,32	1.327	0.852	0.969	2.296
Phase 2	229,81	256,92	59,04	1.354	0.817	0.966	2.375
Phase 3	229,69	203,10	46,65	1.385	0.765	0.953	2.677
Neutre		309					
Total			149,01				

Tableau 3

Après analyses de ces relevés, il apparaît que :

Situation actuelle :

MGTR1 :

- La prise en compte du déclassement de ce transformateur définit donc une puissance déclassée de
- ✓ $\frac{80}{3.1,491}=17,89$ kVA pour la phase 1 supérieure aux 8,96 kVA appelés
- ✓ $\frac{80}{3.1,439}=18,53$ kVA pour la phase 2 supérieure aux 17,27 kVA appelés
- ✓ $\frac{80}{3.1,375}=19,39$ kVA pour la phase 3 supérieure aux 17,44 kVA appelés

Soit une puissance totale appelée de 43,68 kVA pour une puissance déclassée de 55,81 kVA.

MGTR2 :

- La prise en compte du déclassement de ce transformateur définit donc une puissance déclassée de
- ✓ $\frac{70}{3.1,274}=18,31$ kVA pour la phase 1 inférieure aux 21,27 kVA appelés
- ✓ $\frac{70}{3.1,289}=18,10$ kVA pour la phase 2 inférieure aux 24,23 kVA appelés
- ✓ $\frac{70}{3.1,45}=16,09$ kVA pour la phase 3 supérieure aux 10,38 kVA appelés

Soit une puissance totale appelée de 55,89 kVA pour une puissance déclassée de 52,50 kVA. Ce transformateur subit donc actuellement une élévation de température due aux harmoniques de courants et se trouve dans une situation de dégradation accélérée.

EMTR1 :

- La prise en compte du déclassement de ce transformateur définit donc une puissance déclassée de
- ✓ $\frac{50}{3.1,574}=10,59$ kVA pour la phase 1 supérieure aux 7,49 kVA appelés
- ✓ $\frac{50}{3.1,512}=11,02$ kVA pour la phase 2 supérieure aux 10,86 kVA appelés
- ✓ $\frac{50}{3.1,62}=10,28$ kVA pour la phase 3 supérieure aux 10,13 kVA appelés

Soit une puissance totale appelée de 28,47 kVA pour une puissance déclassée de 31,89 kVA. Ce transformateur est en limite de charge avant échauffement. La vétusté du transformateur peut justifier les échauffements constatés

EMTR2 :

- La prise en compte du déclassement de ce transformateur définit donc une puissance déclassée de
- ✓ $\frac{80}{3.1,265}=21,08$ kVA pour la phase 1 supérieure aux 7,48 kVA appelés
- ✓ $\frac{80}{3.1,278}=20,86$ kVA pour la phase 2 supérieure aux 9,78 kVA appelés
- ✓ $\frac{80}{3.1,205}=22,13$ kVA pour la phase 3 supérieure aux 8,07 kVA appelés

Soit une puissance totale appelée de 25,33 kVA pour une puissance déclassée de 64,07 kVA

Reprise de la charge en totalité par un seul onduleur dans la situation actuelle ou dans la situation du remplacement du seul X1.

Dans la situation la plus défavorable, X2 (160 kVA) devrait être en mesure de reprendre une charge de 149 kVA au travers de 2 transformateurs de puissance totale 130 kVA dont l'un des deux est déjà en situation normale, en limite de charge.

La reprise de la totalité de la charge placerait donc les transformateurs dans une situation de surcharge inadmissible sur un temps prolongé.

De plus, pour X2, le constructeur préconise à facteur de déplacement unitaire (situation moins défavorable que celle actuellement mesurée : DPF moyen pour les trois phases de 0,96 AV) un déclassement de 0,56 soit une puissance active maximale possible de $160 \times 0,56 = 89$ kW. La puissance active à fournir est de $(43,32 \times 0,852 + 59,04 \times 0,817 + 46,65 \times 0,765) = 120,83$ kW. L'onduleur ne pourrait accepter cette sollicitation et basculerait sur son réseau 2, plaçant ainsi l'ensemble de la charge dans la dépendance de l'énergie fournie uniquement par EDF.

En résumé, pour l'ensemble des raisons présentées ci-dessus, l'installation ne satisfait pas au principe de redondance défini par XXXX pour un site de classe 1.

Enfin, la prise en compte du déclassement du transformateur réseau 2 de 200 kVA associé à l'onduleur définit une puissance déclassée de

- ✓ $\frac{200}{3,1,327} = 50$ kVA pour la phase 1 supérieure aux 43,32 kVA appelés
- ✓ $\frac{200}{3,1,354} = 49,23$ kVA pour la phase 2 inférieure aux 59,04 kVA appelés
- ✓ $\frac{200}{3,1,385} = 48,13$ kVA pour la phase 3 supérieure aux 46,65 kVA appelés

Soit une puissance totale appelée de 149,01 kVA pour une puissance déclassée de 147,61 kVA. Un transformateur de 200 kVA, appelé à travailler dans ces conditions, subirait des échauffements conduisant à une usure prématurée.

2.1.6 Conclusions

Au vu des mesures effectuées le 11 janvier 2002 :

- le principe de redondance défini par XXXX pour un site de classe 1 au niveau des onduleurs X1 160 kVA et X2 160 kVA, en service actuellement et situés sur la partie d'installation dite 112, n'est pas satisfait au regard des puissances actuelles appelées par les charges ;
- en conséquence, nous recommandons de procéder rapidement aux modifications prévues sur la distribution ondulée.
- Les analyses ci-dessus montrent que le choix d'onduleurs X3 200 kVA associés à des transformateurs 200 kVA pour le réseau 2, en remplacement des onduleurs X1 160 kVA et X2 160 kVA, correspond à un

Choix le mieux adapté pour le remplacement à court terme de ces deux onduleurs

Hypothèse : onduleur X3 200 kVA

Pour un fonctionnement à facteur de déplacement unitaire (situation moins défavorable que celle actuellement mesurée : DPF moyen pour les trois phases de 0,96 AV), le coefficient de déclassement fourni par le constructeur est de 0,75, soit une puissance active maximale possible de $200 \times 0,75 = 150$ kW. La puissance active à fournir étant de 120,83 kW, le dimensionnement en puissance est satisfaisant.

Le facteur de crête fourni par le constructeur est de 2,33 soit un courant maximal crête de sortie

$\frac{200000}{3,230} = 675$ A supérieur à chacune des valeurs crêtes sur les trois phases (phase 1 : $188,70 \times 2,296 = 433$ A ; phase 2 : $256,92 \times 2,375 = 610$ A ; phase 3 : $203,10 \times 2,677 = 544$ A). Le dimensionnement en valeur crête (prise en compte de la distorsion en courant) est donc satisfaisant mais laisse peu de marge pour une évolution de charge sur la distribution).

dimensionnement a minima qui ne laisserait pratiquement aucune possibilité d'extension des charges. Nous recommandons donc le passage à la gamme supérieure : X3 250 kVA.

- Enfin, il est impératif, pour satisfaire au principe de redondance défini, de procéder au remplacement de l'onduleur X2 160 kVA immédiatement après le remplacement de l'onduleur X1 160 kVA.

2.2 Rapport 2 : résonance en tête de distribution en présence de courants harmoniques

2.2.1 Instrumentation mise en oeuvre

Analyseur harmonique de réseau :
Metrel PHS 50

Pincés de courants :

Lemflex : pincés ampèremétriques 3000 A AC

2.2.2 Objet de l'étude

Mesures et analyses pour déterminer les causes de disjonctions des protections en amont des batteries de condensateurs servant au relèvement du facteur de déplacement dans le TGBT 1 et la situation des équipements équivalents installés dans les TGBT2 et TGBT 3.

2.2.3 Mesures effectuées

Pour les 3 TGBTs les mesures effectuées, pour lesquelles vous trouverez l'ensemble des figures correspondantes en annexe sont:

- Sortie transformateur (1250 kVA) pour les trois phases
 - Batteries de condensateurs non connectées
 - ✓ Tensions et courants instantanés
 - ✓ Analyse spectrale tensions courants
 - ✓ Valeurs efficaces tensions et courants, puissances apparentes, actives, réactives, déformantes, facteur de puissance et $\cos(\phi)$, taux de distorsion harmoniques tensions et courants
 - Batteries de condensateurs connectées
 - ✓ Tensions et courants instantanés
 - ✓ Analyse spectrale tensions courants
 - ✓ Valeurs efficaces tensions et courants, puissances apparentes, actives, réactives, déformantes, facteur de puissance et $\cos(\phi)$, taux de distorsion harmoniques tensions et courants
- Batteries de condensateurs (200 kVAr), pour les trois phases
 - ✓ Tensions et courants instantanés
 - ✓ Analyse spectrale tensions courants
 - ✓ Valeurs efficaces tensions et courants, puissances apparentes, actives, réactives, déformantes, facteur de puissance et $\cos(\phi)$, taux de distorsion harmoniques tensions et courants

Les notations figurant dans le rapport sont les suivantes :

- ✓ KW : puissance active (P)
- ✓ KVA : puissance apparente (Q)
- ✓ KVA_r : puissance réactive (S)
- ✓ KVA_d : puissance déformante (D)

- ✓ Peak KW : puissance instantanée maximale
- ✓ $\cos(\phi)$: facteur de déplacement ou encore déphasage entre le fondamental de tension et le fondamental de courant (ϕ)
- ✓ PF : facteur de puissance ou encore rapport de la puissance active à la puissance apparente (P/S)
- ✓ RMS : valeur efficace
- ✓ THD Fund ou thd: taux de distorsion relativisé par rapport à la valeur efficace du fondamental
- ✓ HRMS : valeur efficace des harmoniques
- ✓ 1 pour phase 1, 2 pour phase 2 3 pour phase 3, N pour le neutre

2.2.4 Analyses des mesures

2.2.4.1 TGBT1

2.2.4.1.1 Sortie transformateur, batteries de condensateurs non connectées

Les mesures mettent en évidence un niveau de charge tout à fait acceptable (664 kVA) au regard de la puissance nominale du transformateur.

La puissance réactive consommée sur le départ atteint 370 kVA (facteur de déplacement moyen pour les trois phases de 0,83), ce qui justifie la nécessité de la mise en oeuvre de batteries de condensateurs, afin de relever le facteur de déplacement et d'éviter le paiement de pénalités pour la période de novembre à avril.

D'autre part, l'ensemble de la charge alimentée sur ce départ est génératrice de courant harmoniques, notamment sur les rangs 5 (130 A par phase en moyenne), et 11 (33 A par phase en moyenne).

2.2.4.1.2 Sortie transformateur, batteries de condensateurs connectées

La mise en service des condensateurs permet bien de relever le facteur de déplacement à un niveau satisfaisant (0,93 en moyenne pour les trois phases) au regard des exigences du distributeur d'énergie (facteur de déplacement supérieur à 0,92 pour éviter le paiement des pénalités) et de diminuer les niveaux de courants efficaces dans les trois phases du transformateur (908 A, 862 A, 871 A contre 1055 A, 1038 A, 1019 A)

Cependant, les analyses spectrales des courants instantanés mettent en évidence l'amplification excessive des harmoniques de rang 11 (550 Hz) qui passent de 33 A à respectivement 224 A, 134 A, 176 A pour chacune des phases.

Ce phénomène est aisément explicable par l'apparition, lors de la mise en service des condensateurs d'un

phénomène de résonance entre ces condensateurs et les inductances de sortie des secondaires de transformateur cumulées aux inductances de lignes jusqu'au point de

raccordement des batteries de condensateurs (voir figure 1 ci-dessous : schéma monophasé équivalent)

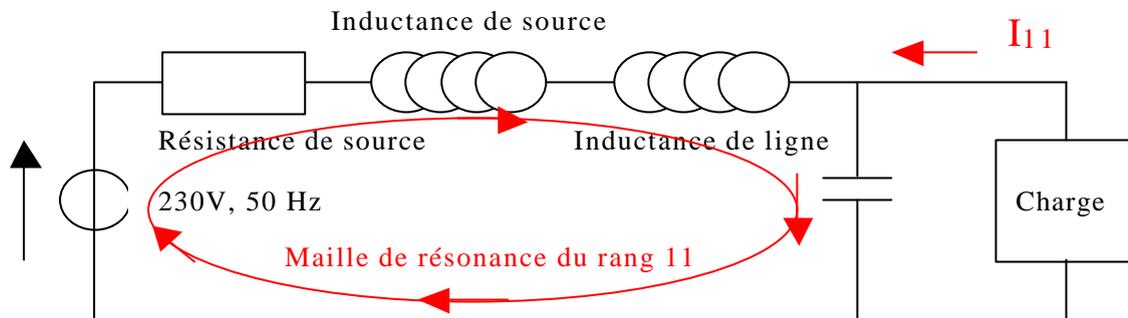


Figure 1 : schéma monophasé équivalent mettant en évidence la maille de résonance sur le rang 11 (550 Hz)

La charge peut être considérée, pour les courants harmoniques qu'elle impose sur la distribution, comme un ensemble de générateurs de courant placés en parallèle. Ces générateurs de courant, pour le schéma monophasé équivalent, sont donc chargés par un dipôle équivalent constitué d'un

condensateur (dont la valeur est fournie par une transformation triangle étoile des condensateurs réellement installés : $C_{\text{étoile}} = 3 \times C_{\text{triangle}}$) en parallèle avec l'association série réalisée par l'inductance de ligne (L), l'inductance de source (L_s) et la résistance de source (R_s) - figure 2;

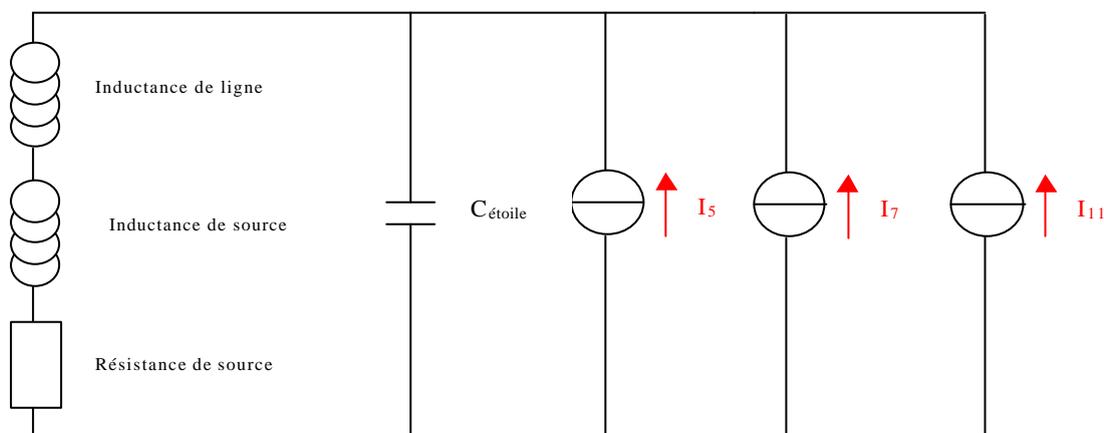


Figure 2 : schéma monophasé équivalent des sources de courant harmonique (rangs 5, 7, 11) et de la charge vue par celle-ci.

A partir des différents relevés effectués, il est possible d'évaluer les valeurs des différents dipôles présents sur le schéma et d'en déduire l'impédance du dipôle équivalent vu par les sources de courant.

La capacité, pour chaque phase, est estimée depuis les valeurs à 50 Hz de la puissance réactive fournie par les condensateurs :

- Phase 1 : 3300 μF
- Phase 2 : 3577 μF
- Phase 3 : 3730 μF

Les valeurs de R_s et de $L_l + L_s$ sont déduites, pour chaque phase, depuis les valeurs des impédances $[C // (L_l \text{ série } L_s \text{ série } R_s)]$ déterminées sur les rangs 5 et 11 à partir des rapports V_5/I_5 et V_{11}/I_{11} (valeurs fournies par les relevés tensions courants dans la charge avec mise en service des condensateurs).

- Phase 1 : $R_s = 14 \text{ m}\Omega$, $L_l + L_s = 29,59 \mu\text{H}$
- Phase 2 : $R_s = 13 \text{ m}\Omega$, $L_l + L_s = 28,41 \mu\text{H}$
- Phase 3 : $R_s = 15 \text{ m}\Omega$, $L_l + L_s = 27,83 \mu\text{H}$

L'impédance complexe du dipôle équivalent vu par les sources de courant a pour expression :

$$Z(\omega) = \frac{[Rs + j(Ll + Ls)\omega] \cdot \frac{1}{jC\omega}}{Rs + j(Ll + Ls)\omega + \frac{1}{jC\omega}}$$

dont la représentation graphique du module pour chacune des trois phases est donnée par les représentations graphiques de la figure 3 a, b, c.

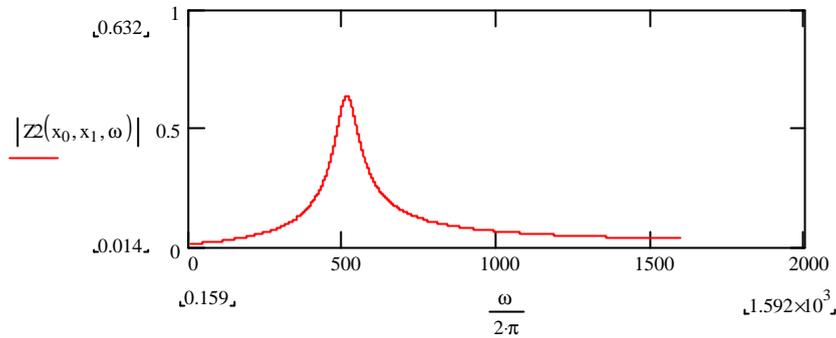


Figure 3 a : module de l'impédance complexe du dipôle équivalent vu par les sources de courant phase 1

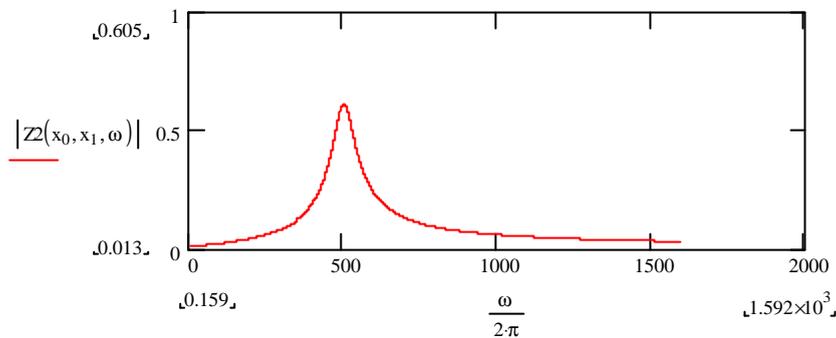


Figure 3 b : module de l'impédance complexe du dipôle équivalent vu par les sources de courant phase 2

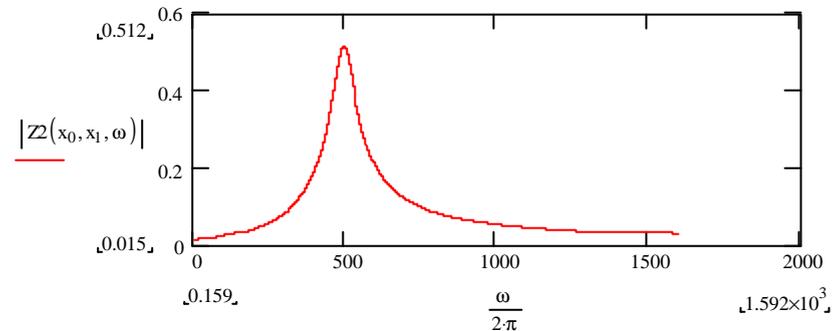


Figure 3 c : module de l'impédance complexe du dipôle équivalent vu par les sources de courant phase 3

Les résultats obtenus pour chaque phase montrent que le module de l'impédance du dipôle équivalent présente un maximum au voisinage de 500 Hz fréquence voisine du rang 11 du 50 Hz sur lequel la résonance apparaît.

En résumé l'ensemble des phénomènes observés est expliqué par :

1/ La charge alimentée par le transformateur est génératrice de courants harmoniques, notamment sur le rang 11 (550 Hz).

2/ Cette fréquence étant très proche de la fréquence pour laquelle le module de l'impédance vu par les sources de courant est maximum, il apparaît une surtension de résonance sur ce rang aux bornes de

chaque phase du transformateur et des condensateurs dont la conséquence est :

3/ l'apparition de courants de circulation très élevés à 550 Hz dans le transformateur et les condensateurs.

4/ Lorsque le TGBT1 alimente simultanément sa charge normale + la charge du TGBT2 ou du TGBT3, les courants de rang 11 sont alors voisins du double de ceux mesurés dans les conditions normales ; la surtension de résonance conséquente est alors elle-même doublée ainsi que les courants de circulation de rang 11 dans les condensateurs. Les valeurs efficaces des courants dans les batteries de condensateurs deviennent alors supérieures aux

valeurs maximales admissibles par le disjoncteur qui déclenche dans sa zone thermique.

Par ailleurs, en fonctionnement normal, nous attirons votre attention sur le fait que les courants harmoniques circulant dans le transformateur appellent au déclassement de celui-ci.

Dans le cas où les batteries de condensateurs ne sont pas mises en service, les niveaux de courants harmoniques restent bas et le déclassement n'est pas significatif.

Par contre, lors de la mise en service des condensateurs, le phénomène de résonance observé et qui engendre la circulation de courants harmoniques élevés dans la source conduit à un déclassement du transformateur comme indiqué ci-dessous :

- Déclassement d'après la formule empirique fournie par le CENELEC (HD428.4 S1) :

Puissance apparente réelle appelée : 595 kVA pour une puissance apparente déclassée à 764 kVA avec prise en compte des harmoniques

- Déclassement d'après la formule empirique fournie par certains constructeurs de transformateurs:

Puissance apparente réelle appelée : 595 kVA pour une puissance apparente déclassée à 664 kVA avec prise en compte des harmoniques

En conséquence la marge de sécurité pour le transformateur installé (1 250 kVA) est largement suffisante en fonctionnement normal ; dans le cas de l'alimentation d'un TGBT et demi par le même transformateur, la situation reste admissible car malgré un déclassement du transformateur plus sévère, la présence des condensateurs de compensation devrait limiter suffisamment les courants réactifs à 50 Hz dans le transformateur pour avoir une puissance apparente à fournir inférieure à la puissance apparente disponible avec déclassement (voir tableau 2, § 5.2).

2.2.4.2 TGBT2

2.2.4.2.1 Sortie transformateur, batteries de condensateurs non connectées

Les mesures mettent en évidence un niveau de charge tout à fait acceptable (587 kVA) au regard de la puissance nominale du transformateur.

La puissance réactive consommée sur le départ atteint 296 kVA (facteur de déplacement moyen pour les trois phases de 0,86), ce qui justifie la nécessité de la mise en oeuvre de batteries de condensateurs, afin de relever le facteur de déplacement et d'éviter le paiement de pénalités pour la période de novembre à avril.

D'autre part, l'ensemble de la charge alimentée sur ce départ est génératrice de courant harmoniques, notamment sur les rangs 5 (153 A par phase en moyenne), et 11 (50 A par phase en moyenne).

4.2.2 Sortie transformateur, batteries de condensateurs connectées

La mise en service des condensateurs permet bien de :

- relever le facteur de déplacement à un niveau satisfaisant (0,95 en moyenne pour les trois phases) au regard des exigences du distributeur d'énergie (facteur de déplacement supérieur à 0,92 pour éviter le paiement des pénalités)
- diminuer les niveaux de courants efficaces dans les trois phases du transformateur (793 A, 782 A, 807 A contre 862 A, 869 A, 873 A)

Le phénomène de résonance sur le rang 11 observé sur le TGBT1 et décrit au § 4.1.2 est également présent pour le TGBT2 (rang 11 passant de 50 A à respectivement 165 A, 130 A, 142 A pour chacune des phases. Cependant, du fait de la moindre demande en puissance en puissance réactive à compenser sur ce départ, seuls 3 des 4 batteries de condensateurs s'enclenchent pour assurer la compensation de réactif à un niveau satisfaisant. En conséquence, l'impédance vue par les sources est telle que le phénomène de résonance est atténué (tensions harmoniques pour chaque phase sur le rang 11 à 11 V, 15 V et 12 V contre 22 V, 12 V et 16 V pour le TGBT1)

Cependant, si le TGBT2 est amené à alimenter en plus de sa charge celle du TGBT1 ou TGBT3, le phénomène de déclenchement du disjoncteur en amont des batteries de condensateurs risque de se produire.

Enfin, même si le phénomène de résonance est moins accentué pour le TGBT2, le déclassement imposé par l'existence de courants harmoniques du transformateur HT/BT qui l'alimente est également à considérer dans le fonctionnement avec batteries de condensateurs. Les niveaux de déclassement à prévoir pour ce transformateur sont :

- Déclassement d'après la formule empirique fournie par le CENELEC (HD428.4 S1) :

Puissance apparente réelle appelée : 536 kVA pour une puissance apparente déclassée à 682 kVA avec prise en compte des harmoniques

- Déclassement d'après la formule empirique fournie par certains constructeurs de transformateurs:

Puissance apparente réelle appelée : 536 kVA pour une puissance apparente déclassée à 596 kVA avec prise en compte des harmoniques

En conséquence la marge de sécurité pour le transformateur installé (1 250 kVA) est largement suffisante en fonctionnement normal ; dans le cas de l'alimentation d'un TGBT et demi par le même transformateur, la situation reste admissible car malgré un déclassement du transformateur plus sévère, la

présence des condensateurs de compensation devrait limiter suffisamment les courants réactifs à 50 Hz dans le transformateur pour avoir une puissance apparente à fournir inférieure à la puissance apparente disponible avec déclassement (voir tableau 2, § 2.2.5.2).

2.2.4.3 TGBT3

2.2.4.3.1 Sortie transformateur, batteries de condensateurs non connectées

Les mesures mettent en évidence un niveau de charge tout à fait acceptable (656 kVA) au regard de la puissance nominale du transformateur.

La puissance réactive consommée sur le départ atteint 345 kVA (facteur de déplacement moyen pour les trois phases de 0,84), ce qui justifie la nécessité de la mise en oeuvre de batteries de condensateurs, afin de relever le facteur de déplacement et d'éviter le paiement de pénalités pour la période de novembre à avril.

D'autre part, l'ensemble de la charge alimentée sur ce départ est génératrice de courant harmoniques, notamment sur les rangs 5 (127 A par phase en moyenne), et 11 (43 A par phase en moyenne).

2.2.4.3.1 Sortie transformateur, batteries de condensateurs connectées

La mise en service des condensateurs permet bien de :

relever le facteur de déplacement à un niveau satisfaisant (0,93 en moyenne pour les trois phases) au regard des exigences du distributeur d'énergie (facteur de déplacement supérieur à 0,92 pour éviter le paiement des pénalités)

diminuer les niveaux de courants efficaces dans les trois phases du transformateur (921 A, 933 A, 900 A contre 983 A, 998 A, 971 A)

Le phénomène de résonance sur le rang 11 observé sur les TGBT1 et TGBT2 et décrit au § 4.1.2 est également présent pour le TGBT3 (rang 11 passant de 43 A à respectivement 128 A, 94 A, 103 A pour chacune des phases. Cependant, du fait de la moindre demande en puissance en puissance réactive à compenser sur ce départ, seuls 3 des 4 batteries de condensateurs s'enclenchent pour assurer la compensation de réactif à un niveau satisfaisant. En conséquence, l'impédance vue par les sources est telle que le phénomène de résonance est atténué (tensions harmoniques pour chaque phase sur le rang 11 à 11 V, 8 V et 9 V contre 22 V, 12 V et 16 V pour le TGBT1)

Cependant, si le TGBT3 est amené à être alimenté en plus de sa charge celle du TGBT1 ou du TGBT2, le

phénomène de déclenchement du disjoncteur en amont des batteries de condensateurs risque de se produire.

Enfin, même si le phénomène de résonance est moins accentué pour le TGBT1, le déclassement imposé par l'existence de courants harmoniques du transformateur HT/BT qui l'alimente est également à considérer dans le fonctionnement avec batteries de condensateurs. Les niveaux de déclassement à prévoir pour ce transformateur sont :

- Déclassement d'après la formule empirique fournie par le CENELEC (HD428.4 S1) :

Puissance apparente réelle appelée : 615 kVA pour une puissance apparente déclassée à 706 kVA avec prise en compte des harmoniques

- Déclassement d'après la formule empirique fournie par certains constructeurs de transformateurs:

Puissance apparente réelle appelée : 615 kVA pour une puissance apparente déclassée à 649 kVA avec prise en compte des harmoniques

En conséquence la marge de sécurité pour le transformateur installé (1250 kVA) est largement suffisante en fonctionnement normal ; dans le cas de l'alimentation d'un TGBT et demi par le même transformateur, la situation reste admissible car malgré un déclassement du transformateur plus sévère, la présence des condensateurs de compensation devrait limiter suffisamment les courants réactifs à 50 Hz dans le transformateur pour avoir une puissance apparente à fournir inférieure à la puissance apparente disponible avec déclassement (voir tableau 2, § 5.2).

2.2.5 Conclusions et recommandations

2.2.5.1 Fonctionnement en l'absence de condensateurs de compensation de réactif

- Dans ce mode de fonctionnement les analyses précédentes montrent que pour chaque TGBT pris séparément la situation est tout à fait satisfaisante.

- De plus, dans le cas où un des TGBT serait amené à reprendre sa charge plus la moitié de celle d'un des deux autres, les simulations effectuées représentant les différentes situations possibles (non présentées dans le rapport mais dont les résultats principaux sont résumés dans le tableau 1 ci-dessous) montrent que dans tous les cas de figure, le transformateur devant alimenter un TGBT et demi aura à fournir une puissance apparente qui reste inférieure à la puissance apparente nominale avec prise en compte du déclassement le plus défavorable

	Puissance apparente appelée estimée par simulation (kVA)	Puissance apparente déclassée estimée par simulation (kVA)
TGBT1 + 1/2 TGBT2	989	1181
1/2 TGBT1 + TGBT2	932	1163
TGBT1 + 1/2 TGBT3	1020	1193
1/2 TGBT1 + TGBT3	1003	1189
TGBT2 + 1/2 TGBT3	913	1157
1/2 TGBT2 + TGBT3	952	1171

Tableau 1 : Puissances apparentes appelées estimées par simulation et puissances apparentes déclassées estimées par simulation dans les différents cas de disparition d'un des trois transformateurs HT/BT en l'absence de batteries de condensateurs

2.2.5.2 Fonctionnement en présence de condensateurs de compensation de réactif

- Dans ce mode de fonctionnement les analyses précédentes montrent que pour chaque TGBT pris séparément la situation est tout à fait satisfaisante.
- De plus, dans le cas où un des TGBT serait amené à reprendre sa charge plus la moitié de celle d'un des deux autres, les simulations effectuées représentant

les différentes situations possibles (non présentées dans le rapport mais dont les résultats principaux sont résumés dans le tableau 2 ci-dessous) montrent que dans tous les cas de figure, le transformateur devant alimenter un TGBT et demi aura à fournir une puissance apparente qui reste inférieure à la puissance apparente nominale avec prise en compte du déclassement le plus défavorable

	Puissance apparente appelée estimée par simulation (kVA)	Puissance apparente déclassée estimée par simulation (kVA)
TGBT1 + 1/2 TGBT2	861	991
1/2 TGBT1 + TGBT2	832	995
TGBT1 + 1/2 TGBT3	910	1062
1/2 TGBT1 + TGBT3	910	1071
TGBT2 + 1/2 TGBT3	837	1047
1/2 TGBT2 + TGBT3	879	1083

Tableau 2 : Puissances apparentes appelées estimées par simulation et puissances apparentes déclassées estimées par simulation dans les différents cas de disparition d'un des trois transformateurs HT/BT en présence de batteries de condensateurs

- Par contre, les phénomènes de résonances sur le rang 11 (550 Hz) mis en évidence lors de l'analyse des relevés sont à l'origine des déclenchements de disjoncteur constatés lorsqu'un transformateur est appelé à reprendre un TGBT et demi.

- Nous attirons enfin votre attention sur le fait que nous vous avons recommandé dans notre rapport d'expertise de mars 2000 sur votre distribution qu'il convenait de surveiller les taux de distorsion harmonique en tension en amont des onduleurs, ceux-ci atteignant déjà à cette époque une valeur élevée (§ 3.1 du rapport)

l'amplitude des courants de rang 11 imposés par la charge.

A ces fins la solution adaptée et la plus économique consisterait à empêcher que les courants harmoniques de rang 11 remontent vers l'association parallèle transformateur-batteries de condensateurs en installant dans chaque TGBT un compensateur actif d'harmoniques configuré sur uniquement la compensation du rang 11.

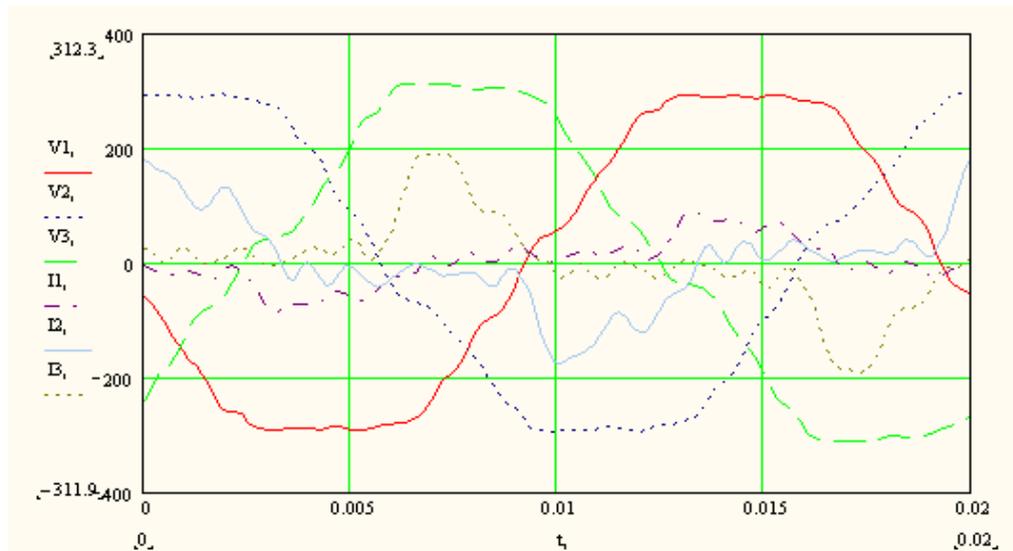
Au vu des niveaux à compenser, un dimensionnement de compensateur actif de 40 ampères déformant par phase (totalement affectés au rang 11) paraît satisfaisant.

2.2.5.3 Recommandations

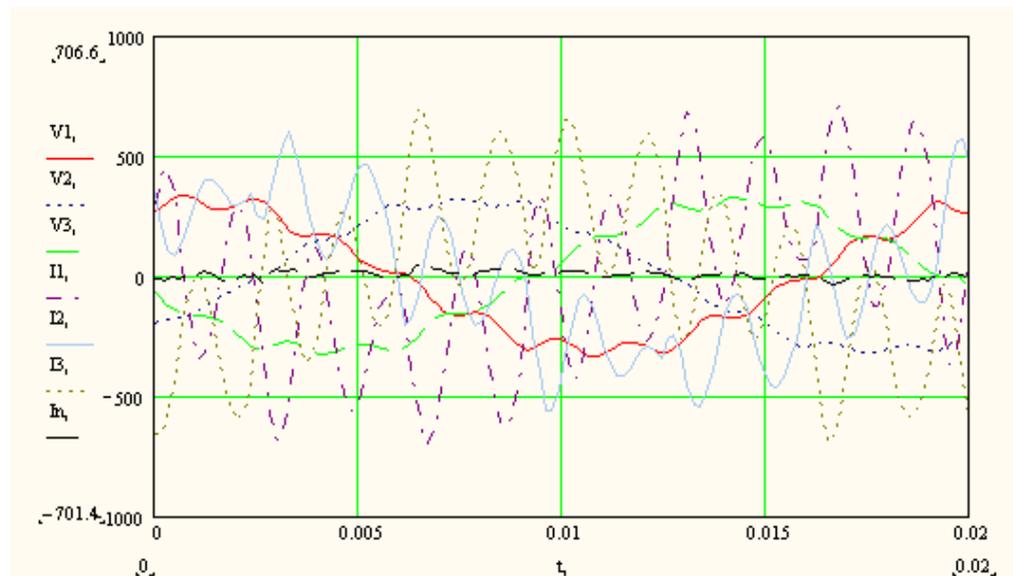
Afin,

- d'une part de soulager les transformateurs de distribution
- d'autre part de supprimer la cause des déclenchements de disjoncteurs en amont des batteries de condensateurs, il convient de limiter

Il serait souhaitable, avant d'effectuer ces installations de façon définitive de procéder à un essai de collaboration avec le fournisseur (par exemple MGE). Nous restons à votre disposition pour intervenir en votre nom auprès de MGE afin de faire procéder à ces essais au cours desquels nous procéderions aux mesures adaptées.



Rapport 1 : Formes d'ondes de tensions et courants en aval de MGTRI



Rapport 2 : Tensions et courants instantanés dans les batteries de condensateurs sortie transformateur TGBT3

L'ensemble des résultats de mesures cités comme annexes ne pouvaient figurer dans l'article sous peine d'une dégradation de la qualité de ces dernières, elles sont donc disponibles sur le site de la revue : lesite3EI.com

CONCEPTION D'UN SYSTÈME NUMÉRIQUE DE COMMANDE D'INTERRUPTEUR SYNCHRONISÉ SUR LE RESEAU.

Lionel CIMA, Gilles FELD

Ecole Normale Supérieure de Cachan
Département EEA
61, Avenue Président Wilson, 94 230 Cachan
cima@satie.ens-cachan.fr, feld@eea.ens-cachan.fr

Résumé : Nous décrivons dans cet article une maquette pédagogique permettant de contrôler l'instant de mise sous tension d'un dispositif monophasé alimenté par le réseau. Nous présentons la méthodologie de développement du système numérique synchrone, implanté dans un CPLD, qui gère ce déclenchement. Nous illustrons l'utilisation de cette maquette par une étude des phénomènes transitoires intervenant à la mise sous tension d'un transformateur.

Mots clés : Logique séquentielle synchrone, VHDL, CPLD, transitoires.

I Introduction

La mise sous tension de dispositifs monophasés alimentés par le réseau entraîne des régimes transitoires qui dépendent de l'instant d'enclenchement des systèmes. Pour étudier ce phénomène, il est nécessaire de synchroniser la mise sous tension du dispositif avec le réseau. Le retard à l'enclenchement, référencé par rapport au passage à zéro de la tension réseau, doit être facilement réglable par l'utilisateur. La maquette que nous proposons (voir schéma figure 1) permet de contrôler ce retard, noté t_r , par pas de une milliseconde au moyen d'une roue codeuse (numérotée de 0 à 15). Les chronogrammes figure 2 représentent les signaux à réaliser par la maquette dont le schéma électrique global est fourni en annexe, figure 10.

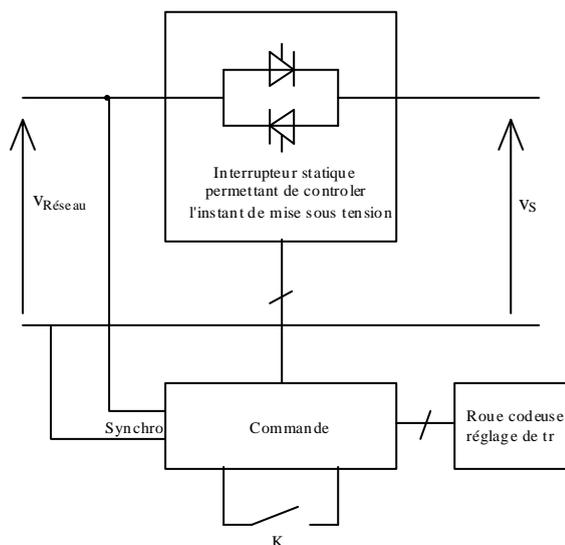


Figure 1 : Schéma de la maquette

II Position du problème

La commande est gérée par un système numérique qui nécessite un interfaçage avec certains signaux analogiques (voir Figure 3). En premier lieu, la tension du réseau est convertie en un signal binaire, en phase avec celui-ci, compatible avec les niveaux logiques. Enfin, le signal d'enclenchement retardé est utilisé pour attaquer directement des transformateurs d'impulsions, nécessaires à l'isolement galvanique entre les systèmes de commande et de puissance. Ce signal binaire doit être modulé pour éviter la saturation du circuit magnétique (nous choisissons une fréquence de modulation de 5 kHz).

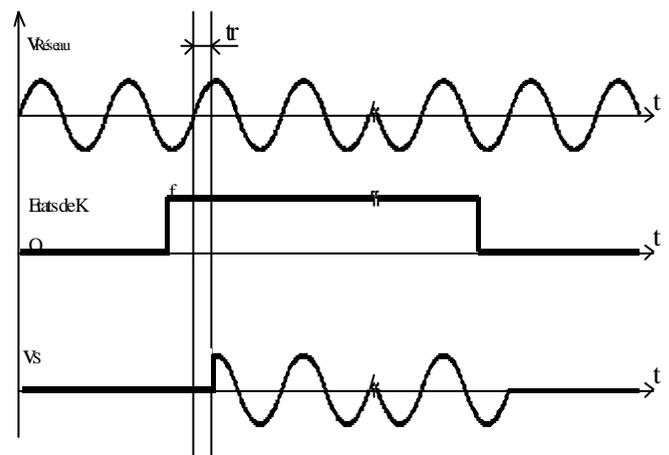


Figure 2 : Chronogrammes sur charge résistive

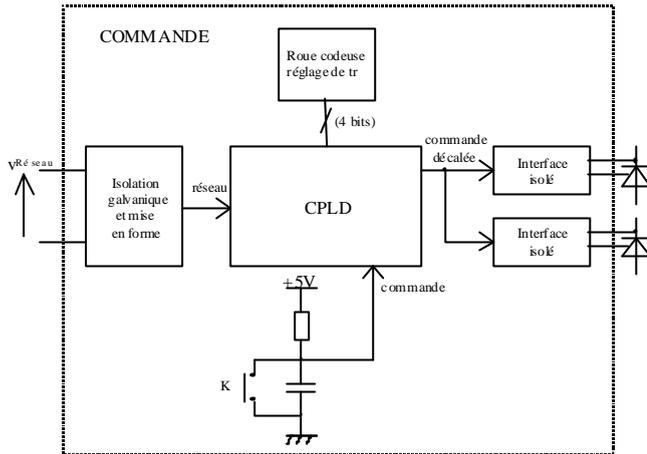


Figure 3 : Description de la commande de la maquette.

Le problème, décrit par les chronogrammes de la figure 4, est désormais transposé dans le domaine numérique. A l'enclenchement du signal de commande, noté K , le système numérique recherche un front montant du signal réseau, synonyme de passage à zéro de la tension réseau. Une temporisation est alors lancée, dont la durée est fixée par la roue codeuse (le signal issu de la roue codeuse est un vecteur, noté N , composé de 4 bits). Le signal de sortie, modulé à une fréquence fixe de 5 kHz, est activé tant que le signal de commande, K , est actif.

III Conception du circuit logique

III.1 Introduction

Le système numérique de gestion de commande décalée peut être réalisé par un étudiant au cours d'une séance de travaux pratiques. Ce système est alors implanté dans un PLD (Programmable Logic Device ou composant logique programmable par l'utilisateur) de type CPLD ou FPGA. Nous utilisons un CPLD (CY37064P44125JC) programmable, *in situ*, via le port parallèle d'un PC.

L'objectif du TP est, au delà de l'exercice de conception numérique, de pointer les nombreux avantages de la solution numérique : rapidité de mise en oeuvre, précision et grande souplesse. La souplesse de cette solution est en grande partie due à la souplesse des outils de développement de PLD. On distingue principalement deux outils nécessaires au développement de systèmes numériques : les synthétiseurs et les simulateurs. Ces outils travaillent à partir d'un fichier source permettant de décrire le système numérique. Ce fichier de description, écrit par exemple en langage VHDL, est indépendant du circuit cible. Le synthétiseur, généralement fourni par le constructeur de PLD, génère la liste d'interconnexions permettant d'implanter le système décrit dans un circuit cible donné. Le simulateur permet non seulement d'étudier la viabilité du système numérique

mais également d'estimer ses performances avant implantation dans le circuit ciblé. La séquence de travail pour l'étudiant est donc la suivante: description de l'architecture du circuit numérique, choix éventuel du circuit cible, étude de la synthèse, validation de la description par simulation, programmation et test. L'ensemble est effectué à partir d'un PC.

III.2 Conception

Le concepteur de circuit numérique utilise toujours une méthode de description descendante (*le top-down design*), c'est à dire qu'il cherche à décomposer une fonction complexe en plusieurs fonctions plus simples.

Le choix de l'architecture interne et des chemins de données (transfert parallèle ou *pipe line* par exemple) est une phase parfois difficile qui peut requérir l'utilisation d'outils d'aide à la décision. Dans le cas des systèmes séquentiels, le concepteur est également amené à choisir entre une solution synchrone et asynchrone. La solution asynchrone est infiniment plus complexe à mettre en oeuvre et ne devra être choisie que dans les cas extrêmes (souvent des systèmes simples que l'on veut très rapides). Par défaut, nous choisirons systématiquement une solution entièrement synchrone.

Le système numérique, représenté sur la Figure 5, est décomposé en quatre sous-systèmes plus simples. Remarquons que l'horloge, générée par un oscillateur 1MHz, est commune à tous les modules. Cette architecture doit être validée avant de s'attaquer successivement à la synthèse puis à la simulation de chaque module. L'interconnexion entre les différents modules fait apparaître des signaux intermédiaires.

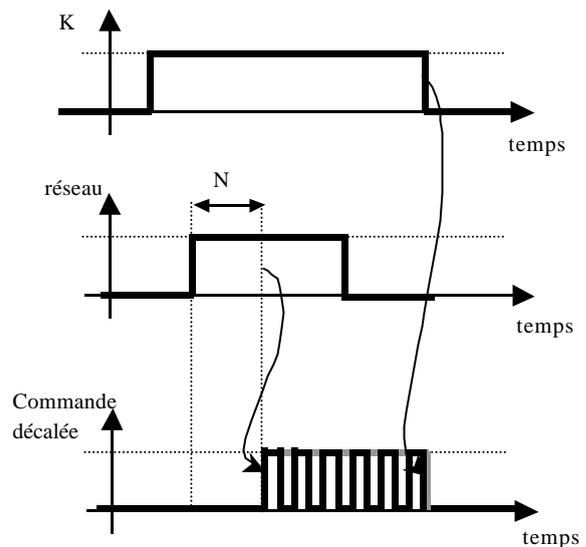


Figure 4 : Chronogrammes de la commande décalée

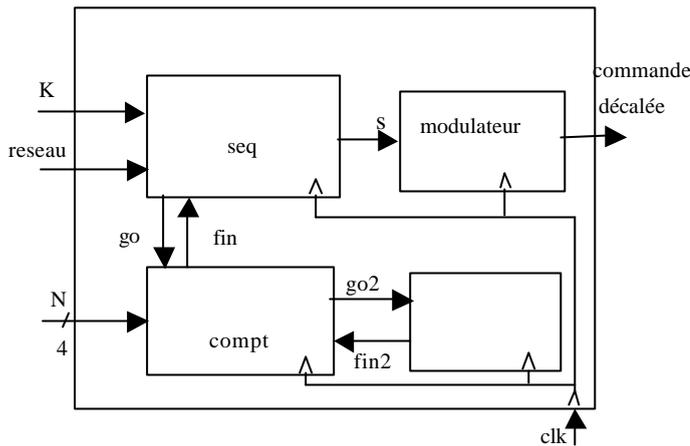


Figure 5 : Décomposition du système en modules élémentaires.

Le module "seq", âme centrale du système, est une machine d'état permettant d'assurer la séquence de la Figure 4. Ce séquenceur génère un signal de commande décalé, noté s , qui n'est pas encore modulé – la modulation sera réalisée par l'entité "modulateur". Le séquenceur fait appel à un module "compt" par émission d'une requête, go , et celui-ci lui indique la fin du retard après N ms (via le signal fin). Le diagramme d'état de ce petit séquenceur est représenté sur la Figure 6. Le compteur de N événements (durée spécifiée par la roue codeuse) déclenche N fois un "timer". Le module "timer" active le signal intermédiaire, $fin2$, une milliseconde après son déclenchement par le signal $go2$.

Chaque module peut être décrit et simulé (voir testé) séparément. Les fichiers sources de description en VHDL sont disponibles sur le site internet de la revue (www.lesite3ei.com). Cette modularité permet de détecter plus aisément les erreurs éventuelles. Dans un dernier temps, les différents modules sont réunis dans un projet.

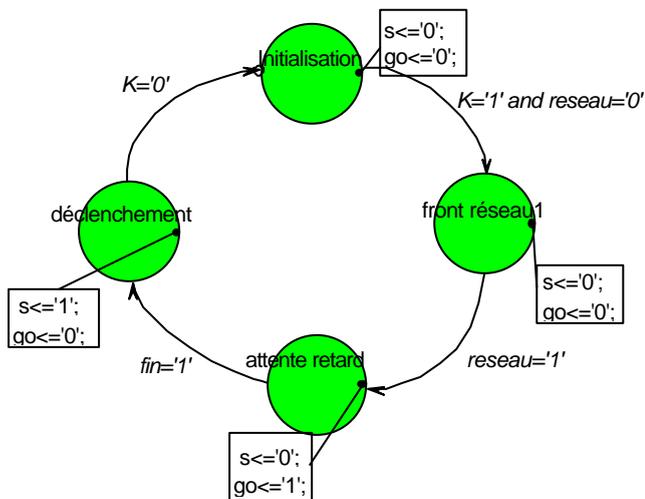


Figure 6 : Diagramme d'état du séquenceur

Le fichier source de plus haut niveau décrit l'interconnexion des modules, c'est à dire la Figure 5.

Lorsque l'ensemble du projet est validé par simulation, la programmation et le test du composant (et de la maquette) peuvent être effectués.

IV Résultats expérimentaux

Nous avons choisi de tester ce dispositif pour étudier la mise sous tension d'un transformateur. La tension du réseau, $V_{Réseau}$, est directement connectée aux bornes d'un enroulement. Le flux magnétique à travers une section droite du circuit ferromagnétique, noté f , est imposé par la tension réseau via l'Eq. 1 (où $t=0$ est l'instant d'enclenchement, φ l'angle permettant de définir la condition initiale, V est la valeur efficace de la tension du réseau, n est le nombre de spires de l'enroulement, et ω est la pulsation du réseau). Cette relation suppose que l'on néglige la chute de tension due à la résistance des fils. L'expression du flux (Eq. 2) se déduit donc de la relation 1.

$$v_{Réseau}(t) = V\sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi_0) = n \frac{df}{dt} \quad (1)$$

$$f(t) = -\frac{V\sqrt{2}}{n\omega} \cos(\omega t + \varphi_0) + C \quad (2)$$

La constante C est fixée par les conditions initiales. On supposera qu'à l'instant d'enclenchement ($t = 0$), le flux magnétique est nul (Eq. 3). Cette condition n'est vérifiée que si l'on prend soin de démagnétiser le circuit ferromagnétique avant chaque déclenchement.

$$f(t) = \frac{V\sqrt{2}}{n\omega} [\cos(\varphi_0) - \cos(\omega t + \varphi_0)] \quad (3)$$

On constate alors que le flux magnétique atteint un extremum, noté f_{max} , dont l'amplitude dépend de la condition initiale (Eq. 4). Cet extremum sera maximal pour $\varphi_0 = 0 + k\pi$ c'est à dire pour une mise sous tension au passage par zéro de la sinusoïde de secteur.

$$f_{max} = \frac{V\sqrt{2}}{n\omega} [1 + |\cos(\varphi_0)|] \quad (4)$$

À la suite d'une mise sous tension de transformateur, le flux magnétique peut donc varier du simple au double. Ce phénomène entraîne éventuellement un appel de courant magnétisant important lorsque la saturation du matériau magnétique est atteinte. Les deux configurations extrêmes sont illustrées par les figures 7 et 8.

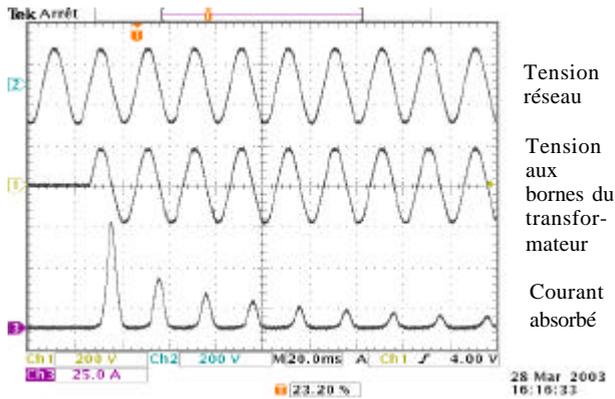


Figure 7 : Enclenchement au passage par zéro de la sinusoïde secteur ($t_r = 0$)

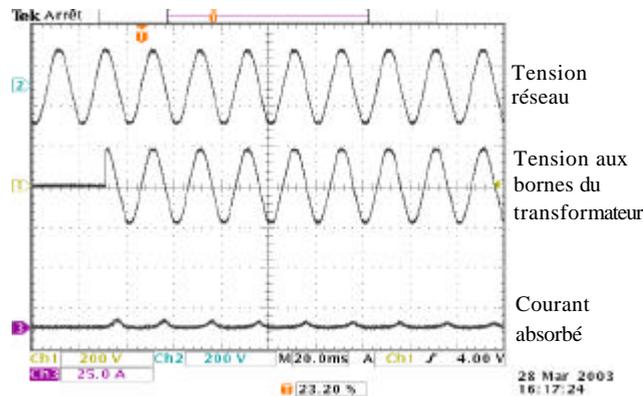


Figure 8 : Enclenchement au maximum de la sinusoïde secteur ($t_r = 5ms$)

Le déclenchement au passage par zéro de la tension du secteur est à l'origine de courants transitoires très importants (voir figure 7). Ce courant peut être positif ou négatif selon le signe de la dérivée de la tension au moment du déclenchement. Le régime transitoire dépend de la résistance des fils d'enroulement qui introduit une contre-réaction naturelle tendant à éliminer la composante continue du champ magnétique (donc du courant). Le régime permanent est atteint au bout de quelques périodes du secteur. Nous avons représenté sur la figure 9 les points de fonctionnement du circuit magnétique dans le plan de l'induction magnétique en fonction du courant primaire. Nous observons l'évolution des cycles d'hystérésis sur une période: durant la première période du régime transitoire (courbe grise) et après 150 ms, c'est à dire quasiment en régime permanent (courbe foncée).

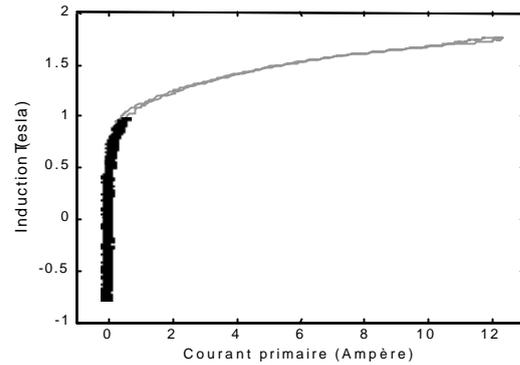


Figure 9 : Cycles d'hystérésis mesurés sur une période ; juste après l'enclenchement (courbe grisée) et au bout de 150 ms, lorsque le régime permanent est bientôt atteint (courbe foncée).

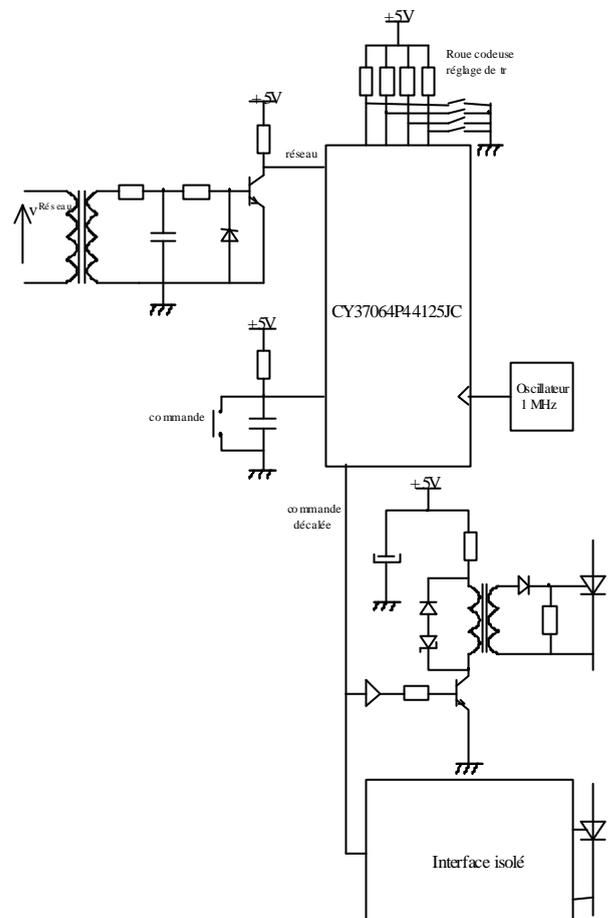


Figure 10 : Schéma électrique de la maquette complète.

V Conclusion

Cette maquette est utilisée par les étudiants de Génie Electrique et de Physique Appliquée, pour l'étude de régimes transitoires lors de la mise sous tension ou de court-circuit. La programmation *in situ* du CPLD nous permet également d'utiliser cette maquette, pour l'illustration du principe de hiérarchisation des systèmes numériques synchrones et permettre aux étudiants d'acquérir la notion de conception sous forme de projet.

RÉGLAGE D'UN SYSTEME PAR PLANS D'EXPERIENCES (SUITE)

Jean FILIPPINI

10, rue de la Fondation Prud'homme
88 000 EPINAL

Les plans d'expériences : suite de l'article paru dans
le numéro 33 de la revue 3EI (juin 2003)

Introduction :

Pierre et Jean ont subi un test de préparation à un concours. Ils ne sont pas allés voir leur note. Pour le formateur, il n'y a aucun doute, Pierre sera admis et Jean sera éliminé.

Lors du concours, ils sont à la même table, les questions sont semblables, le surveillant est obligé de s'absenter un moment.

Pouvez vous prévoir le résultat ?

Si la sentence n'est pas conforme aux prévisions du formateur, nous dirons qu'il y a une **interaction** entre Pierre et Jean sur le résultat du concours.

L'ingéniosité de *TAGUCHI* est d'avoir organisé les essais pour pouvoir mettre en évidence les interactions.

Réglage du système de traction FERELEC :

Nota : Par la suite, il sera fait référence aux précédents articles. Je noterai « cas n°1 » l'article de La Revue 3EI n°32, « cas n°2 » celui de la revue n°33 etc. .

Dans l'édition précédente, nous avons abordé le réglage par plans d'expériences du mouvement d'un mécanisme répondant aux critères du cas n°2.

Dans l'article présent, nous allons nous placer dans le cas n°3, (voir les articles précédents).

Il me semble primordial d'habituer les étudiants à se plier aux exigences des clients.

Bref rappel :

Le système *FERELEC* offre la particularité de se comporter comme un système similaire à un train dans le domaine de l'électromécanique ; donc en boucle ouverte, pour une même consigne (figure 1) :

- 1- les couples et les puissances développés par le train et par le système sont dans un rapport de 1170.
- 2- Les accélérations et les vitesses angulaires des axes des moteurs sont dans un rapport 1.
- 3- Les courbes de la montée en vitesse en fonction du temps sont superposables.
- 4- Les réglages des correcteurs sont identiques.

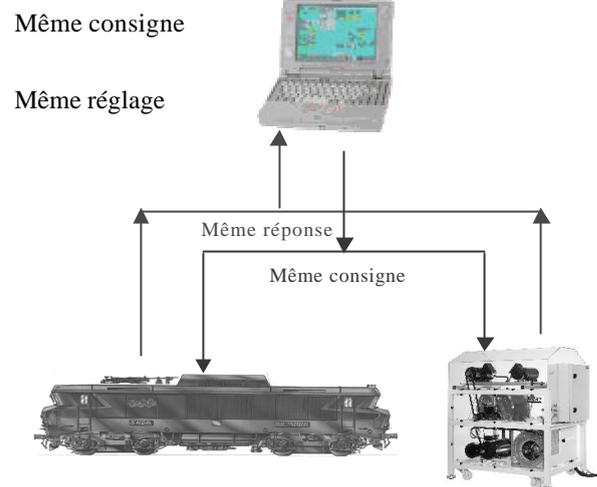


Figure 1

Pour obtenir des comportements identiques, les paramètres des correcteurs de la locomotive et du système seront identiques.

Rappel complémentaire:

Mon souci permanent est de décomplexer le technicien à qui on fait croire qu'il ne peut pas régler un mouvement parce que son niveau en mathématique est insuffisant.

Objectifs :

Je propose d'aborder deux sujets.

- 1- Rechercher un pré-réglage pouvant servir de pivot pour exécuter le plan n°1.
Je vous invite ensuite à relire les articles précédents.
- 2- Mettre en évidence et interpréter certaines interactions.

Nota : Le CD « Plans d'expériences » contient une documentation sur ce sujet.

La préparation.

Le cahier des charges :

Les conditions seront identiques à celles du cas n°2 soit :

La mise en vitesse du convoi doit être sans à coups ni patinage, une accélération de confort qui se traduit par un temps d'accélération de l'ordre de 60 secondes, une vitesse de croisière de 300 tr/min avec très peu de dépassement.

Les facteurs externes sont :

- La charge totale : 170 tonnes,
- La voie : horizontale,
- La consigne de vitesse : unique
- Le rail : sec.

Ces facteurs seront fixes.

Les conditions initiales :

- Le mécanisme est piloté par PC.
- Le mécanisme ne fonctionne pas.
- Le régulateur est de type PI (le technicien a encore quelques notions d'automatique.)

Par prudence et par expérience, le technicien refuse toute modification des circuits, il interdit d'injecter une tension extérieure au système. Toute consigne doit être introduite par la voie normale en mode asservissement. Il devient donc impossible d'effectuer des essais en boucle ouverte. Il faut trouver une autre solution.

Lecture de la notice de réglage.

Voici quelques renseignements contenus dans la notice.

Schéma fonctionnel du mécanisme.

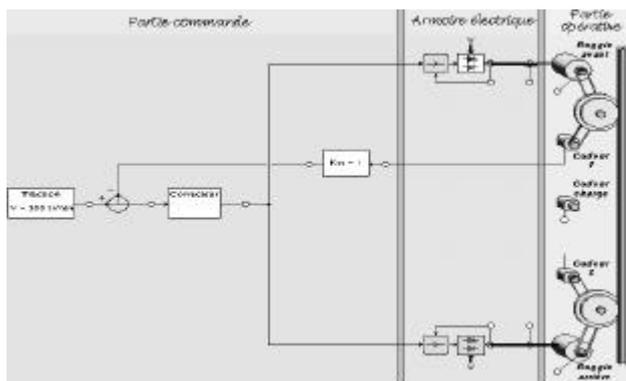


Figure 2

La partie opérative comprend deux axes motorisés qui actionnent l'un les quatre roues du bogie avant et l'autre les roues du bogie arrière. Chaque moteur est alimenté via un générateur de courant. La consigne des générateurs provient du correcteur. Celui-ci est activé par l'erreur de consigne de vitesse. Le retour de vitesse provient du codeur incrémental situé sur l'arbre du moteur d'un bogie.

Le correcteur.

La sortie S_r du correcteur provient de l'opération suivante : $S_r = (S_{r_p} + S_{r_i}) * K_c$.

S_{r_p} est une correction proportionnelle modifiée par K_p , S_{r_i} est une correction intégrale modifiée par T_i en secondes.

Il est possible de limiter la valeur de sortie du correcteur entre -60 et +60 Ampères.

Il est possible de supprimer l'une ou l'autre des actions (proportionnelle ou intégrale) :

K_p est modifiable de 0.01 à 1000

T_i de 1 à 1000

K_c de 0.01 à 1000

Ce sont les seuls éléments de réglage, ce sont les facteurs internes du plan.

Recherche d'un pré-réglage servant de pivot.

Les valeurs pour ce pré-réglage seront notées K_{p0} , T_{i0} , K_{s0} . Les méthodes industrielles ne manquent pas. (Broida, Nichols, Ziegler, CHR),

Méthode :

Compte tenu des exigences du client, je vais rechercher une valeur de K_{p0} qui permettra de mettre le mécanisme en mouvement soit par un essai oscillatoire soit par un essai statique ; les deux sont possibles.

Recherche de K_{p0}

Démarche.

- Annulation de l'action intégrale ,
- Introduction de la valeur 1 pour K_{c0} .
- Réduction de K_p minimum,
- Application d'une consigne de 300 tr/min.
- Mise en marche.
- Augmentation de K_p jusqu'à ce que la vitesse du mécanisme atteigne 150 tr/min.

On trouve 0.1 lors du réglage de K_p . Ce sera la valeur de K_{p0} .

Recherche de T_{i0} .

Démarche. A partir de l'état précédent.

- Augmentation de la consigne jusqu'à ce que la vitesse soit de 300 tr/min
- Mesure du courant dans les moteurs. On trouve 30 A.
- Arrêt du mécanisme.
- Limitation à 30 Ampères de la sortie du correcteur.
- Mise à 1 de la valeur K_p .

Préparation d'un échelon de 400 tr/min de consigne, ceci afin de saturer le correcteur.

- Mise en service.
- Observation des courbes de vitesse

Le temps de montée est de l'ordre de 30 s, nous prendrons cette valeur pour T_{i0} .

Le pivot sera $K_{c0}=1$, $K_{p0}=0.1$, $T_{i0}=30s$

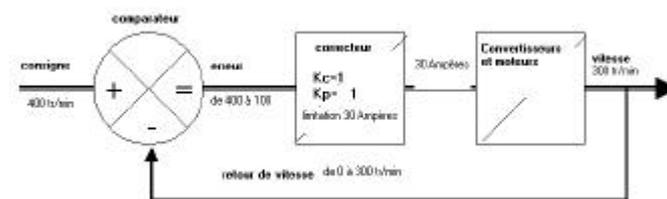


Figure 3

Le schéma ci-dessus (figure 3) montre que la sortie du correcteur sera toujours saturée à la valeur 30. Il s'agit bien d'une commande par échelon de courant.

On observe (figure 4) que la vitesse se fixe à 300 tr/min

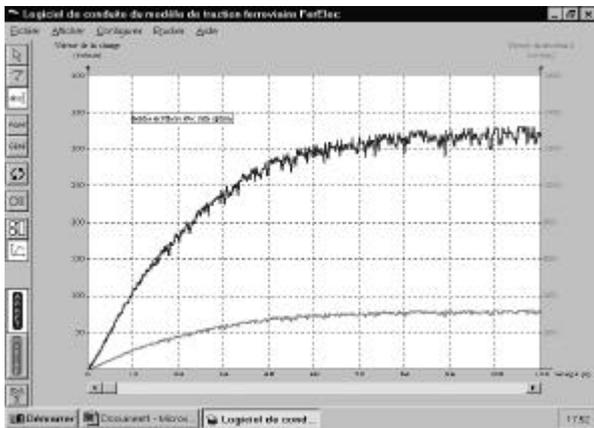


Figure 4

Fin de la recherche d'un pivot.

On peut constater que le pivot actuel est le même que celui du cas n°2. En conséquence, le réglage peut être obtenu et exécutant deux plans L4.2⁽³⁾. Alors, pourquoi faire simple quand on peut faire compliqué ? Cela dépend de l'objectif : Régler ou comprendre.

Généralités :

Lorsque le nombre de facteurs est de 3 à 7, il est possible d'effectuer une identification des influences en effectuant 8 essais plus l'essai de confirmation. Le tableau ci dessous (figure 4) montre les valeurs à donner aux facteurs F1...F7 pour les différents essais.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Essai n°1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Essai n°2	1.00	1.00	1.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Essai n°3	1.00	2.00	2.00	1.00	1.00	2.00	2.00
Essai n°4	1.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.00	1.00
Essai n°5	2.00	1.00	2.00	1.00	2.00	1.00	2.00
Essai n°6	2.00	1.00	2.00	2.00	1.00	2.00	1.00
Essai n°7	2.00	2.00	1.00	1.00	2.00	2.00	1.00
Essai n°8	2.00	2.00	1.00	2.00	1.00	1.00	2.00

Figure 4

Les graphes des influences obtenus pour les réponses REP1 et REP2 qui, je précise, sont des valeurs fantaisistes sont reproduits figure 5.

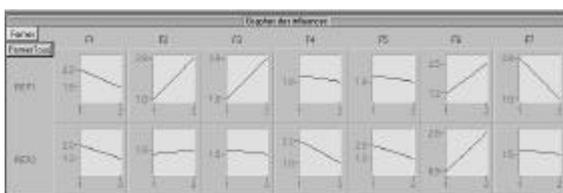


Figure 5

Comme toujours, l'essai de validation doit venir confirmer les analyses. Si le nombre de facteurs est de 3 ou 4, il est possible de mettre en évidence des phénomènes d'interactions entre facteurs.

Dans le tableau ci-dessous, figure 7, on teste les facteurs F1, F2, F4, et F7.

- L'interaction F1.F2 est dans la colonne 3.
- L'interaction F1.F4 est dans la colonne 5.
- L'interaction F2.F4 est dans la colonne 6.

	A	B	A.B	C	A.C	B.C	0
Essai n°1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Essai n°2	1.00	1.00	1.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Essai n°3	1.00	2.00	2.00	1.00	1.00	2.00	2.00
Essai n°4	1.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.00	1.00
Essai n°5	2.00	1.00	2.00	1.00	2.00	1.00	2.00
Essai n°6	2.00	1.00	2.00	2.00	1.00	2.00	1.00
Essai n°7	2.00	2.00	1.00	1.00	2.00	2.00	1.00
Essai n°8	2.00	2.00	1.00	2.00	1.00	1.00	2.00

Figure 7

Début du plan N°1

Comme à l'habitude, j'utilise le logiciel « Plans d'expériences » ceci me permet de me consacrer à la partie technique. Le nombre de facteurs internes est de trois. Le logiciel nous propose soit une table L4.2⁽³⁾, déjà utilisée lors des précédents articles, soit une table L8⁽⁷⁾. Cette table est utilisée lorsque le nombre de facteurs est de 3 à 7. Il nécessite de réaliser 8 essais. Si le nombre de facteurs est inférieur à 5, il est possible de mettre en évidence les interactions entre 3 des facteurs. Je vais donc utiliser cette possibilité.

Toujours pour ne pas impressionner l'auditoire en parlant d'action intégrale, de pôle, de zéro, les facteurs seront nommés A, B, C. Les niveaux seront 0.02 et 0.3 pour A, 10 et 90 pour B et 0.3 et 3 pour C.

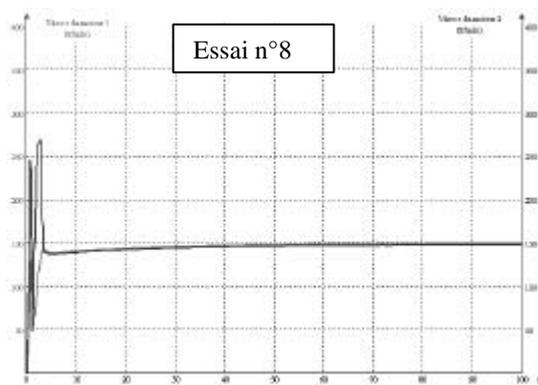
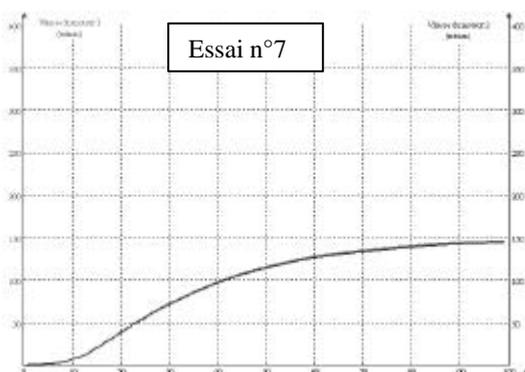
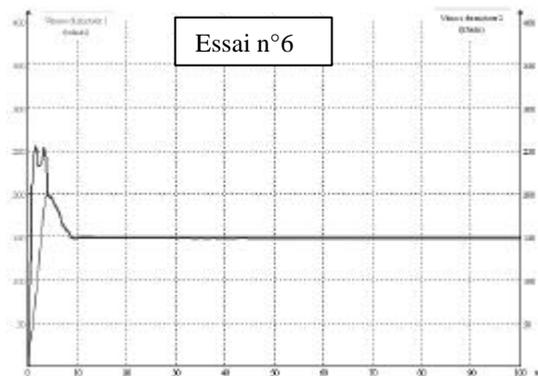
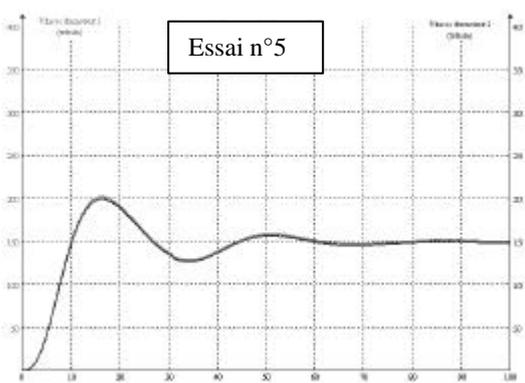
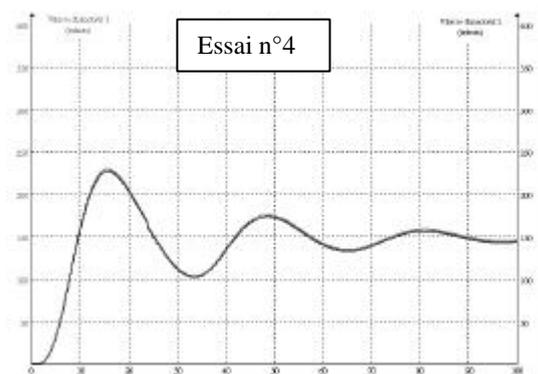
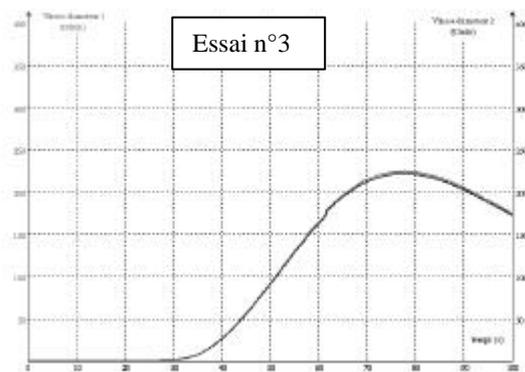
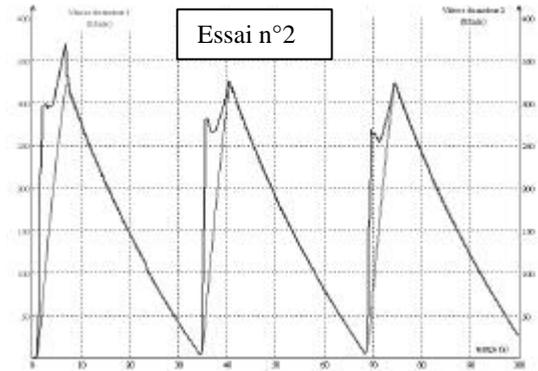
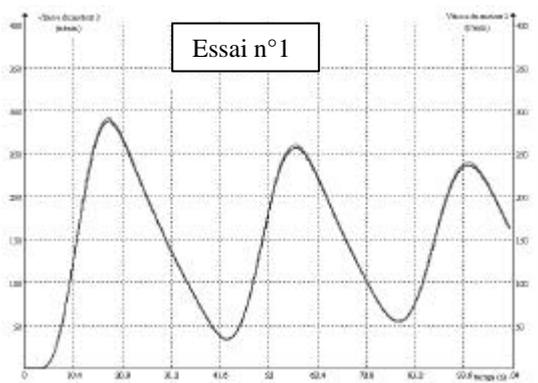
Tableau des essais du plan L8.2⁽⁷⁾ (figure 8)

	A	B	C
Essai n°1	0.02	10.00	0.30
Essai n°2	0.02	10.00	3.00
Essai n°3	0.02	90.00	0.30
Essai n°4	0.02	90.00	3.00
Essai n°5	0.30	10.00	0.30
Essai n°6	0.30	10.00	3.00
Essai n°7	0.30	90.00	0.30
Essai n°8	0.30	90.00	3.00

Figure 8

Les 8 essais du plan sont prévus et organisés. Nous pouvons remarquer que les essais n° 1,3,6,7 sont les essais effectués lors du cas n°2. Cette remarque nous permet d'économiser 4 essais si, à la suite d'un plan L4.2⁽³⁾, nous décidons d'approfondir l'analyse avec

un plan L8.2⁽⁷⁾. Les résultats des 8 essais du plan représentant l'évolution de la vitesse des deux axes motorisés sont représentés figure 9.



Figures 9

Traitement des résultats :

Nous observons des oscillations, des patinages, des accélérations différentes, des retards au démarrage. (figure 10)

En premier lieu, il faut démarrer sans patiner, puis avoir un mouvement stable. C'est pourquoi je vais m'intéresser aux oscillations et au patinage. Comme dans le cas n°2, les oscillations seront notées AMPLI, le patinage noté PATIN. AMPLI sera déterminé comme dans le cas n°2, PATIN sera une note permettant de classer l'importance du phénomène. Par exemple, la valeur maximale de la vitesse atteinte par l'axe fou : il faut essayer de trouver un outil de notation objectif. Comme cela ne coûte rien, je vais également analyser la durée du retard au démarrage noté RETAR.

Fermer (ESC)	AMPLI	PATIN	RETAR
Essai n°1	41.00	0.00	2.80
Essai n°2	54.00	375.00	0.80
Essai n°3	6.00	0.00	24.80
Essai n°4	10.00	0.00	0.80
Essai n°5	3.00	0.00	0.80
Essai n°6	1.00	250.00	0.40
Essai n°7	0.00	0.00	0.80
Essai n°8	0.00	270.00	0.40

Figure 10

Graphes d'influences de AMPLI et PATIN
Cas n°3 plan L8.2⁽⁷⁾. (figure 11)

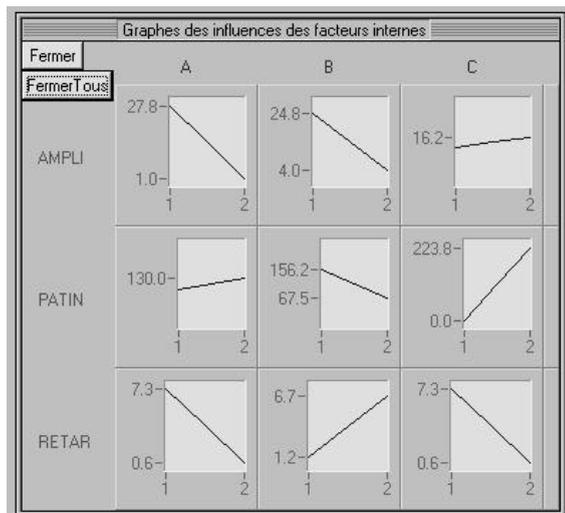


Figure 11

Par curiosité, je vais comparer ces graphes d'influences avec ceux du cas n°2.

Graphes d'influences de AMPLI et PATIN

Cas n°2 : Plan L4.2⁽³⁾ (figure 12)

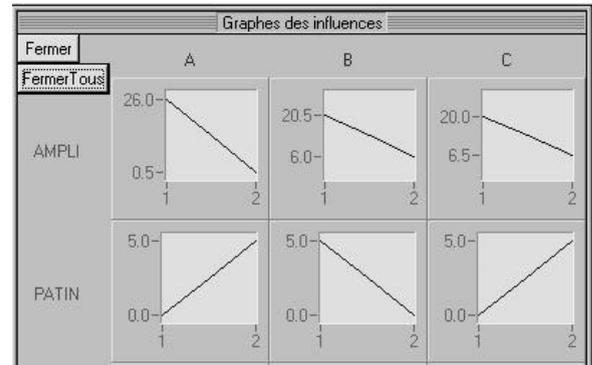
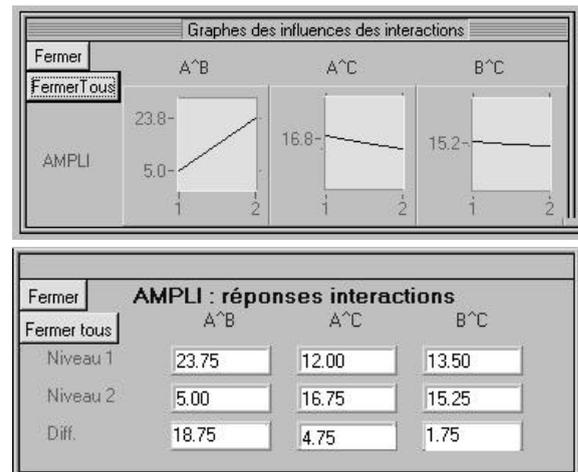


Figure 12

On peut constater une similitude des graphes sauf pour ce qui concerne le facteur C sur la réponse AMPLI. **Étrange !**

Je vais approfondir l'analyse de cette réponse. Pour cela, j'observe les graphes des interactions sur la réponse AMPLI.

Graphes des interactions sur AMPLI (figures 13)



Figures 13

A^B représente l'interaction entre A et B etc. Plus la pente est élevée, plus l'interaction est importante. J'observe que l'interaction A^B est importante, que l'interaction A^C est négligeable et que l'interaction B^C est négligeable. Je ne m'intéresse qu'à l'interaction entre les facteurs A et B. Cela veut dire que si l'un ou l'autre des facteurs A et B change de niveau, la réponse Ampli sera modifiée de la variation due au facteur augmentée de la variation due à l'interaction.

J'approfondis encore l'analyse A^B.

Parmi les 4 combinaisons des facteurs A et B, je recherche l'influence de chacune. A cet effet on dispose des graphes des influences des combinaisons.

Influences des combinaisons Ax.Bx. sur AMPLI (figure 14)

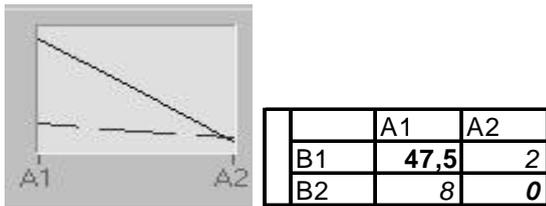


Figure 14

On observe deux segments, l'un en trait plein (SEG 1), l'autre en trait mixte (SEG 2) :

- L'ordonnée droite de SEG 1 (47,5) est la moyenne AMPLI imputable à la combinaison A1.B1, alors que son ordonnée gauche (0) est la moyenne AMPLI imputable à la combinaison A2.B2.
- L'ordonnée droite de SEG 2 (8) est la moyenne AMPLI imputable à la combinaison A1.B2, alors que son ordonnée gauche (2) est la moyenne AMPLI imputable à la combinaison A2.B1.

On voit que SEG 1 est très incliné. La variation A1B1/A2B2 est celle qui produit la plus forte variation de AMPLI. La combinaison A1B1 est celle pour qui AMPLI est maximale. Pour vérifier cette constatation, il suffit de revoir les essais pour lesquels A et B étaient au niveau 1. Ce sont les essais n°1 et n°2 (voir figure 15).

Puisque les combinaisons sont A1.B1.C1 et A1.B1.C2, l'analyse est validée.

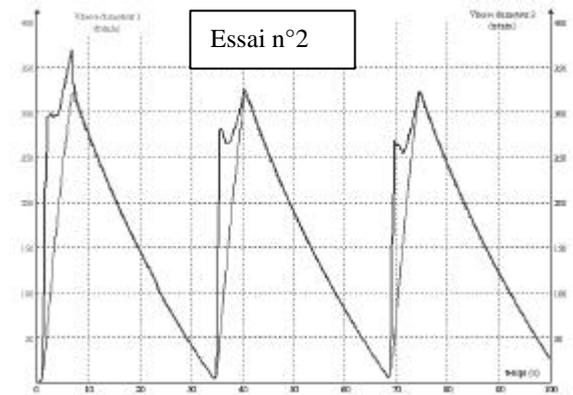
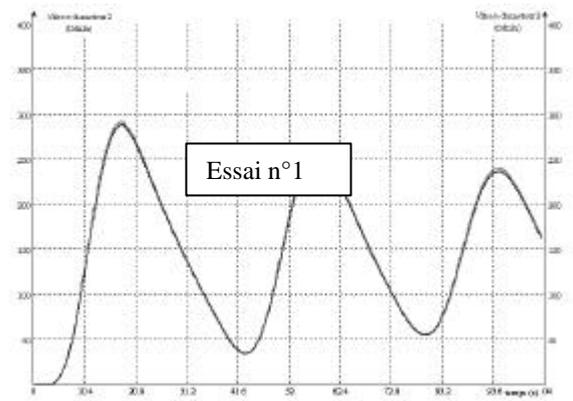


Figure 15

Récapitulation de toutes les interactions et des influences des combinaisons des facteurs (Figure 16)

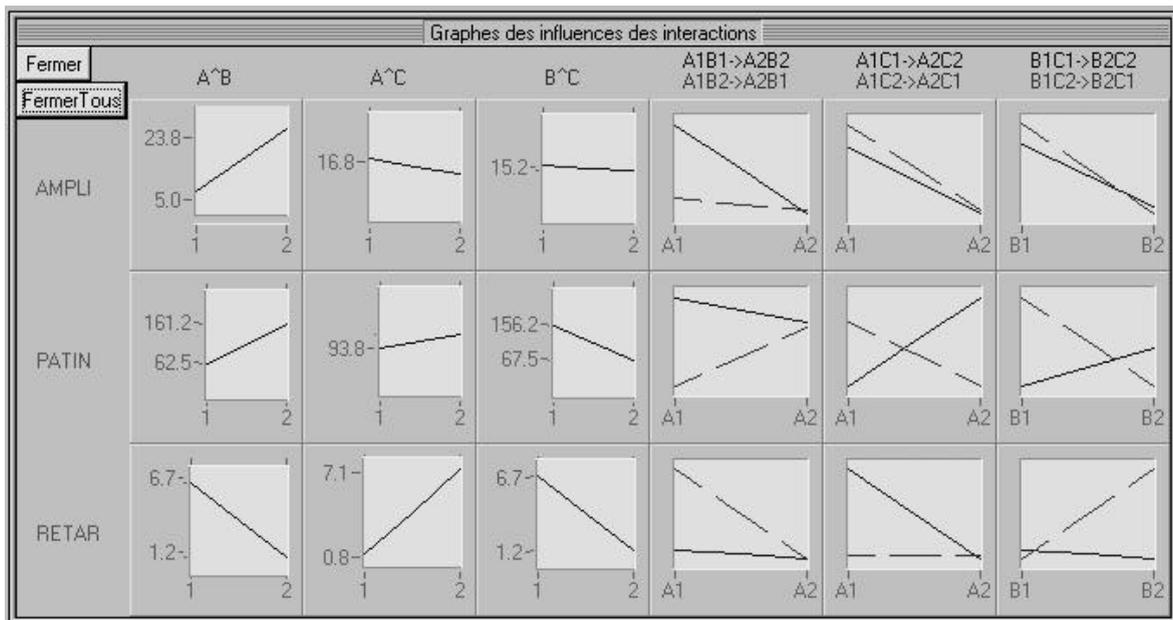


Figure 16

Influences des combinaisons sur la réponse PATIN (figure 17).

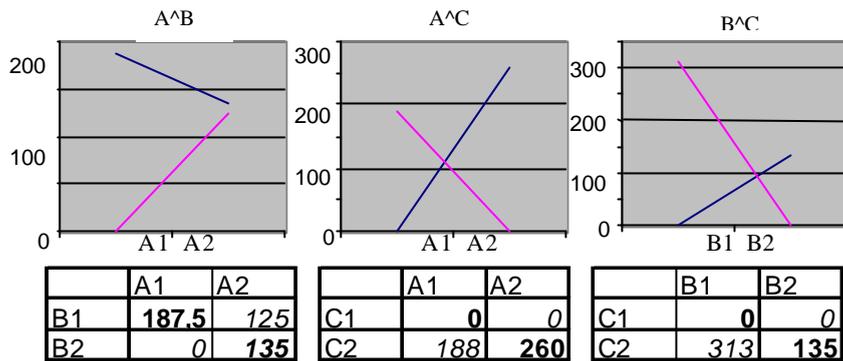


Figure 17

On constate que l'interaction la plus importante est obtenue par la combinaison B1C2

Influences des combinaisons sur la réponse RETAR (figure 18)

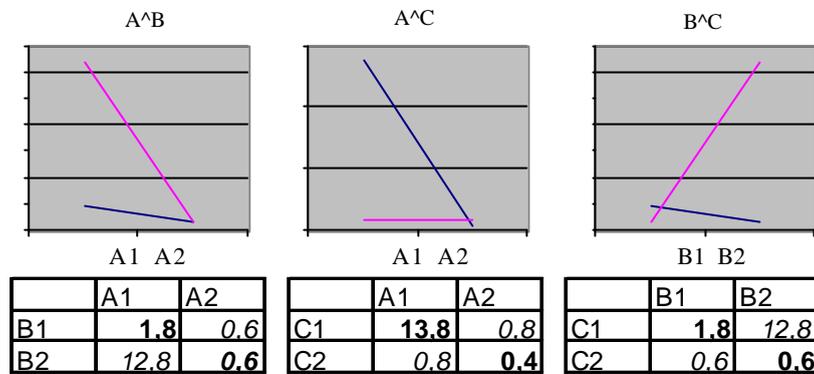


Figure 18

On constate que l'interaction la plus importante est obtenue par la combinaison A1C1

Fin du plan d'approche, début du plan de réglage

Il faut éviter les combinaisons A1B1 pour les oscillations, B1C2 pour le patinage et A1C1 pour réduire le retard. Il y a contradiction sur le facteur C. Je décide donc de privilégier le patinage par rapport au retard. J'observe alors le résultat de la combinaison A2.B2.C1. C'est l'essai n°7.(figure 19)

Je remarque que sans le vouloir, la décision est celle prise lors du cas n°2. Cet essai va servir de pivot au plan suivant. Encore une fois, pour nous familiariser aux interactions, je vais effectuer un plan L8.2⁽⁷⁾ Les niveaux seront ceux du cas n°2. Ka= 0.3,Ti=90,Kc=0.3. Les résultats des essais sont rassemblés dans le tableau de la figure 20.

Essai PIVOT

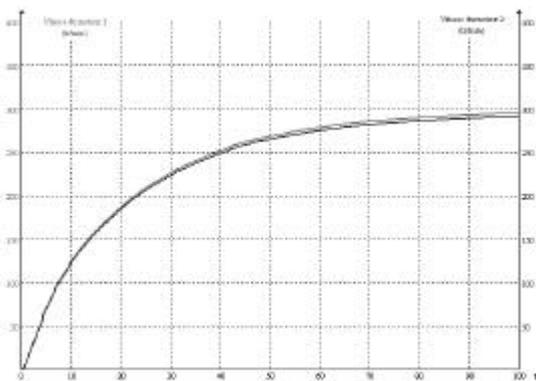
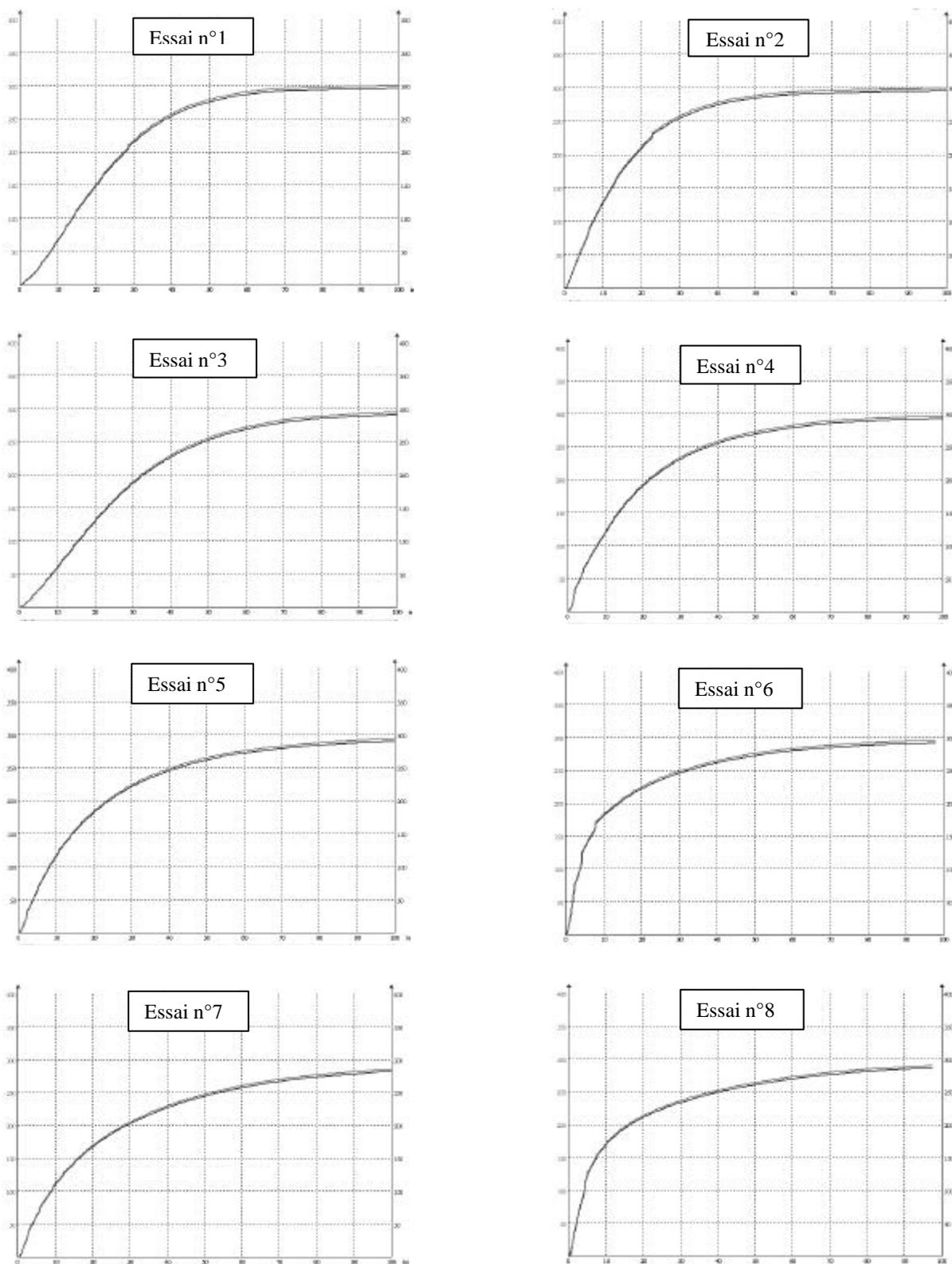


Figure 19

Les plans d'expériences			
Tableau des essais			
	A	B	C
Essai n°1	0.25	80.00	0.25
Essai n°2	0.25	80.00	0.35
Essai n°3	0.25	100.00	0.25
Essai n°4	0.25	100.00	0.35
Essai n°5	0.35	80.00	0.25
Essai n°6	0.35	80.00	0.35
Essai n°7	0.35	100.00	0.25
Essai n°8	0.35	100.00	0.35

Figure 20

Les 8 essais : Évolutions des vitesses des deux axes motorisés (figures 21).

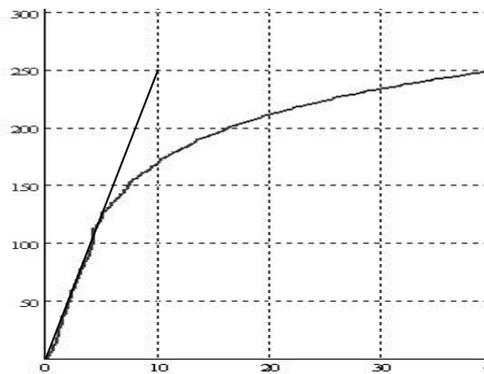
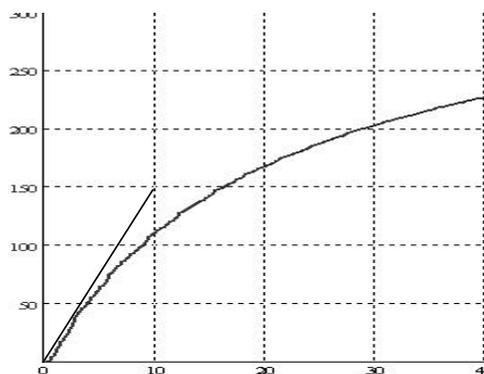
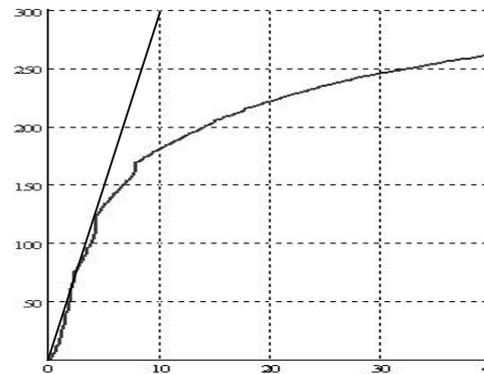
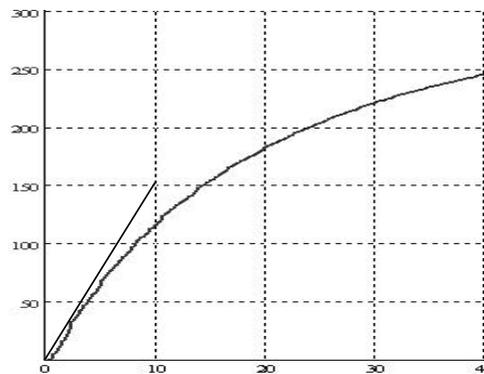
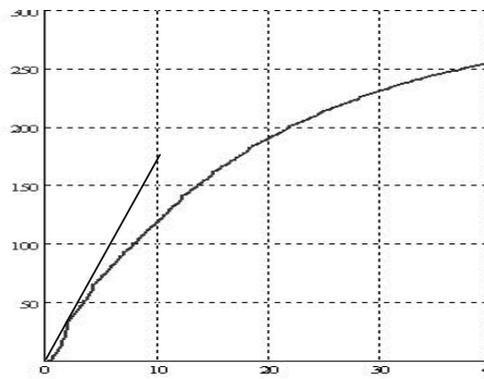
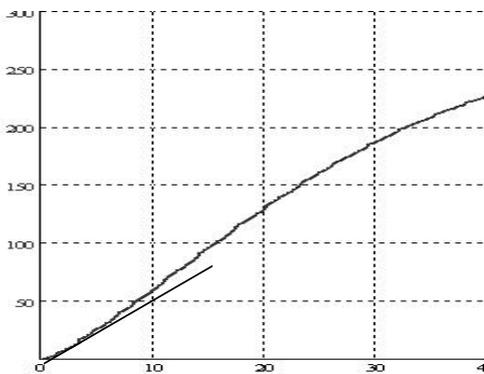
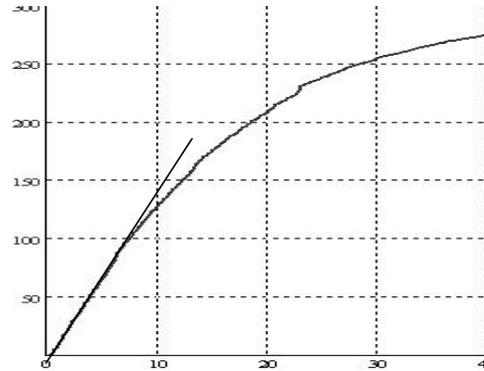
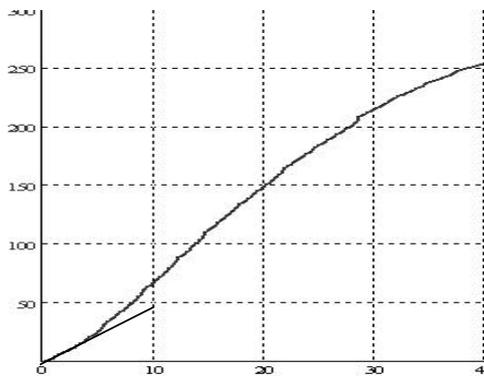


Figures 21
démarrage, la manière d'atteindre le pallier, etc. Tout est possible.

On peut remarquer que les résultats sont corrects. Néanmoins, nous allons analyser un certain nombre de particularités : le comportement au

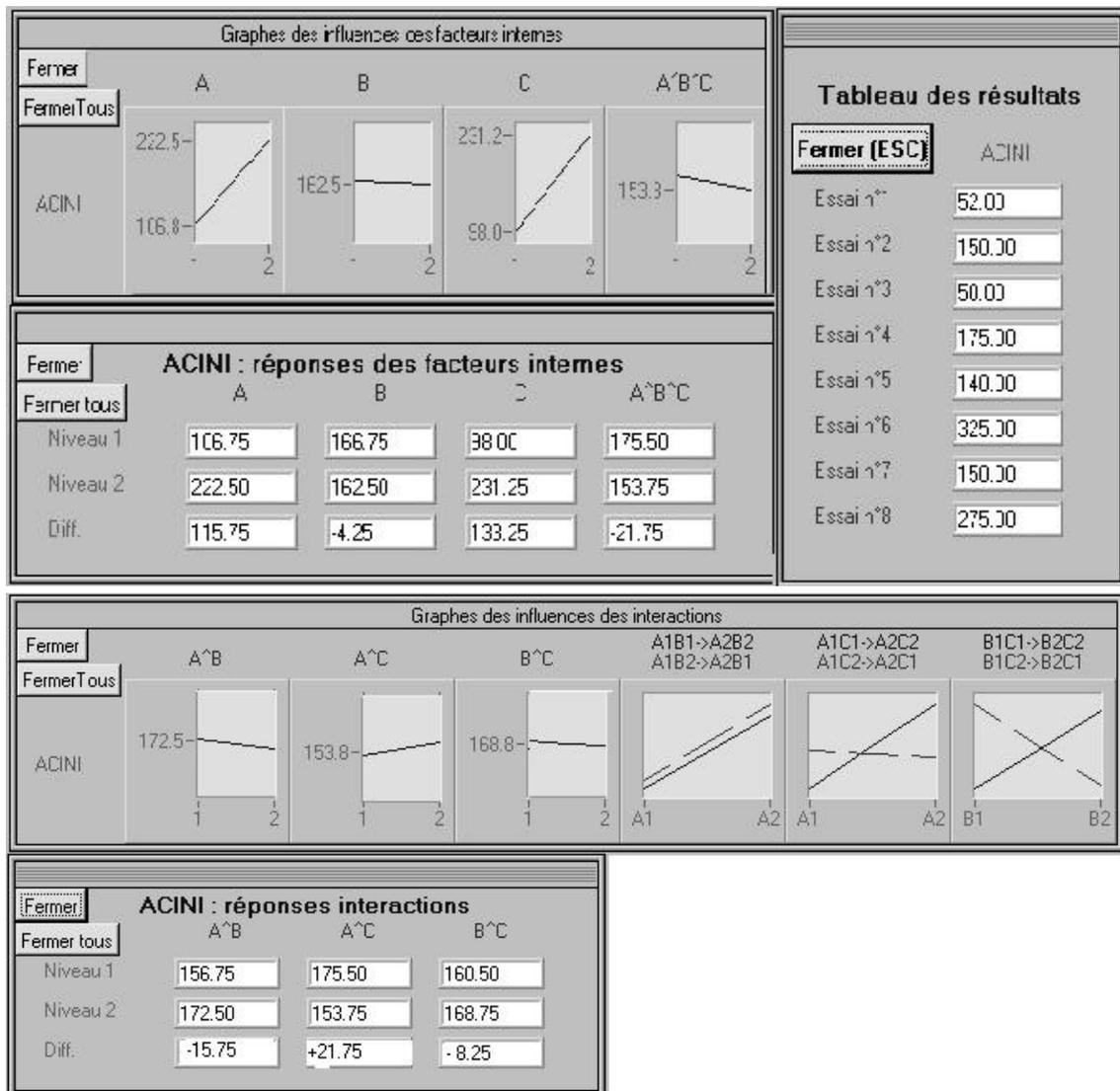
Analyse du début du mouvement., Zoom sur le démarrage (figures 22).

Nous allons tenter de comprendre ce qui provoque un beau démarrage progressif.



Figures 22

Vitesse atteinte en 10 s d'accélération INIT



Figures 23

On constate que :

- A et C ont une forte influence sur ACINI.
- B n'intervient pas.
- L'interaction entre A et B vaut -15.75
- L'interaction entre A et C vaut 21.75
- L'interaction entre B et C est faible -8.25
- L'interaction entre A, B et C vaut -21.75

Ces valeurs sont faibles par rapport aux influences de A et de C.

Comment utiliser ces renseignements ?

Voici un exemple simple. Les facteurs A, B, C sont ceux de l'essai N°1 (tous à 1), pour connaître ACINI si tous les facteurs sont au niveau 2, il faut effectuer l'opération suivante.

$$ACINI = ACINI(1) + \Delta(A) + D(B) + D(C) + D(A^B) + D(A^C) - D(A^B^C)$$

soit

$$ACINI = 52 + 115.75 - 4.25 + 133.25 - 15.75 + 21.75 - 8.25 - 21.75$$

$$ACINI = 274$$

Remarque :

Je rappelle que dans les cas N°1 et N°2, ce mécanisme a été réglé sans tenir compte des interactions. Ce sujet doit être abordé seulement si les étudiants ont bien assimilé la démarche sans interactions et si le but est de comprendre ce qui se passe.

Voici les analyses de la vitesse atteinte en 60 secondes et de la variation de vitesses entre les instants 30 et 60 secondes.

Analyse de la vitesse atteinte au bout de 60 secondes

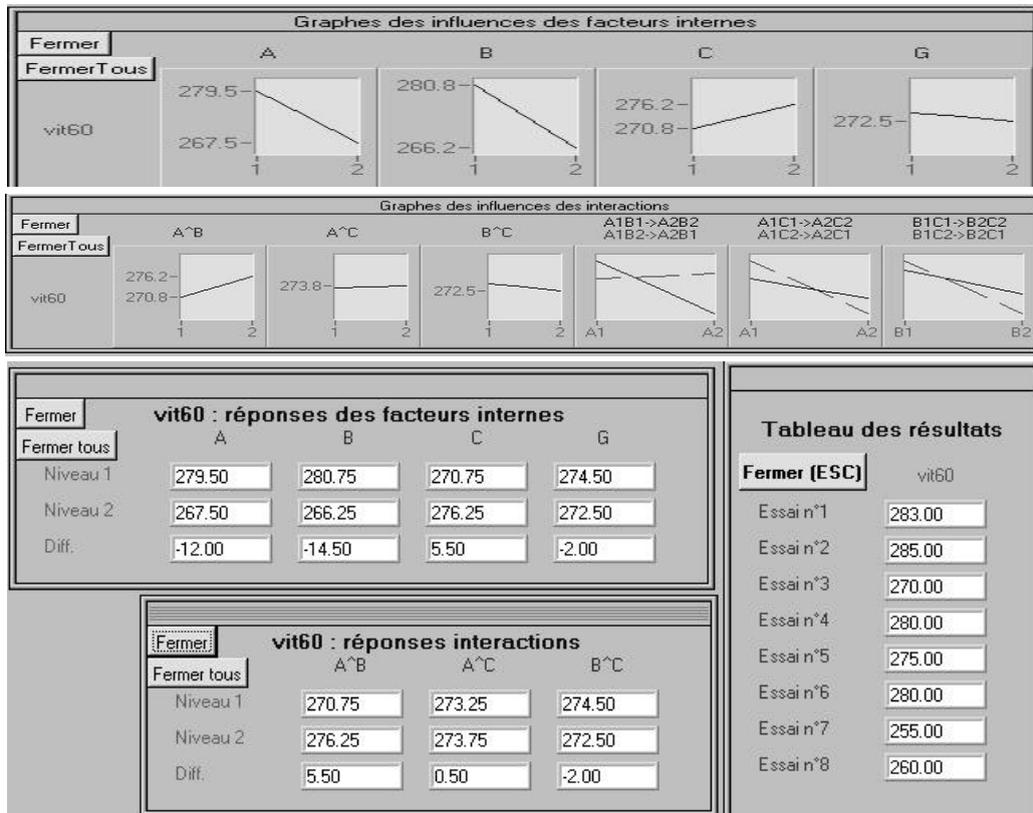
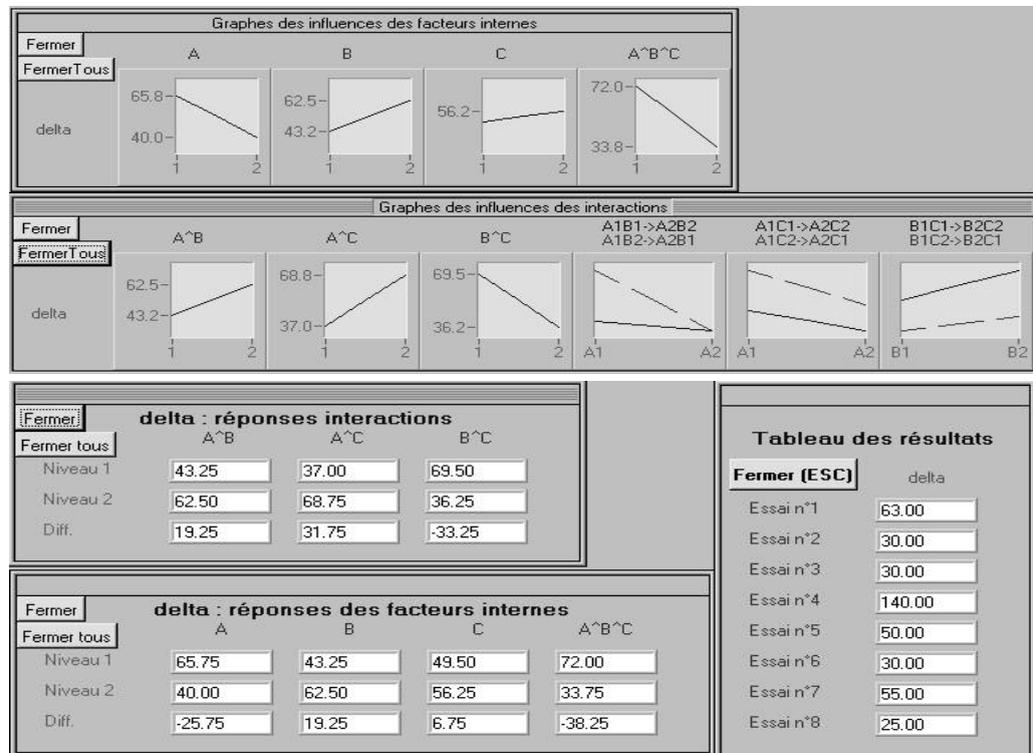


Figure 24

Variation de vitesse entre la 30^{ème} et la 60^{ème} seconde



Figures 25

Précisions concernant les interactions.

(Selon la méthode exposée par *Jeanne Fine* professeur d'université à l'IUFM de Toulouse, spécialiste des statistiques et qui a enseigné les plans d'expériences dans le DESS de gestion de production à l'université de Toulouse II.)

Le tableau L82⁽⁷⁾ (figure 26) est construit de la manière suivante.

A, B, C sont les facteurs. Le signe + est appliqué lorsque le facteur est à son niveau 2, le signe - lorsqu'il est à son niveau -1.

Les interactions A^B, A^C, B^C et A^B^C sont considérées comme des facteurs.

Je remplis les cellules de la colonne réponses des valeurs relevées pour la réponse AMPLI. Chaque Delta est obtenu en faisant la moyenne des produits de chaque réponse par le signe affecté au facteur.

N°	Réponses	A	B	C	A^B	A^C	B^C	A^B^C
1	41	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1
2	54	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
3	6	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
4	10	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1
5	3	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1
6	1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1
7	0	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1
8	0	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
	Moyenne pivot	Delta(A)	Delta(B)	Delta(C)	Delta(A^B)	Delta(A^C)	Delta(B^C)	Delta(A^B^C)
	14,375	-13,4	-10,4	1,875	9,375	-2,38	-0,88	1,375

Figure 26

On observe que la réponse moyenne (14.375) est théoriquement celle de l'essai pivot que l'on peut retrouver dans l'article du cas n°2. On peut constater que les facteurs A et B sont l'objet d'une interaction (9,375) très importante sur la réponse AMPLI puisque du même ordre que les influences de A et de B. Il faut noter que les amplitudes sont égales à la moitié de celle indiqué par le logiciel car celui ci tient compte l'évolution du niveau 1 au niveau 2 des facteurs.

Comment interpréter ces résultats ?

La réponse AMPLI d'un essai est égale à la moyenne pivot augmentée de l'effet algébrique de chaque facteur et de chaque interaction.

L'effet algébrique d'un facteur est égal à son Delta multiplié par le coefficient figurant dans sa cellule. Ainsi la réponse AMPLI de l'essai N°5 est obtenue de la manière suivante :

$$\text{Rep}(5) = \text{Moyenne} + \text{Delta}(A) * (+1) + \text{Delta}(B) * (-1) + \text{Delta}(C) * (-1) + \text{Delta}(A^B) * (-1) + \text{Delta}(A^C) * (-1) + \text{Delta}(B^C) * (+1) + \text{Delta}(A^B^C) * (+1)$$

Pour montrer la puissance de la méthode, je vais à partir de cette réponse, prévoir tous les essais effectués.

Les résultats sont les suivants. (figure 27)

Chaque Delta est affecté du signe de son action. Pour obtenir la réponse prédite, il faut faire la somme horizontale de chaque valeur. On remarque que l'on trouve exactement les valeurs mesurées.

N° essai	Moyenne	Delta(A)	Delta(B)	Delta(C)	Delta (A^B)	Delta (A^C)	Delta (B^C)	Delta (A^B^C)	Réponses
1	14,38	13,38	10,38	-1,88	9,375	-2,38	-0,88	-1,38	41
2	14,38	13,38	10,38	1,875	9,375	2,375	0,875	1,375	54
3	14,38	13,38	-10,4	-1,88	-9,38	-2,38	0,875	1,375	6
4	14,38	13,38	-10,4	1,875	-9,38	2,375	-0,88	-1,38	10
5	14,38	-13,4	10,38	-1,88	-9,38	2,375	-0,88	1,375	3
6	14,38	-13,4	10,38	1,875	-9,38	-2,38	0,875	-1,38	1
7	14,38	-13,4	-10,4	-1,88	9,375	2,375	0,875	-1,38	0
8	14,38	-13,4	-10,4	1,875	9,375	-2,38	-0,88	1,375	0

Figure 27

Nous disposons maintenant d'un outil qui nous permet de connaître l'influence de chaque facteur sur n'importe quelle particularité du mouvement.

Par exemple : le retard au démarrage, le temps mis pour atteindre une certaine vitesse, la vitesse

atteinte à un instant donné, l'accélération à un instant donné etc.

On peut observer au cours du temps ou du mouvement l'importance de chaque facteur et de chaque interaction. La connaissance des influences et des interactions nous permet d'effectuer les réglages permettant de modifier le comportement en connaissance de cause.

Exemple :

Le réglage est celui de l'essai n°3 pour lequel les valeurs des facteurs sont 0.25 pour A, 100 pour B et 0.25 pour C. On désire réduire encore la montée en vitesse et prévoir le résultat. A l'aide des fichiers de points fournis par le logiciel *FERELEC*, je construis le tableau suivant (figure 28).

temps	1	2	3	4	5	6	7	8
10	67,491	128,18	59,679	119,97	116,86	183,02	111,55	170,46
20	149,74	209,82	129,67	192,27	185	224,18	169,27	213,72
30	216,47	257,41	188,77	233,22	223,42	248,23	204,64	236
40	256,44	277,31	228,62	257,74	248,23	264,21	229,2	251,92
50	278,07	287,25	254,59	272,28	264,32	275,07	247,03	263,53
60	289,64	292,75	271,38	281,58	275,14	282,95	260,16	272,32
70	295,18	295,1	282,23	288,3	282,01	287,51	269,46	279,04
80	296,98	296,51	288,16	291,88	286,96	291,05	276,4	283,85
90	298,25	297,53	291,38	294,2	290,76	293,37	280,89	287,36
100	299,37	298,43	293,8	295,72	293,15	295,69	285,08	290,87

Figure 28 : vitesses atteintes aux instants de 10 à 100 secondes au cours des essais n°1 à n°8.

Pour chaque ligne, on calcule l'effet de chaque facteur et interaction (figure 29).

temps	mov	da	db	dc	dab	dac	dbc	dabc
10	119,7	25,82	-4,24	30,76	-0,23	0,511	-0,96	-0,86
20	184,2	13,83	-7,98	25,79	1,429	-4,88	0,974	0,344
30	226	2,052	-10,4	17,7	2,61	-3,65	1,258	0,38
40	251,7	-3,32	-9,84	11,09	2,009	-1,41	1,874	-0,19
50	267,8	-5,28	-8,41	6,765	1,202	0,047	1,783	-0,34
60	278,2	-5,6	-6,88	4,16	0,478	0,832	1,43	-0,34
70	284,9	-5,35	-5,1	2,634	-0,16	1,136	1,279	-0,26
80	289	-4,41	-3,9	1,849	-0,54	1,036	0,944	-0,1
90	291,7	-3,62	-3,26	1,398	-0,71	0,873	0,925	0,04
100	294	-2,82	-2,65	1,164	-0,58	0,919	0,764	0,049

Figure 29 : à chaque instant, vitesse moyenne et influence de chaque interaction.

On peut alors observer comment évoluent les influences des facteurs au cours du temps (figure 30).

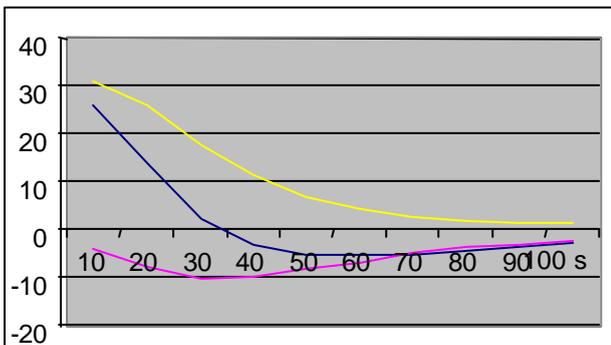


Figure 30 : influence des facteurs et interactions

Graphe des influences sur l'accélération initiale ACINI



Figure 31

Pour avoir une piste, j'observe le graphe des influences sur ACINI. Il montre qu'il faut réduire A et C, B est très peu influent. Je réduis A et C de 0.02 et j'augmente B de 2

Le tableau figure 31 indique que les interactions sont peu influentes. Cela m'arrange car je peux émettre l'hypothèse que, compte tenu de la faible modification des facteurs, les interactions ne varient pas.

VarA	VarB	VarC	préde	essai3
-0,02	2	-0,02	0	0
-10,33	-0,847	-12,3	36,201	59,679
-5,534	-1,595	-10,32	112,23	129,67
-0,821	-2,073	-7,078	178,8	188,77
1,3275	-1,968	-4,435	223,55	228,62
2,112	-1,682	-2,706	252,31	254,59
2,239	-1,376	-1,664	270,58	271,38
2,1395	-1,019	-1,054	282,3	282,23
1,7635	-0,78	-0,74	288,4	288,16
1,449	-0,652	-0,559	291,62	291,38
1,1265	-0,529	-0,466	293,93	293,8

Figure 32

Ce tableau récapitule les variations provoquées par les facteurs A, B et C, les vitesses prédéterminées et les vitesses atteintes lors de l'essai n°3.

Essai n°3 courbe supérieure et Prédiction.

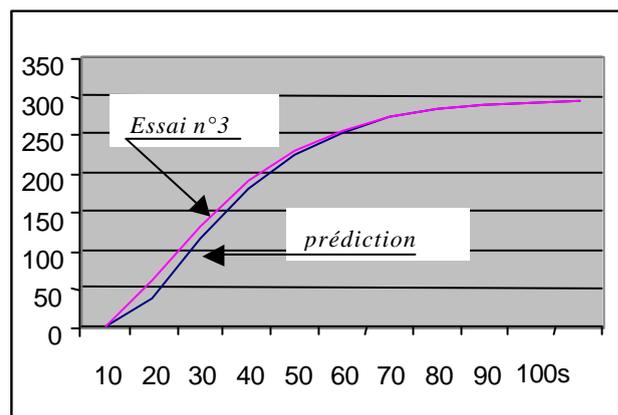


Figure 33

Au fait : Pierre et Jean sont reçus !

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

Christian LECLERC

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

suite de la 3ème partie : L'ère des thyristors, les derniers grands matériels à moteurs à courant continu

1978 : les rames TGV "Paris-Sud Est"

Expérimentations préliminaires :

Le TGV 001 à turbines, premier "TGV" du nom

Nous ferons d'abord un petit retour historique en 1972. La SNCF expérimentait cette année là une rame indéformable composée de 2 motrices identiques encadrant 3 remorques qui a été la première à porter l'appellation de "TGV". Il s'agissait du "TGV 001" à 4 turbines à gaz construit pour explorer les grandes vitesses (250-300 km/h) dans le cadre du projet dit "C.03" du Service de la Recherche de la SNCF.

La conception d'une rame à très grande vitesse, utilisant des turbines à gaz issues de l'aéronautique, avait été rendue possible suite aux très bons résultats obtenus par les rames ETG et RTG, construites en série pour la desserte de la ligne Paris-Caen et de la transversale Lyon-Bordeaux, ainsi que par l'élément expérimental TGS (qui était un élément ETG modifié et caréné pour des essais de vitesse).

Les 6 bogies du TGV 001 étaient tous équipés de 2 moteurs de traction, il s'agissait donc d'une rame à adhérence totale (dite aussi à motorisation répartie). C'était donc un "turbotrain" expérimental à transmission électrique de type triphasé-continu, d'une puissance totale de 4400 kW, prévu pour une vitesse maximale de 300 km/h (avec 4 turbines TURMO X fabriquées par TURBOMECA).

La description détaillée de sa chaîne de traction n'a pas d'intérêt particulier dans le cadre du présent document, consacré aux applications des semi-conducteurs de puissance en traction ferroviaire, mais ce matériel, dont les principaux constructeurs électriciens ont été les Sociétés ALSTHOM (alternateurs, moteurs de traction et blocs électriques) et JEUMONT-SCHNEIDER (blocs rhéostatiques de freinage et redresseurs à diodes) a un grand intérêt historique car il fut le précurseur qui a permis d'engranger des données indispensables à la maîtrise des circulations ferroviaires à très grandes vitesses, paramètres de stabilité et adhérence en particulier mais aussi transmissions de données "voie-machine" pour les nouveaux systèmes de signalisation embarquée (signalisation en cabine dite "cab-signal").

Chacune des 2 motrices était équipée de 2 turbomoteurs de 1100 kW, jumelés mécaniquement sur un réducteur commun qui entraînait un alternateur à

vitesse constante de 4000 tr./min. (ainsi qu'un alternateur auxiliaire monté sur le même arbre). La tension de sortie triphasée de l'alternateur était redressée par un pont de Graetz triphasé, à ventilation forcée, constitué de 6 bras de diodes (4 cellules à pastille de 32 mm en parallèles), les 24 cellules sont du type CDSW 984-ZZD (2400 V-500 A, en technologie pressée double face).

La *figure 143* représente la rame TGV 001 dont l'allure générale a été conservée pour les futures rames électriques qui ont vu le jour par la suite. Quant à la *figure 144*, elle montre l'installation des équipements dans l'une des 2 motrices.



Figure 143 Premier "TGV", la rame TGV 001 à turbines à gaz. Cette rame de 4400 kW, à 4 turbines à gaz, avait 12 moteurs de traction à courant continu, autoventilés, de 360 kW. Elle pouvait rouler à 300 km/h ; ses 8000 l de carburant lui donnaient 1100 km d'autonomie à grande vitesse.

(cliché extrait de la revue "La Vie du Rail" n°2870 du 6 novembre 2002 - illustration de l'article de présentation du "Grand livre du TGV" de C Soulié et J Tricoire, édité par cette revue)

Sur le diagramme de la *figure 144*, on notera la compacité du groupe électrogène de 2200 kW, à 2 turbomoteurs jumelés (repères 7, 8 et 11) et la modestie du redresseur triphasé à diodes (repère 5) mais le système d'admission d'air et ses annexes (repères 13, 14, 15 et 18) sont assez encombrants.

Le redresseur fournit 2850 A maxi sous 750 V aux 6 moteurs de traction couplés en parallèles. Il n'y a pas de dispositif de shuntage des inducteurs, le réglage de la tension appliquée aux moteurs se fait uniquement, tant en traction qu'en freinage rhéostatique (dans ce cas, seuls les inducteurs des moteurs de traction, couplés en série, sont donc alimentés), par le biais de l'excitation de l'alternateur alimentée par un redresseur auxiliaire triphasé (*pont mixte contrôlé*) branché, par l'intermédiaire d'un transformateur, sur le réseau auxiliaire. Ce réseau est lui-même alimenté par un

alternateur auxiliaire triphasé, défini pour 225 kW et délivrant du 380/220 V à 400 Hz à l'ensemble des circuits auxiliaires de chaque demi-rame (compresseur d'air, charge de la batterie 72 V, excitations des alternateurs, climatisation etc.); cet alternateur est monté sur l'arbre de l'alternateur principal.

Une batterie de 24 V assure le démarrage des turbines, elle est rechargée par l'un des démarreurs fonctionnant en dynamo.

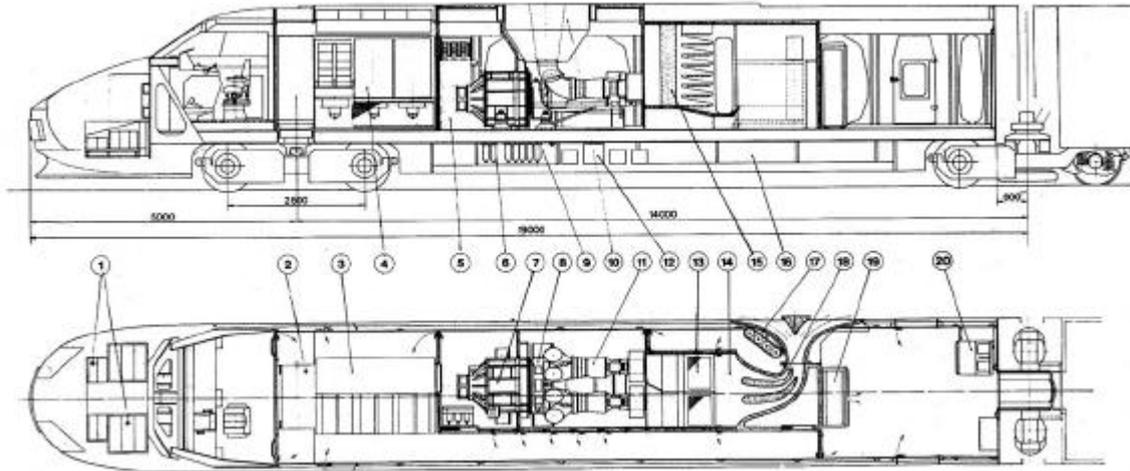


Figure 144 : représentation de l'installation d'une motrice du turbotrain expérimental TGV 001 de 1972

1 - accumulateurs, 2 - appareillage BT, 3 - appareillage HT, 4 - bloc de freinage rhéostatique, 5 - redresseurs, 6 - appareillage accessoire des turbomoteurs, 7 - alternateurs, 8 - réducteur, 9 - appareillage pneumatique, 10 - échappement, 11 - turbomoteurs, 12 - transformateurs, 13 - filtres d'air, 14 - caisson de ventilation, 15 - abat-sons, 16 - soute de combustible, 17 - extincteurs (fréon) 18 - diffuseur, 19 - appareillage électronique, 20 - équipement de sonorisation.

(Extrait d'un document de la Direction du Matériel de la SNCF - département constructions, traction thermique - mai 1972)

L'automotrice électrique expérimentale Z 7001

Suite à ce que l'on a appelé, dans les années 1970, la "crise de l'énergie", les applications de la turbine à gaz en traction ferroviaire à grande vitesse ont été revues sous l'angle des économies d'énergie, des coûts de maintenance mais aussi des nuisances sonores et atmosphériques. Il faut bien admettre que, malgré ses performances mécaniques élevées (très bonne puissance massique), le turbomoteur n'est pas excellent dans les domaines de la consommation d'énergie fossile et de l'environnement. La traction électrique s'impose alors tout naturellement, surtout si le nombre des circulations et leur rentabilité commerciale amortissent le coût élevé d'établissement des installations fixes.

D'autre part, la puissance installée nécessaire à des rames commerciales de plus grande capacité en voyageurs que la rame expérimentale (à la puissance de traction il faut ajouter la climatisation, qui est un poste important) aurait rendu l'option thermique très problématique.

Tout cela a fait qu'en 1974, la SNCF a envisagé le recours à la traction électrique pour les rames à grande vitesse qui devaient circuler sur une ligne nouvelle entre Paris et Lyon. Ce seront les rames dites "TGV-PSE".

Par ailleurs, suite aux résultats obtenus avec le TGV 001 et à d'autres travaux, la SNCF et les constructeurs souhaitaient expérimenter une nouvelle conception de transmission mécanique entre les essieux

et les moteurs de traction. Si le TGV 001 avait encore des moteurs de traction installés sur les bogies de façon somme toute classique, le comportement à grande vitesse pouvait s'améliorer (en ce qui concerne les efforts sur la voie en particulier) en réduisant les masses dites "non suspendues", ce qui serait obtenu en fixant les moteurs (équipés d'un réducteur) directement sous la caisse des motrices, à l'aplomb des bogies.

Les essieux devraient alors être entraînés au moyen d'une chaîne cinématique particulière permettant des déplacements relatifs caisse-bogie ; l'élément original en serait une transmission coulissante, à double cardan ; cette transmission, spécifique aux divers TGV qui verront le jour par la suite, est dite "tripode" (à l'image du dispositif d'élongation composé de 3 galets, disposés à 120°, coulissant dans un fourreau à 3 cannelures femelles) ; la transmission était accouplée à l'essieu par l'intermédiaire d'un pont moteur.

Pour expérimenter ces nouvelles dispositions, un autre banc d'essais roulant a donc suivi le turbotrain TGV 001 en 1974, il s'agissait de la Z 7001 qui était une automotrice électrique 1500 V= expérimentale à caisse unique, issue de la transformation de la Z 7115 par les ateliers SNCF d'OULLINS (la série des automotrices Z 7100 de 940 kW, pour caténaire 1500 V, est sortie entre 1960 et 1962, elles étaient composées d'une motrice à 2 moteurs et de 1 à 3 remorques; elles ont été utilisées en service régional dans la région de Lyon).

La *figure 145* représente cet engin expérimental qui, pour circuler à grande vitesse, avait reçu des carénages d'extrémités.



Figure 145 L'automotrice expérimentale Z 7001 en circulation d'essais à 300 km/h sur la ligne des Landes.

(Cliché M.T.E. extrait de la Revue J.S. n° 28 de mai 1979)

Sous la caisse de la Z 7001 ont été installés 4 moteurs de traction TAO 670, identiques à ceux du TGV 001, ainsi que 2 bogies moteurs Y226, construits par CREUSOT-LOIRE, utilisant des transmissions tripodes.

Les moteurs, bien que définis pour 380 kW (régime unihoraire) ont pu, après investigations en plateforme, être "poussés" à 512 kW avec une tension d'alimentation de 1000 V. La puissance de 2000 kW, nécessaire pour atteindre les 300 km/h (avec carénage des extrémités de caisse), était donc obtenue sans difficulté.

L'alimentation des moteurs de traction de la Z 7001 était assurée par un hacheur unique à 3 phases entrelacées. Pour réaliser ce hacheur, les ateliers SNCF ont réutilisé la moitié de l'équipement JEUMONT-SCHNEIDER du couplage expérimental CC 20002-BB 9252, de 1971, qui a été décrit dans le n° 32 de *La Revue 3EI* (pages 84 à 86) ; il serait donc inutile de le décrire à nouveau.

Afin d'expérimenter également un système complémentaire de freinage, indépendant de l'adhérence, chaque bogie a aussi reçu 2 patins de freinage linéaires à courants de Foucault alimentés par 2 des 4 moteurs de traction fonctionnant en génératrices (leur excitation était assurée par la batterie derrière un hacheur auxiliaire pour en assurer le réglage).

Ce dispositif de freinage a, par la suite, été écarté pour les TGV-PSE car les courants induits dans les rails conduisaient à des échauffements de ces derniers jugés trop importants en cas de circulations

commerciales rapprochées freinant toutes dans une même zone. Le captage à grande vitesse a, lui aussi, été expérimenté sur la Z 7001.

Les rames TGV -PSE (Paris Sud Est)

Au début de 1976, la SNCF a commandé 87 rames TGV pour la nouvelle desserte de Paris-Lyon sur ligne nouvelle à grande vitesse (LGV 1). Les 2 premières rames, dites de présérie, ont été livrées en 1978 ; elles ont permis les essais de validation et les inévitables mises au point préalablement à la sortie de l'ensemble du parc (la *figure 146* représente l'une de ces rames dont l'esthétique est très proche de celui du TGV 001 à turbines).

Le service prévu pour les TGV-PSE devant les faire circuler aussi bien sur la ligne nouvelle électrifiée en 25 kV 50 Hz (V_{max} initialement de 260, puis 270 km/h) que sous caténaire 1500 V= (V_{max} de 160 ou 200 km/h) pour la région parisienne ou les "au-delà" de Lyon, le schéma électrique doit être "bicourant". La pénétration en Suisse (Lausanne en premier lieu) nécessitera quelques rames "tricourant", fonctionnant également sous le 15 kV-16 2/3 Hz helvétique.

La puissance maximum nécessaire pour les circulations, sous tension monophasée, à 260 km/h est de 6300 kW, elle n'est plus que d'environ la moitié pour les circulations à 200 km/h sous 1500 V=.

Les rames TGV-PSE sont équipées de 12 moteurs de traction ALSTHOM TAB 676 C1 de 525 kW, à courant continu ou redressé et autoventilés.

En ce qui concerne la chaîne de traction, elle est relativement classique dans son principe puisque, comme nous allons le voir, elle fait appel à des schémas de base bien rôdés fonctionnellement.



Figure 146 L'une des rames TGV-PSE de présérie, sous caténaire monophasée, lors des essais dans la plaine d'Alsace.

(vue extraite d'un document SNCF - Département constructions, Direction du Matériel mai 1979)

Le dimensionnement et la configuration des équipements, moteurs de traction, sous-ensembles à semi-conducteurs, selfs, transformateurs, a été fait en tenant compte des contraintes imposées par le profil de la LGV Paris-Lyon (où l'on rencontre des rampes de 35 ‰), et de l'exploitation qui demande la moindre "amputation" des performances en cas d'avarie d'un élément de la chaîne de traction.

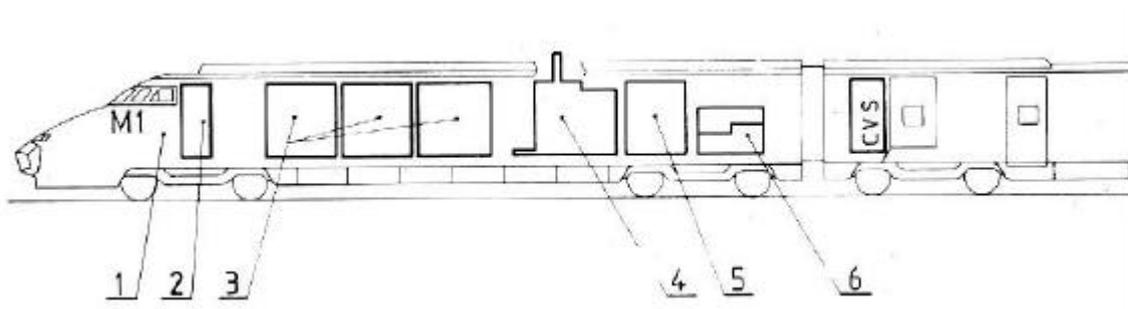


Figure 147 diagramme d'installation des équipements sur l'une des 2 motrices d'une rame TGV-PSE ; ces rames sont constituées de 2 motrices encadrant 8 remorques, leur longueur totale est de 200 m pour une masse de 64,5 tonnes.

- 1 - cabine de conduite, 2 - armoire électrique de cabine, 3 - blocs moteurs, 4 - transformateur principal et selfs, 5 - bloc commun, 6 - moto compresseur
- le convertisseur statique (CVS) est installé dans la remorque attenante à la motrice (au-dessus du 3ème bogie moteur.

(diagramme extrait d'un document SNCF - Département constructions Direction du Matériel mai 1979)

C'est ainsi qu'une rame TGV-PSE, arrêtée dans une rampe de 35 ‰, devra pouvoir redémarrer avec 1 équipement de bogie moteur hors service. Les 10 moteurs restant en fonctionnement devront alors supporter une surintensité au démarrage d'environ le double de celle du régime continu normal, pendant 7 minutes ; ils devront donc être surdimensionnés en conséquence. Cela implique également une certaine modularité des équipements qui fera qu'en cas d'avarie limitée à un élément, on puisse limiter au minimum la part qui ne sera plus opérationnelle.

Pour chacune des motrices du TGV-PSE, les équipements de traction sont segmentés en 3 blocs moteurs identiques installés côte à côte. Chacun des blocs alimente les 2 moteurs de traction d'un bogie ; 2 de ces bogies sont situés sous la motrice (qui est donc une "locomotive" BB) tandis que le 3ème bogie est placé sous la remorque contiguë (l'autre extrémité de la remorque reposant sur un bogie porteur qu'elle partage avec la remorque suivante ; c'est le "concept" de "rame articulée" qui a été introduit avec le TGV 001), il est alimenté par le 3ème bloc moteur par un câblage de puissance inter caisses.

En 25 kV 50 Hz, chacun des blocs moteurs est alimenté par un secondaire indépendant du transformateur principal qui possède, en outre, un enroulement secondaire unique est affecté à l'alimentation des circuits auxiliaires tels que moto-compresseur, chauffage et convertisseur continu / alternatif puissant, tous alimentés en tension redressée de 1800 V (qui est filtrée pour le convertisseur uniquement).

Pour les circulations à grande vitesse sous caténaire monophasée, le captage ne doit se faire qu'avec un seul pantographe levé, celui de la motrice arrière de préférence, pour des raisons de qualité de captage (comportement dynamique du couple archet de pantographe / caténaire). De ce fait, la motrice opposée sera alimentée par une ligne 25 kV de toiture, chacune des 2 motrices étant toutefois protégée par son propre

disjoncteur 25 kV au primaire de son transformateur principal.

Sous caténaire 1500 V continu, chaque motrice retrouve son indépendance d'alimentation, les 2 pantographes peuvent (et doivent, en situation normale) être levés. Un disjoncteur à ouverture rapide (du type HRKS) protège l'ensemble des circuits 1500 V, les circuits de chauffage d'une demi-rame et la moto-compresseur sont alimentés directement tandis que les équipements de traction et le convertisseur auxiliaire le sont au travers d'un filtre LC important.

Schémas simplifiés :

Les schémas simplifiés de ces équipements, extraits de la revue JEUMONT-SCHNEIDER n° 28 de mai 1979 et reproduits ci-après aux figures 148 a, b et c, montrent bien les diverses configurations pratiquées.

configuration en monophasé

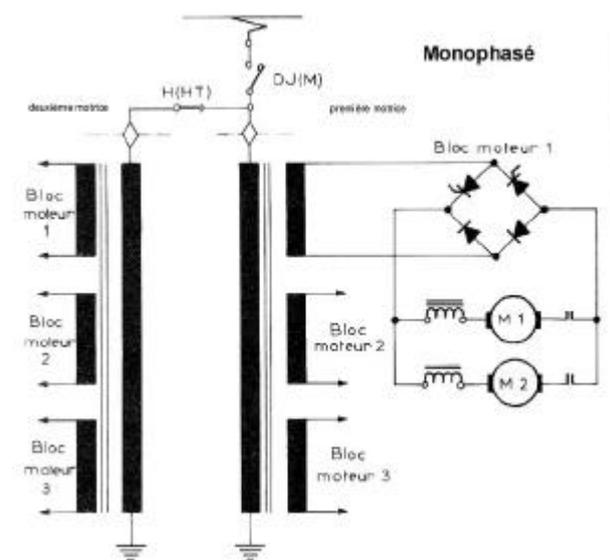


Figure 148 a schéma simplifié en configuration "monophasé" des motrices TGV-PSE.

Les 2 équipements sont alimentés par un seul pantographe et protégés par un disjoncteur monophasé commun.

On constate une différence importante dans le schéma "bicourant" du TGV-PSE et celui des BB 22200 pour lesquelles les hacheurs sont utilisés dans les 2 types d'alimentation, un redresseur commun servant de "sous-station" sous caténaire monophasée.

Pour les TGV-PSE, la recherche d'une séparation maximum entre les équipements des 3 bogies éliminait d'emblée la configuration à redresseur commun et unique. C'est ainsi que le schéma à 3 redresseurs indépendants a été choisi pour le fonctionnement sous 25 kV où la puissance demandée est maximum et où l'on a besoin de la dégradation en puissance minimum en cas d'avarie à un équipement (figure 148 a).

Configuration en continu

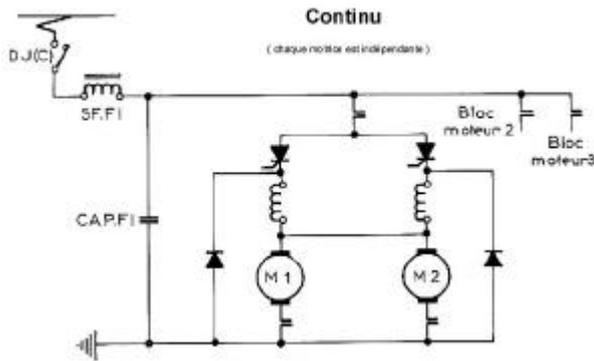


Figure 148 b schéma simplifié en configuration "continu"

Chaque motrice est alimentée par son propre pantographe, le disjoncteur DJ(C) et le filtre SF.FI - CAP.FI (4,1 mH et 4 mF) sont communs aux hacheurs des 3 blocs moteurs ; chaque hacheur a 2 phases et alimente 2 moteurs de traction connectés en parallèles.

Les équipements de traction en courant continu 1500 V sont dérivés de ceux construits par JEUMONT-SCHNEIDER pour les BB 7200 et 22200 et qui ont été décrits dans le n° 33 de *La Revue 3EI* (pages 68 à 73). La figure 148 b en montre un schéma très simplifié, l'équipement de chaque bloc moteur est constitué de 2 hacheurs élémentaires.

La commande de l'ensemble des hacheurs est assurée par une base de temps commune qui entrelace les 6 phases élémentaires selon les principes vus antérieurement.

Configuration en freinage

Pour le freinage électrique (voir le schéma simplifié à la figure 148 c), la sûreté de fonctionnement a imposé un freinage sur résistances (dit rhéostatique).

L'une des résistances est fixe tandis que l'autre est court-circuitée cycliquement (on dit aussi "modulée") par le hacheur principal de traction propre au bloc (en fonctionnement sous monophasé, la configuration "hacheur" a été rétablie lors du passage en freinage) ; cela permet donc la variation de la résistance apparente dans laquelle débite la machine qui fonctionne en génératrice à excitation séparée (les inducteurs des 2 moteurs sont toutefois connectés en série). La figure 149 explicite le mode de contrôle du freinage électrique en fonction de la vitesse du train. Les

résistances de freinage sont installées en caisson en partie haute de chaque bloc moteur ; leur ventilation énergique est assurée par 3 groupes moto-ventilateurs à courant continu, de 5 kW chacun, qui refroidissent aussi les tiroirs semi-conducteurs.

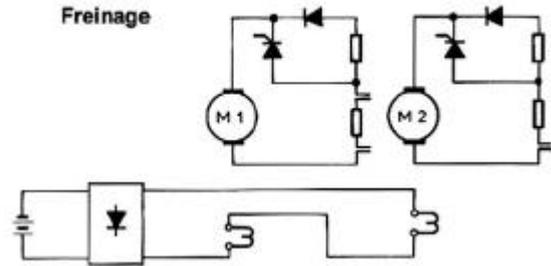


Figure 148 c schéma simplifié en configuration "freinage"

Il s'agit d'un freinage sur résistances, totalement indépendant de l'alimentation extérieure puisque l'excitation des 2 moteurs de traction d'un bogie est assurée par une batterie spécifique, un hacheur auxiliaire en permet le réglage (il est dérivé de celui construit par JEUMONT-SCHNEIDER pour l'alimentation des freins à courants de Foucault expérimentés sur la Z 7001).

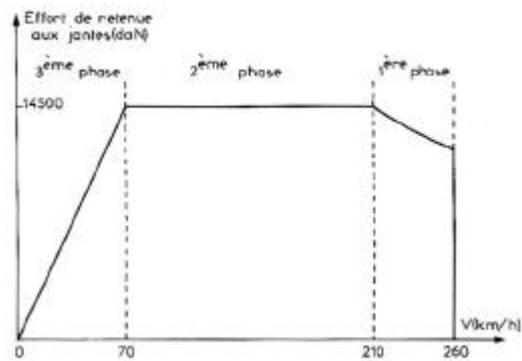


Figure 149 caractéristique effort/vitesse en freinage électrique

3 phases de fonctionnement s'établissent successivement :

- 1 - de 260 à 210 km/h, la résistance est à sa valeur maxi (hacheur bloqué) de 1,54 Ω , le courant dans l'induit est maintenu constant, à 650 A, en augmentant le courant d'excitation au fur et à mesure de la réduction de vitesse. La puissance est constante
- 2 - de 210 à 70 km/h, l'excitation est constante, à 550 A et le maintien du courant moteur est assuré par réduction de la résistance au moyen du hacheur principal ("modulation")
- 3 - de 70 km/h à l'arrêt, le rhéostat est à sa valeur minimale (hacheur en conduction maxi) et l'excitation constante à son maximum ; l'effort de freinage est proportionnel à la vitesse

Dans tous les cas l'électronique de commande du freinage assure la "conjugaison" des freinages électrique et pneumatique, sur les remorques ce dernier est, bien évidemment, le seul utilisé ; l'action sur le freinage pneumatique est obtenue par une électrovalve dite "modérable".

La transformation "redresseurs" / "hacheurs" :

Afin que ce choix de schémas spécifiques au monophasé et au continu ne conduise pas à une disposition trop lourde et coûteuse, telle la juxtaposition d'éléments à semi-conducteurs dédiés aux redresseurs et aux hacheurs, l'étude a abouti à une disposition originale et très "astucieuse" basée sur

l'emploi d'un commutateur électromécanique qui permet l'utilisation des mêmes bras de semi-conducteurs aussi bien en schéma redresseur (pont mixte) que hacheur.

La figure 150 représente le principe de la transformation des schémas.

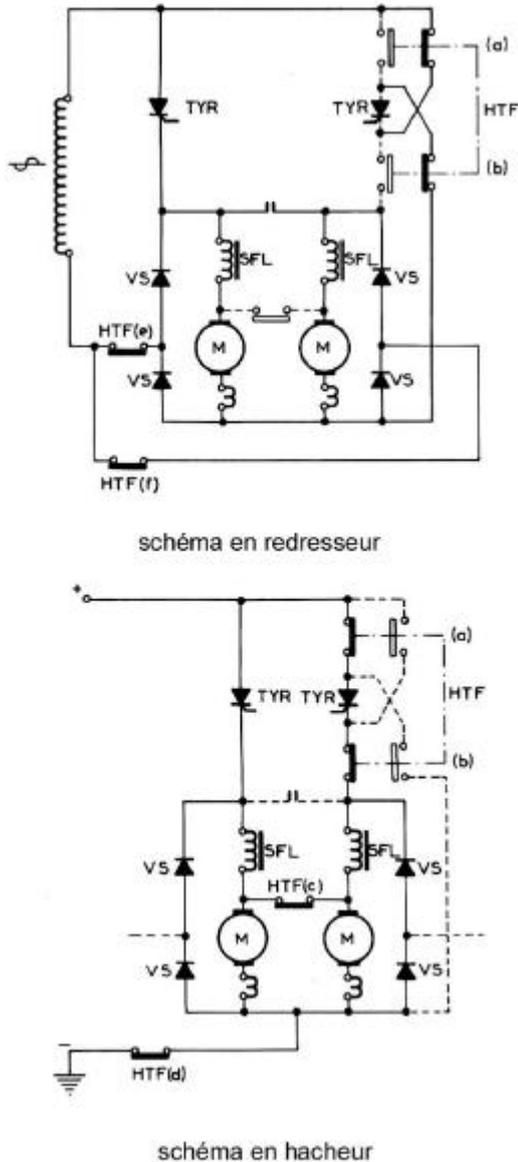


Figure 150 principe de la transformation des schémas redresseur / hacheur des TGV-PSE.

Elle est assurée par le jeu d'un seul commutateur électromécanique HTF à 2 positions et à 6 contacts (a à f) qui assure les transformations des configurations "monophasé", "continu" et "freinage" (la configuration "freinage" n'est pas représentée sur cette figure). En configuration "hacheur", les thyristors repérés TYR sont les thyristors principaux (les thyristors d'inversion et d'extinction, non utilisés dans la configuration "hacheur" car ils ne sont pas amorcés, ne sont pas représentés). Toujours en "hacheur", on notera que les moteurs de traction sont connectés en // en aval de leurs selfs de lissage SFL (de 7 mH chacune) par HTF(c). Le commutateur HTF fonctionne dans l'huile, il n'est manœuvrable que hors tension, lors des changements de configuration.

(schémas extraits de la revue J.S. n° 28 de mai 1979)

Particularité du schéma en monophasé :

Le schéma, selon la configuration "monophasée", de la figure 151 (qui est un peu plus détaillé que celui de la figure 150), montre une petite particularité en ce concerne la répartition des courants dans les diodes VS (DC).

Selon la disposition réalisée, il y a toujours 6 diodes en parallèle, aussi bien dans les séquences où elles fonctionnent en série avec les thyristors qu'en "roue libre", lorsque les thyristors sont bloqués ; cela n'aurait pas été le cas si l'on avait utilisé directement chacun des bras VS (DC) lesquels n'ont que 3 diodes en parallèle.

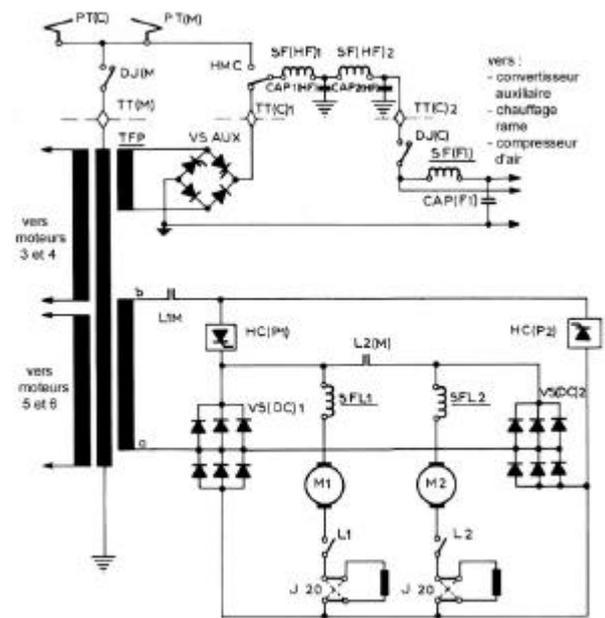


Figure 151 schéma plus détaillé d'une motrice en configuration "monophasée" (schéma de principe de l'un des 3 blocs moteurs et de l'alimentation des auxiliaires d'une demi-rame). L'autre motrice est alimentée en // derrière le DJ (M). Les thyristors sont repérés HC(P1) et HC(P2) car ce sont les bras des thyristors principaux des 2 hacheurs en configuration "continu" ; le bras HC(P2) est inversé par le commutateur HTF (comme le montre la figure 150).

Lors de la 1ère alternance, le courant revient au transformateur par les 3 diodes VS (DC)1 inférieures, mises en // avec les 3 diodes VS (DC) également 2 inférieures ; ce seront les diodes supérieures de ces bras qui se trouveront en // à l'alternance suivante.

Le fonctionnement en "roue libre" se fera par les 2 bras complets VS (DC) en //.

(schéma extrait de la revue J.S. n° 28 de mai 1979)

On remarquera aussi que les moteurs de traction, M1 et M2, ont chacun leur self de lissage (SFL1 et 2) ; ils sont mis en parallèle à la sortie du pont par la fermeture du contacteur L2(M) et n'ont pas de dispositif de réduction du champ, ils fonctionnent en réglage de tension sur toute leur plage de fonctionnement tant derrière les redresseurs contrôlés que les hacheurs abaisseurs.

Un enroulement secondaire particulier alimente, via un pont redresseur semi-contrôlé VS AUX, le filtre principal d'entrée des hacheurs qui, en monophasé

(comme en 1500 V= d'ailleurs) constitue le filtre d'entrée du convertisseur auxiliaire. L'alimentation des circuits de chauffage de la demi-rame, ainsi que du compresseur d'air de la motrice, est prise en amont du filtre. Un filtre dit "HF", constitué de 2 cellules SF(HF) et CAP(HF) en cascade, est intercalé entre le redresseur et le filtre principal ; en 1500 V=, il est connecté directement au pantographe par le commutateur HMC. Ce filtre est destiné à réduire l'influence des hacheurs de traction et du convertisseur auxiliaire dans le domaine des radiofréquences.

Fonctionnement des hacheurs principaux :

On retrouve les éléments du schéma des sous-ensembles hacheurs des BB 7200 et 22200, leur schéma détaillé ainsi que leur fonctionnement de base ne seront donc pas décrits à nouveau.

En 1500 V =, comme il a été évoqué précédemment, chacune des 2 motrices est alimentée par son propre pantographe ; elles fonctionnent indépendamment l'une de l'autre. Au niveau d'une motrice, nous avons vu aussi que le hacheur de chacun des 3 blocs moteurs est constitué de 2 hacheurs élémentaires ; leur fréquence de découpage est de 300 Hz et une synchronisation entre les commandes des 6 phases assure leur "entrelacement" ; ceci afin d'augmenter l'efficacité du filtre d'entrée et donc de réduire les appels de courant à la caténaire et l'influence des courants perturbateurs vis à vis des circuits de signalisation (ce filtre est commun aux 3 blocs et voit ainsi des ponctions de courant à 1800 Hz).

Selon le mode de conduite et les performances de traction à obtenir, divers asservissements garantissent un bon fonctionnement des hacheurs (contrôle permanent du pouvoir de commutation, qui est tributaire de la tension ligne mais aussi des conditions de captage à la caténaire, avec extinction anticipée et inhibition fugitive des hacheurs si nécessaire) et une limitation de la puissance absorbée à la caténaire si la tension de celle-ci descend au-dessous des 1500 V nominaux.

C'est ainsi que :

- le courant des moteurs au démarrage est limité à 1000 A
- leur tension d'induit maximale est fixée à 1070 V
- le courant absorbé à la caténaire est limité à 1700 A par motrice (dont 200 A pour l'alimentation des auxiliaires, ce qui permet 500 A par bloc) ; cette limitation est asservie à la tension de la caténaire

Le convertisseur auxiliaire des rames TGV-PSE

Les "auxiliaires" d'une rame TGV se répartissent sur les 2 motrices (donc comparables à ceux des divers matériels moteurs que nous avons rencontrés jusqu'à présent) et sur les 8 remorques occupées par les voyageurs, il s'agit des équipements nécessaires à la climatisation, les compresseurs de réfrigération en particulier (à la climatisation des salles "voyageurs, on ajoutera aussi celle des cabines de conduite), à la restauration (bouilloires, fours, meubles réfrigérés,

etc...) et divers organes de puissance modeste, tels des réchauffeurs d'eau sanitaire, sèche-mains, petits radiateurs d'appoint, installés dans les WC et sur les plate formes, ainsi que divers ventilateurs de puissance variées nécessaires aux installations de chauffage et de climatisation (extraction d'air, condenseurs, etc ...).

C'est ainsi qu'un bilan des "utilisateurs" de l'énergie fournie par le (ou les) convertisseurs auxiliaires d'une rame TGV-PSE aboutit à un total de l'ordre de 440 kVA installés ; c'est dire que, tous les équipements ne fonctionnant pas simultanément, la puissance moyenne consommée sera plus faible mais la puissance de pointe nécessaire sera tout de même de cet ordre.

On voit donc toute l'importance qu'a, sur une rame TGV, l'équipement devant fournir l'énergie d'alimentation des auxiliaires. Par ailleurs, la très grande majorité des organes embarqués sur les remorques devaient être, pour une question de coût de développement et de fabrication, dérivés d'équipements industriels ou domestiques, donc alimentés en courant alternatif monophasé ou triphasé (réseau 220/380 Veff - 50 Hz, avec neutre sorti). On notera, cependant, que les organes nécessaires au chauffage principal sont, comme sur les matériels à voyageurs classiques, alimentés directement sous 1500 V, continu ou redressé et ne sont donc pas intégrés au "bilan" ci-dessus.

La SNCF et les constructeurs se sont donc orientés vers la conception d'un convertisseur statique, continu / alternatif triphasé, alimenté en 1500 V, continu ou redressé, par les motrices et dont les caractéristiques de la tension de sortie se rapprochent le plus possible de celles du réseau industriel et domestique ; les divers équipements nécessairement alimentés en courant continu tels les moto-ventilateurs des blocs moteurs (en freinage ils doivent pouvoir être alimentés par un élément du rhéostat) le seront, en service normal, derrière un pont redresseur semi-contrôlé triphasé, de même pour les chargeurs de batteries, lesquelles alimentent directement les petits moto-ventilateurs nécessaires à une circulation d'air minimum dans les salles en cas d'absence de tension.

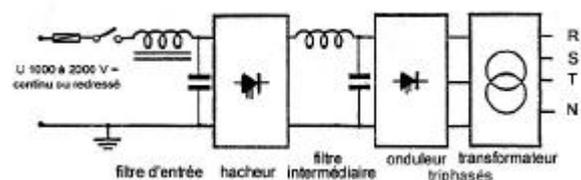


Figure 152 schéma de principe général du convertisseur statique auxiliaire (dit "CVS") des rames TGV-PSE.

Il s'agit d'un convertisseur statique continu / alternatif triphasé 220 / 380 V - 50 Hz de 440 KVA.

(schéma extrait d'une notice SNCF d'origine T.C.O.)

La figure 152 montre le schéma de principe général de ce convertisseur.

Si, jusqu'alors, on n'avait pas éprouvé le besoin d'un convertisseur auxiliaire d'une telle puissance, les

voitures "Corail" de la SNCF étaient déjà équipées de convertisseurs de fabrication TCO ou JEUMONT-SCHNEIDER, ayant à peu près les mêmes fonctions car alimentant des équipements de climatisation et autres, assez comparables, mais leur puissance se limite à 30 ou 35 KVA ; le convertisseur T.C.O. de 30 KVA, qui équipe une partie de ces voitures, servira néanmoins de base de départ à l'étude du CVS des TGV-PSE.

Architecture du réseau d'alimentation des auxiliaires

Pour des raisons évidentes de fiabilité et de disponibilité, l'existence d'un seul convertisseur de 440 KVA à bord d'une rame ne pouvait s'envisager. Il a donc été nécessaire d'installer, ce qui était logique, un convertisseur sur chaque motrice (ou plutôt sur la remorque contiguë à chaque motrice, au-dessus du 3ème bogie moteur).

En situation normale, chacun des CVS alimente sa propre ligne triphasée (avec neutre) qui parcourt toute la rame, de motrice à motrice, les organes alimentés par cette ligne sont, à peu près, ceux d'une remorque sur 2 ; le convertisseur ne débite, au maximum, que la moitié de sa puissance nominale.

Dans le cas où l'un des CVS est avarié, ou si la motrice qui l'alimente est, cas très exceptionnel, mise hors service (avarie de ligne HT en toiture, de disjoncteur continu ou du filtre d'entrée principal, par exemple) sa ligne spécifique est "commutée" (selon une séquence particulière, commandée par le conducteur) sur le deuxième CVS qui reprend alors à son compte la totalité des auxiliaires de la rame ; la puissance nominale de 440 KVA est donc susceptible d'être utilisée car aucun délestage n'est effectué.

Description du convertisseur auxiliaire de 440 KVA :

Le hacheur régulateur d'entrée

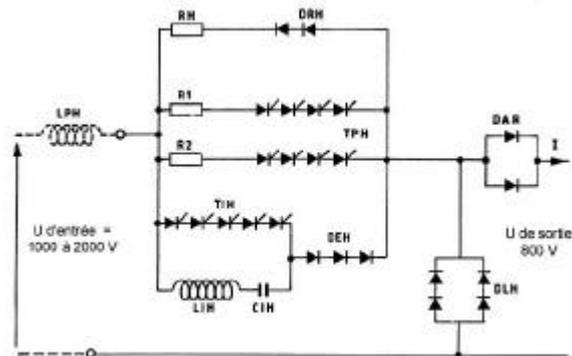


Figure 153 schéma de principe du hacheur d'entrée du CVS

La self d'entrée (représentée en pointillés) est une self à air de limitation en di/dt du courant dans les thyristors principaux TPH, elle est extérieure au CVS et constituée d'un simple enroulement de câble. Le hacheur, à son régime nominal peut absorber 270 A sur le filtre d'entrée (pour 650 A crête, par phase, en sortie triphasée, débit maximal).

(schéma extrait d'une notice SNCF d'origine T.C.O.)

Ce hacheur, représenté à la figure 153 ci-dessus, a pour rôle d'abaisser la tension d'entrée filtrée jusqu'à la valeur régulée de 800 V nécessaire à l'entrée de

l'onduleur qui, n'étant qu'un organe de commutation par tout ou rien, n'a aucune possibilité de faire varier l'amplitude de sa tension de sortie.

La tension d'entrée peut varier entre 1000 et 2000 V, sans pénaliser les caractéristiques de sortie du CVS ; elle peut descendre jusque 600 V mais, dans ce régime dégradé, l'amplitude de la tension de sortie et la fréquence (comme il le sera vu ultérieurement) s'en trouveront obligatoirement réduites.

Le fonctionnement du hacheur, représenté à la figure 153, est désormais classique ; la fréquence de découpage est de 300 Hz.

On retrouve les thyristors principaux TPH et une file de thyristors auxiliaires TIH dont l'amorçage provoque l'inversion de la charge du condensateur de commutation CIH puis, lors de la nouvelle inversion naturelle de cette charge provoquée par l'action de LIH, l'extinction des thyristors principaux. La suite de la décharge de CIH s'écoule par les diodes DRH qui, avec la résistance RH (de 35 mΩ), polarisent les thyristors TPH en inverse pour favoriser leur blocage.

La charge initiale du condensateur CIH (ou sa recharge aux cycles suivants) est assurée, en absence de toute conduction de thyristors, par la source via les diodes DEH et la charge constituée par le filtre d'intermédiaire et l'onduleur ; les divers selfs en série avec CIH provoqueront une surcharge de CIH dont la tension sera supérieure à la tension d'entrée. Les diodes DEH se bloqueront lorsque la surcharge de CIH sera terminée. Au moment où la tension de CIH sera égale à la tension d'entrée, les diodes de "roue libre" DLH se débloquent car elles seront polarisées dans le sens passant, elles assurent ainsi la continuité du courant dans la charge (la self du filtre intermédiaire et les courants appelés par les charges, entretiennent cette conduction des diodes DLH) ; Les diodes DLH se bloquent à l'amorçage des thyristors principaux au cycle suivant.

Les diodes DAR sont dites "anti-retour" car elles constituent un découplage entre le filtre d'entrée du hacheur et le filtre intermédiaire placé entre lui et l'onduleur ; elles empêchent tout échange d'énergie intempestif entre les deux filtres qui serait source d'instabilité.

Le filtre intermédiaire et l'onduleur

Le filtre intermédiaire, non représenté, est constitué d'une self à fer de 4mH (dimensionnée pour 600 A eff, pendant 1 heure) et d'une batterie de condensateurs de 8 mF ; sa fréquence propre de 28,5 Hz, très éloignée des 300 Hz de fonctionnement du hacheur, lui assure une bonne efficacité. Ce filtre absorbe aussi les composantes à 50 Hz (ou d'autres harmoniques) générées par l'onduleur qu'il alimente.

Pour aborder le fonctionnement de l'onduleur (voir le schéma de la phase A à la figure 154 suivante), on suppose que les thyristors TO1 sont initialement conducteurs, la sortie A est au + 800 V. Le courant de charge circule du + 800 V vers le l'un des primaires du transformateur de sortie (non représenté), via

l'enroulement (1) du transformateur de commutation TF1, et la sortie de phase A, il revient au $- 800$ V par l'une des 2 autres phases. Le condensateur CAPO11 n'est donc pas chargé tandis que son homologue CAPO12 l'est à la tension de 800 V, selon les polarités du schéma, puisque les thyristors TO4 sont alors bloqués.

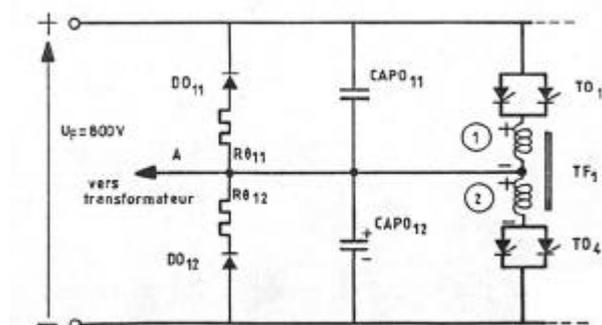


Figure 154 schéma de l'une des 3 phases de l'onduleur

L'autotransformateur TF1 est de rapport 1, c'est, en fait, une self à point milieu avec circuit magnétique à faible pertes. Le rôle de cette phase est uniquement de "commuter" alternativement, toutes les 10 ms, la borne de sortie A du $+ 800$ V au $- 800$ V de la tension délivrée par le hacheur.

(schéma extrait d'une notice SNCF d'origine T.C.O.)

10 ms après que les thyristors TO1 aient été amorcés, on amorce leurs homologues TO4, ceci met en relation directe le condensateur CAPO12 et l'enroulement (2) du transformateur TF1, la sortie de phase A est au $- 800$ V ; par induction dans l'enroulement (1) de TF1, une tension de 800 V est appliquée brusquement en inverse aux bornes des thyristors TO1 (CAPO11, n'étant pas chargée, se comporte comme un court-circuit vis à vis de cette rapide montée de tension) ; les thyristors TO1 se bloquent donc et le condensateur CAPO11 se charge sous 800 V tandis que la décharge de CAPO12 se termine via l'enroulement (2) de TF1.

Le dispositif est alors revenu à la situation complémentaire de la précédente ; il est prêt pour une nouvelle commutation par amorçage des thyristors TO1 (10 ms après que les thyristors TO4 aient été amorcés).

Cet onduleur doit, bien sûr, être capable de débiter dans des charges selfiques puisque bon nombre des organes alimentés sont des moteurs (asynchrones triphasés ou monophasés à phase capacitive) ; les phases de l'onduleur doivent, par conséquent, permettre la circulation momentanée de courants inverses à ceux circulant par les thyristors (ce sont les courants dit "réactifs"). Les diodes DO11 et DO12 permettront le débit de courants déphasés par rapport à la tension imposée par l'état respectif de conduction des thyristors TO1 ou TO4 ; une partie des courants circulant dans les diodes DO11 et DO12 sont aussi ceux de démagnétisation des enroulements de TF1 (dont la self propre est de 55 mH) au travers des résistances RO11 et RO12 appelées résistances d'amortissement (chacune de $7,7$ m Ω et pouvant dissiper $1,5$ kW).

Principe d'obtention d'une tension alternative triphasée

L'onduleur complet du CVS est constitué de 3 phases identiques à celle décrite ci-dessus (phase A), les 3 sont connectées en parallèle sur la sortie du filtre intermédiaire (dont la tension de 800 V est régulée par le hacheur d'entrée, comme vu précédemment).

Le schéma très simplifié de la figure 155 représente l'ensemble de l'onduleur et le transformateur de sortie à couplage [triangle / étoile], avec neutre.

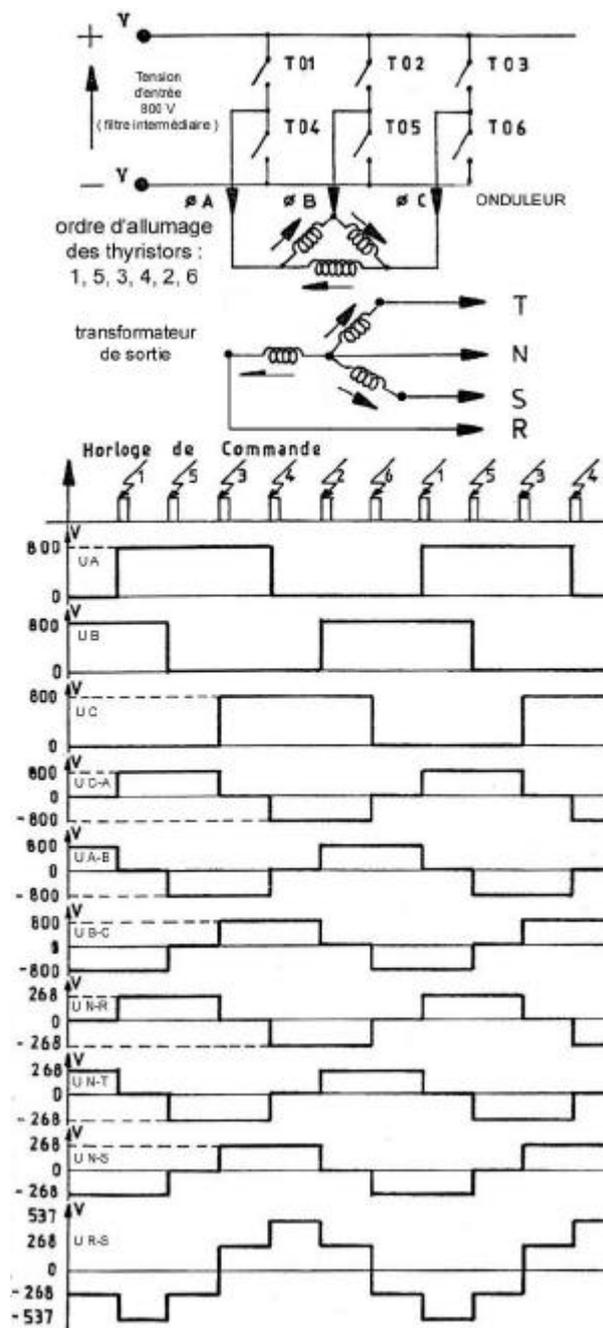


Figure 155 principe d'obtention de la tension alternative triphasée aux secondaires du transformateur de sortie du CVS

La combinaison des tensions, représentées par les divers chronogrammes, aboutit à l'obtention des tensions $220 / 380$ V qui apparaissent entre les sorties R,S,T et le neutre N.

(adaptation d'un extrait d'une notice SNCF d'origine T.C.O.)

Sur le schéma de la *figure 155*, seuls apparaissent les thyristors "interrupteurs" TO1 à TO6. Leurs ordres d'amorçage, symbolisés sur le chronogramme supérieur, sont espacés de 3,3 ms (pour la fréquence nominale de 50 Hz) et se succèdent selon un ordre immuable (1, 5, 3, 4, 2, 6) afin d'obtenir les différentes tensions représentées par les divers chronogrammes.

On voit ici le rôle fondamental du transformateur de sortie qui assure, bien sûr, l'obligatoire isolement galvanique entre les circuits HT de la motrice et le réseau d'alimentation des auxiliaires, mais surtout, grâce au couplage [triangle/étoile] de ses enroulements, (de rapport abaisseur) la transformation de forme et d'amplitude des tensions obtenues entre les phases A, B et C de sortie de l'onduleur, en tensions de caractéristiques voisines de celles du réseau 220/380 Veff - 50 Hz, de type "industriel", seules acceptées par l'ensemble des auxiliaires de la rame.



Figure 156 a vue du bloc convertisseur auxiliaire de 440 KVA des rames TGV-PSE, construit en collaboration entre les sociétés T.C.O. et JEUMONT-SCHNEIDER.

Cet équipement, assez imposant, est installé au-dessus du 3ème bogie moteur, dans la remorque contiguë à la motrice, il a une masse de 2950 kg et ses dimensions de base sont de 1,5 x 1m, sa hauteur est de 2 m (sans le groupe de ventilation monté en partie haute).

Les tensions de sortie ne sont pas, bien entendu, de forme sinusoïdale pure. Une décomposition en série de Fourier de la tension U_{RS} entre 2 phases au secondaire (UC étant la valeur de la tension crête) donne l'expression :

$$U_{RS} = UC (\cos \omega t - 1/5 \cos 5 \omega t - 1/7 \cos 7 \omega t - 1/11 \cos 11 \omega t \dots)$$

Les rangs des composantes harmoniques sont donc de la forme $3n \pm 1$ (avec n entier pair). Cette "richesse" relative en composantes harmoniques a pour effet d'augmenter les pertes "fer" dans les circuits magnétiques des organes auxiliaires alimentés qui en

possèdent (moteurs et transformateurs mais aussi bobines de contacteurs); ceux-ci sont donc surdimensionnés par rapport à leur version industrielle d'origine.

Comme déjà évoqué plus haut, tant que la tension d'alimentation est supérieure à 1000 V, l'onduleur délivre des tensions de sortie normales et fonctionne à la fréquence fixe de 50 Hz ; en deçà de cette valeur, le hacheur étant en butée de conduction maximale ne peut plus stabiliser la tension de 800 V et l'amplitude des tensions de sortie sera réduite en proportion. Cependant, et afin de conserver le couple des divers moteurs asynchrones alimentés, sans risque de surintensité ni de décrochage, le rapport tension / fréquence (dit U/F) des tensions délivrées par l'onduleur devra être conservé. Pour ce mode de fonctionnement, dit "dégradé", la fréquence de l'horloge de commande de l'onduleur est alors asservie à la tension du filtre intermédiaire ; la fréquence des tensions de sortie peut ainsi descendre jusqu'à 30 Hz si nécessaire.

Les photographies des *figures 156 a et b*, montrent ce convertisseur puissant, il se présente sous la forme d'un bloc compact, aisément interchangeable en atelier, avec ses tiroirs électroniques de commande incorporés et facilement accessibles pour faciliter les contrôles et interventions sans ouverture des panneaux.

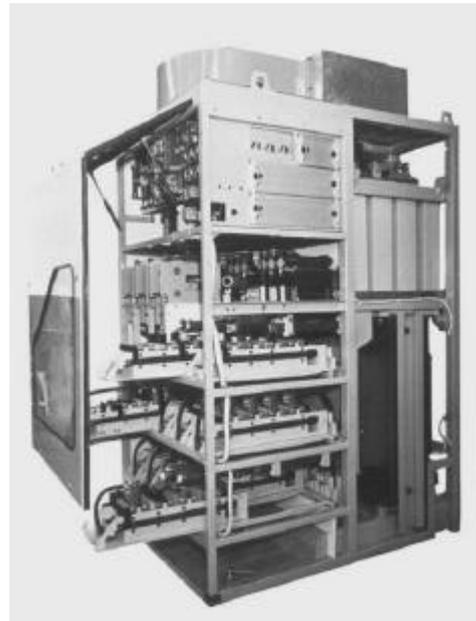


Figure 156 b le convertisseur avec ses panneaux ouverts.

On remarquera les tiroirs semi-conducteurs, dont certains ont été débrosés et, en bas à droite et vu de côté, le transformateur de sortie au-dessus duquel sont placés les condensateurs du filtre intermédiaire.

(photographies d'origine SNCF - Direction du Matériel)

Bibliographie :

- Documents internes SNCF - Direction du Matériel
- Extrait de la Revue Générale des Chemins de Fer (fév.1975)
- Revue JEUMONT-SCHNEIDER n° 28 de mai 1978
- Documents d'origine T.C.O. (Traction CEM OERLIKON)



La Revue 3EI -Cercle 13.01 de la SEE- rappelle que tous les numéros de ses collections sont disponibles

Commande à envoyer, accompagnée du règlement à :
SEE-La Revue 3EI
17 rue Hamelin 75783 Paris Cedex 16

(les prix sont indiqués TTC, frais d'envoi compris)

N°	TITRE
1994-95	1 La machine asynchrone (photocopie)
	2 Association machine asynchrone et convertisseur statique
	3 La machine synchrone (photocopie)
1995-96	4 Influence des convertisseurs statiques sur les réseaux
	5 L'électrothermie
	6 Première approche sur les réseaux
1996-97	7 La machine à courant continu
	8 La conversion d'énergie
	9 Les composants inductifs et capacitifs en électronique de puissance
	10 Pratiques pédagogiques et réalités industrielles
1997-98	11 Le transformateur
	12 Les capteurs
	13 Le génie électrique dans l'armement
	14 Pratiques pédagogiques et réalités industrielles
1998-99	15 Les aimants et électroaimants
	16 L'automatique en électrotechnique
	17 L'appareillage basse tension
	18 Pratiques pédagogiques et réalités industrielles
1999-00	19 La traction électrique ferroviaire
	20 Energies renouvelables
	21 Moteurs électriques pour applications de grandes séries
	22 Pratiques pédagogiques et réalités industrielles
2000-2001	23 Les automatismes industriels
	24 L'éclairage
	25 L'état de l'art en électronique de puissance
	26 Pratiques pédagogiques et réalités industrielles

**TARIF PUBLIC
au 1^{er} décembre 2002**

C E E				HORS C E E			
1 vol	2 vol	3 vol	4 vol	1 vol	2 vol	3 vol	4 vol
11 €	22 €	27 €	36 €	13 €	26 €	32 €	43 €

Collection 2001-02 (ces numéros ne peuvent être vendus séparément)

27	Métrologie : mesures et estimations
28	Convertisseurs propres
29	Les alimentations et convertisseurs embarqués
30	Pratiques pédagogiques et réalités industrielles

C E E	HORS C E E
36 €	43 €

La série complète de 30 numéros est en vente au tarif de 270 € avec copie du numéro « 0 »

Recueils des Journées 3EI

3EI'95 – Moteurs synchrones et leurs applications industrielles
3EI'97 – Convertisseurs statiques
3EI'99 – Contrôle et commande des systèmes électrotechniques

30 € pour la France (35 € pour l'étranger)
30 € pour la France (35 € pour l'étranger)
30 € pour la France (35 € pour l'étranger)

mise à jour 23/09/2002



**Bulletin d'inscription au CETSIS-EEA
Toulouse, les 13 et 14 novembre 2003**



Merci de remplir un exemplaire de ce bulletin par inscrit.

Civilité : M / Mme / Mlle **Nom :** _____ **Prénom :** _____

Si vous n'êtes pas accompagnant uniquement :

Fonction / grade : _____ **Établissement :** _____

Compléter ce qui suit dans tous les cas :

Adresse : _____

Téléphone : _____ **Fax :** _____ **Courriel :** _____

Participerez-vous à la soirée de gala ? : **Oui** **Non**

Êtes-vous auteur de communication(s) au CETSIS 2003 ? : **Non** **Une** **Plusieurs**, nombre : _____

L'inscription comprend les repas du midi, la participation à la soirée de gala et les actes du colloque. Elle est majorée après le 13 octobre à 250 €.

Il est aussi possible de s'inscrire :

♦ au **tarif réduit** en tant qu'**enseignant du secondaire** ou **étudiant**. Il est indispensable de fournir des justificatifs pour bénéficier de cette offre. Dans le tarif réduit la soirée de gala n'est pas comprise.

♦ en tant qu'**accompagnant**, il est possible de s'inscrire à la soirée de gala, et aux repas du midi de son choix.

Attention, les accompagnants n'ont pas accès au colloque.

Je m'inscris au tarif (cochez la case correspondante) :

Normal **Tarif réduit** (*joindre justificatifs*) **Accompagnant** (*pas d'accès au colloque*)

Dénomination	Tarif normal	Tarif Réduit	Accompagnant	Tarif	Montant
Inscription avant le 13 octobre 2003				195 €	
Inscription au tarif normal après le 13 octobre				250€	
Inscription au tarif réduit (joindre les justificatifs)				75 €	
Exemplaire supplémentaire des actes du colloque	au choix	au choix	au choix	25 €	
Participation à la soirée de gala	inclus	non inclus	au choix	45 €	
Repas du 13 novembre midi	inclus	inclus	au choix	25 €	
Repas du 14 novembre midi	inclus	inclus	au choix	25 €	
Total					

Le bulletin d'inscription ne sera pris en compte que s'il est accompagné d'un chèque ou d'un bon de commande

Libellez les chèques ou bons de commande à l'ordre de «l'agent comptable de l'Université Paul Sabatier de Toulouse»

Pour les bons de commande, le numéro SIRET est : 1 93 113 842 0001 01

À retourner avant le 13 octobre 2003 accompagné du règlement à

CETSIS - Mission Formation Continue et Apprentissage

Université Paul Sabatier

118, route de Narbonne

31062 Toulouse Cedex 04



**Colloque CETSIS-EEA Toulouse
13 et 14 novembre 2003**

Voyages 31

Transport

Aérien (environ 50% de réduction Air France) SNCF (environ 20% de réduction)

Nom du passager : _____

Jour de départ : _____ Jour de retour : _____

Choix horaire départ : _____ Choix horaire retour : _____

Réservation Hôtellerie

Prix par chambre et par nuit, petit déjeuner inclus, transfert bus du matin et soir.

HOTELS	Prix single/jour avec petit déjeuner	Prix double/jour avec petit déjeuner
Hôtel 3* de chaîne Centre ville	121 €	136 €
Hôtel 3* de chaîne Centre ville	90 €	104 €
Hôtel 3* Centre ville	80 €	93 €
Hôtel 2* de chaîne Centre ville	71 €	86 €
Hôtel 2* Centre ville	60 €	73 €
Hôtel 2* Centre ville	55 €	65 €

Sans navette

Hôtel 3* de chaîne sur site	114,50 €	129 €
-----------------------------	----------	-------

Réservations à retourner **avant le 30 septembre 2003** à :

Michèle Nahum Tél. : 05 62 72 97 34 ou 05 62 72 97 39
17, avenue des États Unis Fax : 05 62 72 97 30
31200 Toulouse Courriel : michele.nahum@voyages31.com

Nom : _____ Prénom : _____

Adresse : _____

Tél. : _____ Fax : _____

Hébergement : 12 novembre 13 novembre Chambre : 1 personne 2 personnes

Arrivée : _____ Départ : _____ soit _____ nuits

Nombre de nuits : _____ x Prix Chambre : _____ = _____ €

10€ de frais de dossier par chambre = total de _____ €

Chèques à libeller à l'ordre de «Voyages 31» ou prélèvement Carte Bleue

N° : _____ Validité jusqu'au : _____ Signature : _____

Une facture vous sera adressée ainsi qu'un bon d'échange hôtel à réception de votre réservation.

Condition d'annulation hôtelière :

- 1- Pour toute annulation de réservation de J-30 à J-15, Voyages 31 s'engage à rembourser la totalité **moins 16€ de frais.**
- 2- Pour toute annulation de réservation de J-14 à J-1, **la première nuit sera due.**
- 3- Pour toute annulation de réservation le jour de l'arrivée, **pas de remboursement possible.**



CETSIS - EEA 2003

Thèmes

Le colloque consiste en la présentation d'expériences pédagogiques et de démonstrations innovantes ou originales dans leur contenu ou leur forme. Il permet aussi de présenter des formations proposées dans différents pays.

Les papiers invités, les communications et les conférences-débats de ce quatrième CETSIS-EEA mettront plus particulièrement l'accent sur :

- **Nouvelles Approches, Nouveaux Outils :**
T.P., T.E.R., projets innovants, campus numérique et formation à distance, démarche qualité ...
- **Formations Interdisciplinaires :**
E.E.A. et ...
 - micro-systèmes,
 - nano- et bio-technologies,
 - matériaux,
 - aéronautique et spatial,
 - énergies et environnement ...
- **Professionnalisation des Formations :**
Rénovation des diplômes, relations avec l'industrie, apprentissage, lycée des métiers ...
- **Formation Continue :**
Validation des Acquis de l'Expérience, formation continuée, ingénierie de formation ...
- **Politique Régionale en Matière de Formation et de Recherche :**
valorisation, soutien à l'innovation, ressources humaines et mobilité ...
- **Culture Scientifique et Technologique :**
Tourisme scientifique, retour vers les citoyens, vulgarisation ...

Comité d'Organisation

Jean-François Sautereau

Président de l'Université Toulouse III

Pierre Dubouix

Directeur de la Mission Formation Continue et Apprentissage, Université Toulouse III

Michel Aubès CPAT, Université Toulouse III

Marie-Claude Bordage CPAT, CNRS

Philippe Castelan LGET, Université Toulouse III

Olivier Eichwald CPAT, Université Toulouse III

Michèle Flouch MFCA, Université Toulouse III

Michel Jacob MFCA, Université Toulouse III

Marion Josserand MFCA, Université Toulouse III

Guy Latapie IUT, Université Toulouse III

Pascal Maussion IUFM, Toulouse

Thierry Parra LAAS, Université Toulouse III

Valérie Pommier-Budinger ENSICA INP Toulouse

Georges Zissis CPAT, Université Toulouse III

Programme

Mercredi 12 novembre 2003

14h00 Installation des démonstrations et des stands des exposants.

19h00 Clôture des installations.

Judi 13 novembre 2003

8h30 Accueil

9h30 Ouverture du colloque

10h00 Conférence : "Nouvelles Approches, Nouveaux Outils"

11h30 Présentation des posters et expérimentations

12h30 Repas

14h00 Présentation des posters et expérimentations (suite)

14h45 Session posters et matériels pédagogiques

17h00 Table ronde : "Formations Interdisciplinaires"

18h00 Fin de la première journée

20h00 Soirée de gala à l'Hôtel Dieu

Vendredi 14 novembre 2003

8h30 Table ronde : "Mise en place du LMD en France et en Europe"

10h00 Session posters et matériels pédagogiques

12h30 Repas

14h00 Table ronde "Professionnalisation, Apprentissage, Validation des Acquis de l'Expérience"

16h00 Bilan des journées

17h00 Clôture du colloque

3EI

Enseigner l'Electrotechnique et l'Electronique Industrielle



- ☐ Une revue trimestrielle
- ☐ Un site web pour partager l'Enseignement du Génie Electrotechnique : <http://www.lesite3EI.com>

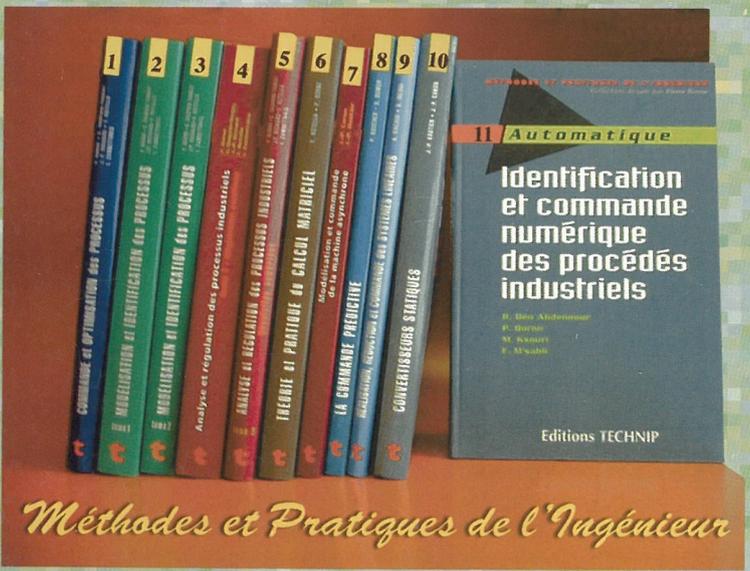
Thèmes futurs

- ☛ L'outil informatique dans l'Enseignement
 - ☛ Mars 2004 - Energie (1)
 - ☛ Juin 2004 - Energie (2)

Une collection pour réviser et approfondir vos connaissances

12 Nouveauté

Modélisation structurée des systèmes avec les bords graphs
Automatique.
 Michel Vergé. 416 p. (A paraître)



- 1 **Commande et optimisation des processus.** *Automatique.* P. Borne, G. Dauphin-Tanguy, J.-P. Richard, F. Rotella, I. Zambettakis. 312 p. 52€
- 2 **Modélisation et identification des processus (Tome 1).** *Automatique.* P. Borne, G. Dauphin-Tanguy, J.-P. Richard, F. Rotella, I. Zambettakis. 376 p. 63€
- 3 **Modélisation et identification des processus (Tome 2).** *Automatique.* 312 p. 52€
- 4 **Analyse et régulation des processus industriels. (Tome 1. Régulation continue).** *Automatique.* P. Borne, G. Dauphin-Tanguy, J.-P. Richard, F. Rotella, I. Zambettakis. 504 p. 60€
- 5 **Analyse et régulation des processus industriels. (Tome 2. Régulation numérique).** *Automatique.* 320 p. 43€
- 6 **Théorie et pratique du calcul matriciel.** *Mathématiques.* F. Rotella, P. Borne. 338 p. 52€
- 7 **Modélisation et commande de la machine asynchrone.** *Electrotechnique.* J.-P. Caron, J.-P. Hautier. 304 p. 51€
- 8 **La commande prédictive.** *Automatique.* P. Boucher, D. Dumur. 176 p. 36€
- 9 **Réalisation, réduction et commande des systèmes linéaires.** *Automatique.* A. Rachid, D. Mehdi. 240 p. 44€
- 10 **Convertisseurs statiques. Méthodologie causale de modélisation et de commande.** *Electrotechnique.* J.-P. Hautier, J.-P. Caron. 320 p. 44€
- 11 **Identification et commande numérique des procédés industriels.** *Automatique.* R. Ben Abdennour, P. Borne, M. Ksouri, F. M' Sahli. 256 p. 44€