



La revue

3E.I

Publication trimestrielle du Cercle Thématique 13.01 de la SEE

ENSEIGNER L'ELECTROTECHNIQUE ET L'ELECTRONIQUE INDUSTRIELLE



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



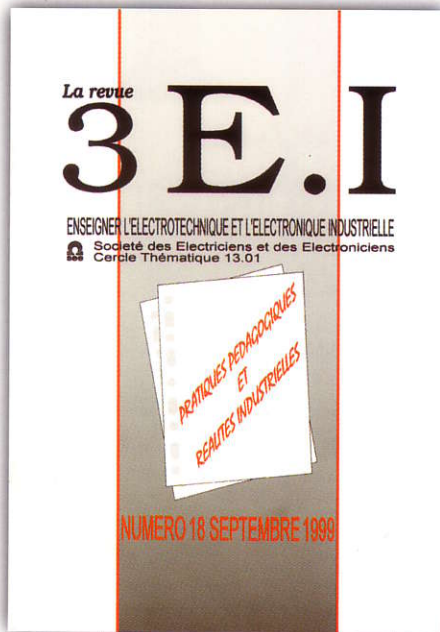
NUMERO 19 DECEMBRE 1999

sixième année

"LA REVUE 3EI"

Enseigner l'Electrotechnique et l'Electronique Industrielle

La Revue 3EI est une publication du cercle thématique 13-01 de la SEE; elle est un outil de communication pour tous ceux qui sont concernés par l'enseignement et la formation dans le domaine de l'Electrotechnique et de l'Electronique Industrielle.



Chaque trimestre, un thème est traité par des Universitaires, Industriels et Enseignants :

Des articles scientifiques et techniques...

Des leçons, des fiches de travaux pratiques, des comptes rendus d'essais de systèmes...

Des sujets et corrigés d'examens et de concours...

Des informations et comptes rendus sur les manifestations et journées d'études organisées dans le domaine du Génie Electrique.

Les thèmes de l'année 1999-2000

- n°19 décembre 1999 :
la traction électrique ferroviaire ;
- n°20 mars 2000:
les énergies renouvelables ;
- n°21 juin 2000 :
les petits moteurs de grandes séries;
- n°21 septembre 2000 :
*pratiques pédagogiques
et réalités industrielles.*

Tarif 1999-2000
abonnement pour les quatre
numéros :

France et CEE
180 F TTC

Pays hors Communauté Européenne
240 F TTC..

**Abonnement à adresser à la
SEE - La Revue 3EI
48, rue de la Procession, 75 724 Paris CEDEX 15.**

accompagné du règlement,

**En indiquant vos :
Nom, Prénom
Adresse d'expédition de la revue.**



**SOCIÉTÉ de l'ELECTRICITÉ, de l'ELECTRONIQUE et des
TECHNOLOGIES de l'INFORMATION et de la COMMUNICATION.**
48, rue de la Procession 75 724 PARIS CEDEX 15
Tel : 01 44 49 60 00 fax : 01 44 49 60 49

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.

| Edition | Sommaire du n°19 |
|---|--|
| SEE 48 RUE DE LA Procession 75724 Paris cedex 15 | Thème : la traction électrique ferroviaire. |
| Directeurs de la publication Marie-Michèle LE BIHAN Gérard DELAVIER | p. 1 Sommaire. p. 2 Editorial. p. 3 Publications. |
| Rédacteur en chef François BOUCHER | la traction électrique ferroviaire |
| Equipe de Rédaction Yasmine FAJOLES Gilles FELD Brigitte GRELAUD Jean-Philippe ILARY Pascal LOOS Philippe NEVEU Michel THION | p.5 Préface Alain JEUNESSE, SNCF, Division électronique, Direction du matériel et de la traction. p.7 Dynamique ferroviaire. A. JEUNESSE. p.11 Les perturbations électriques dans le domaine ferroviaire. A. JEUNESSE. p.23 La BB 36000, une locomotive "passe frontières" A. JEUNESSE, SNCF, Marc DEBRUYNE Alstom Transports p.35 Contribution à la conception globale d'une chaîne de traction ferroviaire. X. ROBOAM, C. LOCHOT, B. de FORNEL. LEEI UMR CNRS-INPT n°5828. |
| Site WEB (en préparation) Responsable Philippe LE BRUN | Recherche et développements |
| Fabrice BAUDOIN Jean-Pierre TAREL Jean-Philippe ILARY | p. 46 Détermination expérimentale de l'inductance d'un bus-bar D. ROGER, Hervé ROISSE, LSEE, Université d'Artois, Duong CHADUC NGUYEN, Luc PAVY, Société AUXEL. |
| Comité de lecture Jean-Pierre CARON (ENSAM Lille) Jean FAUCHER (ENSEEIH) François FOREST (Univ. de MontpellierII) Michel LAVABRE (ENS Cachan) Michel MEUNIER (SUPELEC) Bernard MULTON (ENS Cachan, Antenne de Bretagne) Jean-Marie PETER (SEE) | Langage et programmation. |
| Abonnement annuel Année scolaire 1999/2000 180 F TTC les 4 numéros (France et CEE) 240 F TTC pays hors CEE | p.54 VHDL, un langage de programmation évolué pour l'électronique numérique. P. JOUBERT ENS Cachan. |
| Impression (1000 ex) Imprimerie OG4 Rue des Frères Lumière Z1 les Chanoux 93 300 Neuilly sur Marne | Technologique et composants. |
| Routage et Expédition Départ Presse Z1 les Richardets 93 966 Noisy le Grand | p.66 Eclairage et électronique de puissance P. SOUILLAC, L. T. P. Mendès-France Epinal. p.72 Circuit spécialisé pour la commande des onduleurs ,triphases : le SA 828. Ph. MISSIRLIU, LPR Newton, ENREA. |
| Dépôt Légal Décembre 1999 Commission Paritaire 1202 G 78028 ISSN 1252-770X | Histoire des sciences. |
| | p.76 Michel FARADAY et le développement de l'électricité. Jean-Claude BOUDENOT, Thomson CSF-Communications. p.81 André-Marie AMPERE, "un sacré bonhomme". Jean-Pierre CARON, ENSAM Lille. |
| | p.84 Vente des anciens numéros de la Revue 3EI et recueils des journées 3EI. |

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

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

Passage de témoin réalisé.

Ce numéro 19 de la Revue 3EI a été réalisé par la nouvelle équipe de rédaction de la Revue 3EI dont notre collègue **Alain CUNIERE** ne fait plus partie. Pour des raisons personnelles et professionnelles, Alain a décidé de mettre un terme à ses activités concernant la Revue dont il était le créateur. Responsable de la publication, animateur de l'équipe de rédaction, il a depuis cinq ans, accompli un travail considérable, et nous tenons à le remercier de cette tâche qu'il a su mener à bien en donnant à cette publication un rayonnement important dans le monde des personnes concernées par l'Enseignement de l'Electrotechnique et de l'Electronique Industrielle. (3EI) . Lorsque ses activités nouvelles lui en donneront le loisir, il sera toujours le bienvenu au sein de notre équipe.

Avec Alain, un deuxième membre de l'équipe créatrice prend congé : **Jean-Louis BIANCHI**; pour des raisons similaires, il ne participera plus à nos travaux ; sa collaboration fut précieuse lors de la recherche d'articles concernant certain des thèmes abordés dans notre revue, et dernièrement pour les appareillages basse tension.

Nouvelle équipe de rédaction

dont la mission consiste à continuer le travail réalisé les cinq années précédentes en tenant compte des remarques et propositions formulées par les lecteurs. Nous les encourageons à continuer de nous faire part de leurs suggestions nous permettant de mieux répondre à leur attente.

Meilleure communication;

le site WEB de la Revue EI, sera opérationnel au cours du premier trimestre 2000 sauf impondérable de dernière minute. Nous sommes à la recherche d'un site hébergeant, rapide d'accès, nous allouant un espace mémoire suffisant. Les enseignants du domaine 3EI pourront dialoguer et échanger plus rapidement des informations mais aussi trouver des compléments relatifs aux articles publiés "dans la version papier".

Vente au numéro, des revues anciennes ;

notre Revue demeure accessible par abonnement dont nous avons l'intention de maintenir un prix raisonnable afin de faciliter l'accès au plus grand nombre tout en tenant compte des coûts de réalisation ainsi que celui du fonctionnement. Pour ces raisons nous avons modifié les tarifs concernant l'achat des numéros anciens de la Revue (voir page 84) en donnant désormais la possibilité d'acheter au numéro les plus anciennes publications. Les tarifs sont précisés en fin de journal ; ils tiennent compte des coûts d'enregistrement, de traitement de la demande et de facturation.

Renseignements

Pour tout renseignement ou réclamation concernant votre abonnement, veuillez avoir l'obligeance de la formuler par écrit (fax ou lettre) afin qu'une trace écrite puisse être transmise à l'un des membres de l'équipe; ne téléphonez pas . Nous comptons sur votre compréhension.

L'équipe de rédaction de la Revue 3EI.

PUBLICATIONS - NOUVEAUTES

SYSTEMES AUTOMATIQUES

Analyse et modèles

Pierre-Jean BARRE, Jean-Pierre CARON, Jean-Paul HAUTIER, Marc LEGRAND
Edition Ellipses -320 pages-160F

Ce premier tome est consacré aux définitions et aux outils mathématiques incontournables pour décrire et analyser un système automatique, continu ou séquentiel. Le lecteur trouvera une approche méthodique et progressive des notions de système, du formalisme d'état, de la transformation de Laplace, du Grafset, etc. L'assimilation de la théorie et des méthodes est facilitée grâce à plus d'une centaine d'exercices corrigés, constituant des applications pratiques dans les domaines concernés.

SYSTEMES AUTOMATIQUES

Commande des processus

Jean-Pierre CARON, Jean-Paul HAUTIER
Edition Ellipses -384 pages-190F

Ce second tome est dédié aux systèmes asservis linéaires utilisés en asservissement de poursuite et en régulation. Des outils complémentaires à ceux du premier tome sont proposés dans l'objectif de caractériser un système asservi en terme de comportement dynamique. Le lecteur y trouvera un guide méthodologique illustré tant pour l'analyse que pour le réglage des correcteurs. En connexe, il nous est apparu également indispensable de présenter, de manière détaillée, certains aspects technologiques liés au contrôle en vitesse et en position. Les développements théoriques prennent appui sur de nombreux exemples et l'assimilation des méthodes et de leur application est également facilitée par plus de quarante exercices corrigés.

SYSTEMES AUTOMATIQUES

Problèmes corrigés Applications industrielles

Jean-Pierre CARON, Jean-Paul HAUTIER, Pierre-Jean BARRE
Edition Ellipses -192 pages-95F

Ce troisième tome propose au lecteur, en complément des 150 exercices résolus des deux premiers tomes, une réflexion approfondie sur l'analyse et le réglage de systèmes industriels automatisés. Ces problèmes, par la diversité des sujets abordés et par la qualité des méthodes développées, constituent sans aucun doute une aide précieuse aux étudiants de l'enseignement supérieur pour la compréhension et l'assimilation des enseignements théoriques et pratiques d'une part et pour la préparation aux examens et aux concours d'autre part.

LA FOUDRE

Histoire des connaissances Nature du phénomène Risques et mesures de protection

Claude Gary Edition Masson 2^e édition-224 pages-195F

Depuis la nuit des temps la foudre fascine les hommes. Longtemps symbole de la puissance ou de la colère divine, elle a peu à peu été étudiée puis comprise comme un phénomène climatique naturel. La

première partie retrace l'histoire des mythologies et des croyances liées à la foudre de l'antiquité à nos jours. La deuxième et la troisième partie dressent l'état actuel de nos connaissances puis les objectifs des recherches en cours. La dernière partie porte sur les risques liés à la foudre et sur les mesures de protection appropriées. Cet ouvrage permettra à l'amateur intrigué par ce phénomène spectaculaire et au professionnel confronté à ses dangers de se familiariser avec la foudre et ses conséquences.

LA COMPATIBILITE

ELECTROMAGNETIQUE ET NUCLEAIRE

Jean-Claude BOUDENOT- Gérard LABAUNE Edition Ellipses-340 pages-320F

Cet ouvrage s'inscrit dans le cadre des publications du Collège scientifique et technique de Thomson-CSF. Il capitalise la longue expérience du Groupe Thomson-CSF dans le domaine de la compatibilité électromagnétique et nucléaire. Le formidable développement de l'électronique fait apparaître des besoins sans cesse croissants en compatibilité électromagnétique et en durcissement aux radiations nucléaires. Les auteurs ont voulu rassembler en un seul ouvrage, des connaissances généralement dispersées et présenter de façon concise un état de l'art aux techniciens et ingénieurs confrontés à ce type de problème.

L'ANGLAIS

DE LA TECHNOLOGIE ET DE L'INDUSTRIE

Grammaire et Vocabulaire

Christian LASSURE Edition Ellipses-320 pages-195F

Le présent ouvrage est le résultat de dix années d'une fréquentation assidue des documents techniques et industriels en langue anglaise. Il constitue, dans son genre, le premier exposé de la grammaire et du vocabulaire de l'anglais de la technologie et de l'industrie. Sa substance est tirée de la littérature à laquelle le technicien et l'ingénieur sont confrontés dans leurs activités professionnelles ainsi que de la documentation destinée à l'utilisateur d'appareils électroniques et informatiques. L'ouvrage offre de ce fait un vaste programme de la langue technique et industrielle dont il dissèque les principales caractéristiques grammaticales et lexicales tout en fournissant procédés et modèles de traduction. Avec ses quelques 3000 phrases authentiques, son corpus de milliers de mots et d'expressions techniques, il met à la disposition de l'utilisateur un maximum de moyens devant lui permettre de maîtriser l'anglais de la technologie et de l'industrie pour peu qu'il s'en donne le temps et la peine. Afin de faciliter le travail de l'utilisateur, toutes les phrases données en anglais ont été traduites en français.

L'ANGLAIS

DE LA TECHNOLOGIE ET DE L'INDUSTRIE

Exercices corrigés

Christian LASSURE Edition Ellipses-399 pages-195F

Ce deuxième volume réunit, dans sa première partie, les exercices (baptisés « applications ») afférents aux sous-chapitres du premier volume. Ce sont en tout quelques 860 exercices dont la matière est la même que celle du cours théorique, à savoir des phrases, des expressions authentiques tirées de la littérature engendrée par les entreprises industrielles. Pour que l'étudiant ne bute pas sur le sens des phrases proposées chaque exercice a été assorti de notes de vocabulaire élucidant les difficultés de sens. Les corrigés des exercices indispensables pour l'utilisateur qui veut évaluer lui-même son travail, forment la deuxième partie du volume. Là encore, afin qu'il n'y ait pas d'ambiguïté, toutes les phrases en anglais ont été traduites intégralement.

THEME : LA TRACTION ELECTRIQUE FERROVIAIRE

Préface

JEUNESSE Alain

Division électronique

Direction du matériel et de la Traction

La technique ferroviaire connaît une évolution constante et permanente. Cette évolution se traduit aux yeux du grand public par la mise en service du TGV Duplex, ou du TGV « Thalys » sur Bruxelles, Amsterdam et Cologne, avec des gains de temps très appréciables, c'est aussi la mise en service des matériels régionaux, XTER, TER2N, plus confortables, et climatisés. Ce sera à l'été 2001, l'ouverture de la Ligne à Grande Vitesse Méditerranée qui prolonge la ligne Paris Sud Est jusqu'à Marseille, et qui permettra de relier Paris à Marseille en un peu plus de 3h. Hé oui, que de chemin parcouru depuis 1981 !... Rappelez-vous, ce fut l'inauguration de la première Ligne à Grande Vitesse en France : la LGV PSE (Paris Sud Est)... La vitesse commerciale n'était alors que de 260km/h. !... Que de kilomètres parcourus par les rames TGV !... Pour le technicien cette évolution se traduit par un certain nombre de défis relevés, de paris gagnés, de quelques mystères, de « fonctionnements diaboliques » et de quelques défaillances encore inexplicables !...

La traction électrique, avec ses développements techniques, occupe une place très importante dans cette évolution fantastique du transport ferroviaire. Citons par exemple, la profonde évolution de l'électronique de puissance qui, il y a 20 ans permettait avec les redresseurs contrôlés et le hacheur de mettre en œuvre le moteur traditionnel de la traction électrique : le moteur série à courant continu dont la pièce maîtresse est le collecteur. Ce moteur aujourd'hui est devenu obsolète en traction. En effet, grâce d'une part, à la mise en œuvre de composants de puissance plus performants, et d'autre part grâce à une évolution des composants électroniques bas niveau, il a été possible dès 1988 de mettre en service les matériels de la génération « synchrone » : TGVA, et BB26000. C'est également à cette époque qu'apparaissent sur la banlieue parisienne les Z2N (Z20500) équipées d'un moteur asynchrone. Les électroniques de commande et de contrôle sont structurées autour d'un microprocesseur (le « 68000 ») assurant le pilotage un « peu plus complexe » du moteur triphasé sans collecteur.

Tous ces schémas de puissance sont un prolongement du moteur à courant continu. En effet la conception de ces chaînes de traction conserve le grand principe du « tractionnaire » qui est de maîtriser le courant injecté dans le moteur afin de contrôler le couple. Elles utilisent des convertisseurs « simples », déjà fiabilisés et connus en traction (redresseurs contrôlés, hacheur abaisseur, commutateurs de courant). Il faut remarquer la sagesse de l'ingénieur qui lui a permis de rechercher d'abord, la simplicité et l'efficacité devant l'enjeu de la réalité du service commercial. Ces convertisseurs utilisent des composants de puissance classiques déjà éprouvés tels les thyristors et les diodes. La mise en œuvre du moteur synchrone conduit à faire travailler le commutateur de courant qui l'alimente, en commutation naturelle avec des semi-conducteurs de puissance semi-lents offrant un temps de recouvrement t_q de l'ordre de 100 à 130 μ s. A cette époque les industriels cherchent plutôt à vendre « du moteur asynchrone alimenté en tension » nécessitant des convertisseurs plus complexes utilisant la commutation forcée, sans disposer de semi-conducteurs appropriés.

C'est en 1994, avec le TGV Eurostar, qu'une autre évolution importante apparaît dans le monde ferroviaire français : le moteur asynchrone alimenté en tension. Les composants nouveaux qui permettent cette évolution sont le GTO capable de 4500V et de 2500A et les micro-contrôleurs 80C 196 Intel. Neuf micro-contrôleurs besogneux assurent le contrôle et le pilotage d'un bogie moteur.

Aujourd'hui la chaîne de traction « moderne » se compose comme un mécano avec la mise en œuvre des modules IGBT 3300V 1200A. Le pilotage du moteur asynchrone de traction est assuré par un composant spécialisé pour le calcul : DSP. Les autres servitudes ou automatismes de contrôle et de commande sont réalisées par un micro-contrôleur. Ainsi depuis 1998 les automotrices régionales TER2N sont dotées de deux blocs moteurs équipés d'un onduleur de tension à IGBT alimentant deux moteurs asynchrones de 375kW en parallèles.

La traction électrique ferroviaire, préface

Cette nouvelle structure permet de gagner 4 places assises par rapport à la structure de la Z20500. La nouvelle locomotive Fret et les futures automotrices rapides bénéficieront également de cette technologie.

Ce numéro consacré à la traction électrique ferroviaire devrait permettre d'apporter un nouvel éclairage sur l'évolution de la technologie ferroviaire. Nous y aborderons dans un premier temps :

- la dynamique des trains ;

- la compatibilité électromagnétique entre équipements au sein du système ferroviaire ;
- la BB36000, la locomotive « passe frontière »;
- la contribution à la conception globale d'une chaîne de traction.

Nous verrons ultérieurement :

- le système d'alimentation en énergie électrique ;
- l'évolution des semi-conducteurs de puissance ;
- la nouvelle locomotive Fret.

EVOLUTIONS DU MATERIEL MOTEUR A TRANSMISSION TRIPHASEE

| | Commande en I | | Commande en U |
|---|--|---|--|
| | Synchrone | Asynchrone | Asynchrone |
| <i>période des prototypes et des expérimentations</i> | | | |
| 1974 | | | Expérimentation Z4212- CC 14003 Techno. THYRISTOR |
| 1979 | proto BB 10004 | | |
| 1983 | 25 kV 50 Hz THYRISTOR | | Expérimentation BB 10003 THYRISTOR |
| 1985 | BB 20011/12 rame TGV PSE 88 | expérimentation de la Z 8895 THYRISTOR | |
| <i>1988 : livraisons et mises en service des matériels de série</i> | | | |
| 1988 | BB 26000 TGVA 105 rames | Z2N - Z 20500 | expérimentation : 1 BM TMST BB 10003 GTO |
| 1994 | TGV R bi 50 rames TGV R tri 40 rames TGV DUPLEX 30 rames PBKA 17 rames | | <i>livraison et mise en service des TMST</i> |
| 1997 | | fin de livraison des Z 20500 total : 190 rames | proto « chaîne ONIX » sur Z2N, techno : IGBT |
| 1998 | fin de la livraison des TGV total 242 rames fin de livraison des BB 26000 : total : 230 Loc. | Série MI2N Z22500 SNCF 52 rames RATP 16 rames | mise en service des BB 36000 60 loc.(GTO) et TER2N Z23500 (IGBT) 80 rames |
| 2000 | | | Loc.FRET (120 loc.)(IGBT) ZTER(22 rames) (IGBT) TER2N NG (IGBT) |
| 2002 | | | nouvelles Z2N (IGBT) |

DYNAMIQUE DES TRAINS

Alain JEUNESSE,
SNCF, Division électronique,
Direction du Matériel et de la Traction.

Résumé:

La définition d'un engin moteur ferroviaire, exige au préalable la connaissance du programme de traction. Pour l'ingénieur, ce programme est caractérisé par la caractéristique "effort-vitesse" : $F(V)$.

Introduction.

La définition des caractéristiques générales d'un engin moteur exige au préalable la connaissance complète du programme de traction auquel il devra satisfaire. Ce programme détermine les choix de conception du matériel moteur tant pour la partie mécanique que pour la partie électrique (moteur, chaîne de traction), ainsi que les interdépendances entre ces deux parties qui sont intimement liées. Il faut bien comprendre également que ces choix de conception sont aussi très dépendants des performances de la technologie disponible et de sa pérennité compte tenu de la durée de vie de ces matériels qui est au minimum de l'ordre de 30 ans.

Le cahier des charges doit préciser par exemple : les types de trains à remorquer avec leur masse, l'effort au démarrage nécessaire, les profils de ligne susceptibles d'être rencontrés, la vitesse maximale, l'effort résiduel à la vitesse maximale, etc.

Ces performances dynamiques de traction se définissent en considérant :

- les efforts nécessaires à la marche du train ;
- l'adhérence ;
- le couple moteur et la puissance
- la caractéristique « effort - vitesse » ou « $F(V)$ ».

1- Efforts nécessaires à la marche du train

1-1 Effort total aux jantes : F_j

Pour qu'un train de masse M exprimée en tonnes (t) et de résistance à l'avancement R (kN) dispose d'une accélération résiduelle γ (m/s^2), sur un profil $i_{0/100}$, il faut que l'engin développe à ses jantes un effort total F_j tel que :

$$F_j = R + M.g.i + k.M.\gamma \quad (\text{kN})$$

C'est l'équation fondamentale de la dynamique... ferroviaire. Nous examinerons, ci-après, chacune des composantes de cette équation.

1-2 La résistance à l'avancement R

Elle exprime les efforts résistants à vaincre pour faire rouler un train à une vitesse donnée en palier. Cette résistance à l'avancement s'exprime en fonction de la vitesse V selon l'équation suivante

$$R = A + B.V + C.V^2 \quad (\text{kN})$$

A : représente les frottements dans les boîtes d'essieux et la résistance au roulement sur les rails, ce coefficient dépend de la masse du train et du nombre d'essieux ;

BV : représente les efforts de frottement des boudins de roue contre le champignon des rails ;

CV^2 : représente la résistance aérodynamique du train qui dépend de :

- l'action de l'air sur la face frontale,

- l'effet de l'écoulement de l'air le long des parois ;
- les turbulences dues aux césures entre véhicules et celles qui se produisent sous le train entre la voie et les dessous de caisse ;
- toutes les imperfections aérodynamiques.

Ces coefficients sont déterminés de manière expérimentale. L'annexe 1 donne quelques exemples typiques de résistance à l'avancement.

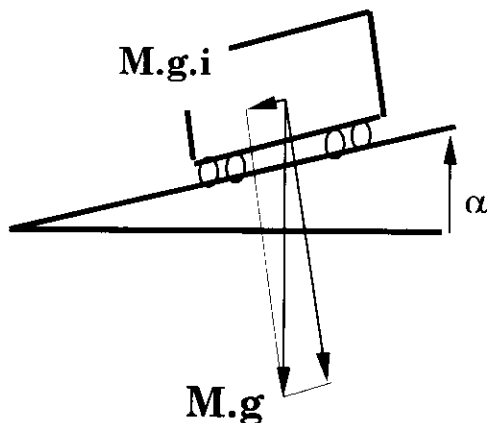
1-3 Composante de l'effort due à la gravité $M.g.i$

C'est la composante du poids, prise parallèlement à la voie. Une rampe est caractérisée par son profil ou inclinaison qui s'exprime en « $i_{0/00}$ » ou en mm/m . Cette valeur représentant le rapport entre l'élévation et la longueur de la rampe, rapport équivalent à un sinus. Un train de masse M dans cette rampe est donc soumis à un effort résistant proportionnel au profil de la rampe.

Compte tenu des déclivités qui se rencontrent en traction ferroviaire à adhérence (c'est à dire sans crémaillère), l'angle α du plan incliné est très faible ($\alpha < 3$ deg), il est d'usage d'assimiler le sinus à la tangente.

$$M.g.i = M.g.\sin\alpha$$

L'effort est résistant dans une rampe, c'est un effort moteur dans une pente.



α représente l'angle que fait la voie avec le plan horizontal

Profils de ligne des grands axes ferroviaires :

Sur les lignes classiques les rampes caractéristiques sont de l'ordre 8 à 10 $0/00$. Il existe cependant quelques rampes exceptionnelles :

- en **Maurienne**, de St Jean de Maurienne à Modane : 30 $0/00$;
- dans les **Pyrénées**, la rampe de Capvern sur la ligne de Tarbes à Toulouse ; de Tournay à Capvern : 33 $0/00$.

- sur la ligne **RER E (EOLE)**, en sortie de la gare Magenta vers la banlieue, le profil moyen est de 26 $0/00$ avec des passages courts en 30 $0/00$.

Sur les lignes à Grande Vitesse (LGV), les profils de ligne sont beaucoup plus sévères :

- ligne TGV PSE, Morvan : rampe du « Bois Clair » par exemple : 35 $0/00$ sur 6 km ;
- sur la LGV Atlantique les rampes ne dépassent pas les 25 $0/00$.

Résistance supplémentaire due aux courbes de la voie.

La résistance en courbe provient de 2 causes principales :

- le frottement entre les boudins des roues et les faces latérales du champignon de rail ;
- le glissement des roues sur le rail dû à la rigidité mécanique des bogies ou des wagons à essieux ; en effet les essieux restent parallèles entre eux.

Ces frottements occasionnent des pertes et se traduisent par un effort résistant. Cet effort supplémentaire à vaincre dépend du rayon de la courbe, ρ , et de l'empattement rigide (distance entre deux essieux). D'autres facteurs interviennent également : la conicité des bandages, le dévers, le sur-écartement de la voie, le coefficient de frottement local à l'instant considéré, les vitesses relatives en cause. On admet pour tous les types de matériels une résistance spécifique définie par la relation suivante :

$$rc = 800/\rho$$

ρ : rayon de courbure en mètres (m)

Il est d'usage d'ajouter le terme correctif rc au profil de ligne i pour définir ce qu'on appelle :

« le profil corrigé i' », tel que : $i' = i + 800/\rho$

En d'autres termes, une courbe de rayon $\rho = 800m$, induit un effort résistant équivalent à celui créé par une rampe de 1 $0/00$

1-4 Inertie des masses tournantes.

L'équation fondamentale de la dynamique apprend que pour accélérer une masse M avec une accélération γ , il faut lui fournir un effort $M.\gamma$. La masse proprement dite du train doit être majorée parce qu'il a des pièces en rotation qui possèdent leur propre inertie. Ce sont les essieux, les moteurs de traction et les transmissions.

k caractérise le coefficient d'inertie des masses tournantes ; ce coefficient légèrement supérieur à 1, tient compte des pièces en rotation ; kM représente une masse fictive ramenée aux jantes de l'engin moteur : k varie de 1,10 à 1,30 pour une locomotive, k est voisin de 1,04 pour un TGV.

γ : accélération résiduelle (m/s^2)

2 Sollicitation d'adhérence μ

L'action du couple moteur sur une roue posée sur le rail, se traduit par un effort à la jante de cette roue, tant que celle-ci trouve un appui sur le rail ; c'est ce qu'on appelle l'**adhérence**.

La sollicitation d'adhérence est le rapport entre l'effort maximal transmissible aux roues motrices et la force adhérente au rail due à la masse de l'engin :

$$\mu = F_{j \max} / Mg$$

La valeur de μ dépend de l'état du rail :

- sur un rail sec la valeur de μ peut atteindre 30 à 35 % voire 40 % ;
- sur un rail mouillé, avec éventuellement des feuilles mortes, μ est beaucoup plus faible ; quelques fois inférieur à 10 % ;
- la technique du sablage, devant les roues motrices, permet de relever le niveau d'adhérence sur des zones humides et glissantes.

La traction d'un train nécessite donc de gérer au mieux l'effort transmis aux roues motrices, afin d'éviter un glissement excessif des roues sur les rails : c'est la gestion du patinage. Il en est de même en freinage où il ne faut absolument pas bloquer les roues : c'est la gestion de l'anti-enrayage.

L'effort maximal transmissible est proportionnel à μ et au poids de l'engin moteur :

$$F_{j \max} = \mu \cdot Mg$$

3 Performances de l'engin moteur.

A partir de l'effort à la jante F_j nécessaire pour vaincre l'ensemble des forces résistantes, nous pouvons déterminer le couple à la jante C_j , le couple moteur C_m , et la puissance P_j à la jante de l'engin.

3-1 Le couple à la jante :

$$C_j = F_j \text{ (kN)} \cdot D/2 \quad \text{(kN.m)}$$

avec D = diamètre des roues motrices exprimé en mètres; en général on considère le diamètre des roues mi-usées.

Pour une motrice TGV le diamètre de roue est : roue neuve 920mm, roue mi-usée 885mm.

3-2 Couple sur l'arbre moteur :

il s'en déduit simplement de la manière suivante :

$$C_m = \frac{F_j \cdot r}{n \cdot \eta \cdot \rho}$$

C_m en kN.m, F_j en kN, r rayon de la roue ($D/2$) en m, n nombre de moteurs, η rendement de la transmission, ρ rapport de réduction.

3-3 La puissance à la jante.

Elle s'écrit de la manière suivante :

$$P_j = \frac{F_j \cdot V}{3,6}$$

avec P_j en kW, F_j en kN, V en km/h.

Très important : il faut remarquer **que l'effort F_j augmente avec le carré de la vitesse et la puissance P_j augmente avec le cube de la vitesse ;**

- une locomotive pour le fret doit développer de l'effort : F_j
- un TGV doit être puissant pour rouler vite.

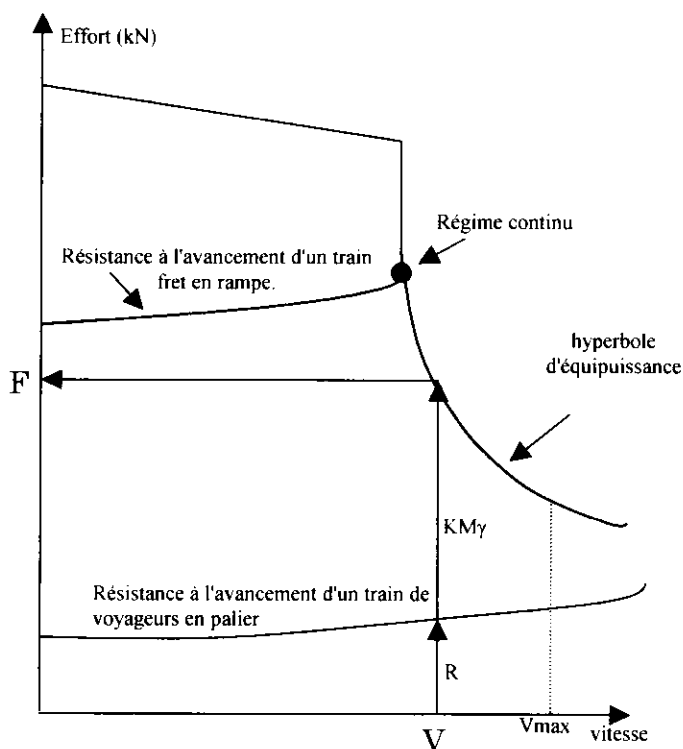
4 Caractéristique effort vitesse $F(V)$.

La caractéristique effort vitesse d'un engin moteur est la représentation dans un plan effort vitesse des performances du matériel. On y distingue :

- **l'effort au démarrage**, obtenu par un courant moteur maximal ;
- **le régime de fonctionnement de démarrage** lié aux possibilités thermiques ou de surcharge des convertisseurs, ou des autres équipements de la machine, qui vont conditionner le courant de démarrage ;
- **le régime continu** de fonctionnement : c'est le point de définition de l'équipement ; on peut le définir comme le régime de fonctionnement le plus contraignant pouvant être soutenu sans limitation de durée ;
- **le régime de fonctionnement à puissance constante** : l'équipement travaille à pleine puissance, pour augmenter la vitesse il devient nécessaire de commander la désexcitation ou le « défluxage » des moteurs de traction, l'effort disponible décroît alors en $1/V$, d'où l'appellation « hyperbole d'équipuissance » ;
- **la vitesse maximale**.

La caractéristique Effort -Vitesse $F(V)$ représente le programme de traction que doit réaliser l'engin moteur. Ces exigences dynamiques contribuent au dimensionnement de l'engin moteur.

Caractéristique effort-vitesse F(V)



Annexe 1 : Résistance à l'avancement typique de certains trains

| | |
|--------------------------------|--|
| Locomotive de 80t | $R(\text{daN}) = 104 + 0,8.V + 0,03.V^2$ |
| matériel à voyageurs | $R(\text{daN/t}) = 1,25 + V^2/6300$ |
| train de fret « tout venant » | $R(\text{daN/t}) = 1,5 + V^2/1600$ |
| train de fret spécialisé lourd | $R(\text{daN/t}) = 1,2 + V^2/4000$ |
| TGV R (383t 10 véhicules) | $R(\text{kN}) = 4,2 + 0,0653.V + 0,00105.V^2$ |
| TMST (816t 20 véhicules) | $R(\text{kN}) = 4,82 + 0,0653.V + 0,00105.V^2$ |

Annexe 2 : Quelques ordres de grandeur

| | Automotrice 2 motrices | TGV 2 motrices | Locomotive |
|------------------------------------|-------------------------------|----------------------|------------------------|
| masse de la motrice | 78t en charge | 68t | 88t |
| nombre de moteur | 4 | 4 | 2 |
| charge par essieu moteur | 19,5 | 17 | 22 |
| puissance à la jante de la motrice | 1500 kW | 4400 kW | 5600 kW |
| Vitesse max | 140 | 300 | 200 |
| Accélération au démarrage | 0,96 m/s ² | 0,6 m/s ² | 0,4m/s ² |
| effort au démarrage | 15t | 12t | 32t |
| effort à V max | 3t | 6t | 10t |
| sollicitation d'adhérence | 19% correction à la charge | 20 à 23 % | 28 à 30 % excep.36% |

LES PERTURBATIONS ELECTRIQUES DANS LE DOMAINE FERROVIAIRE

Alain JEUNESSE

SNCF, Division électronique,
Direction du matériel et de la traction

Résumé :

Cet article montre les principaux aspects de la compatibilité électromagnétique au sein du système ferroviaire, entre le matériel roulant, l'infrastructure et le riverain. L'étude de ces différents aspects permet d'aborder de manière très pragmatique la CEM en mettant en évidence les sources, les victimes, les couplages, les phénomènes conduits, ou rayonnés, les tests, et certaines solutions mises en oeuvre.

La prise en compte, très en amont, des exigences en matière de compatibilité électromagnétique entre les différentes composantes du système ferroviaire y compris son proche environnement est une preuve de la maîtrise du système, et des équipements qui le constituent. Cette maîtrise est également une preuve de qualité et de régularité du service.

PREAMBULE

Les Grands Principes (à admettre et à appliquer...).

La compatibilité, électrique ou électromagnétique, entre deux systèmes, ou deux équipements, met toujours en oeuvre au moins une victime et au moins un agresseur. La victime est liée à la source d'agression par un mécanisme qui s'appelle : le couplage. Résoudre un problème de compatibilité, c'est faire un choix qui offre une marge M de fonctionnement sans gêne pour la victime, entre le niveau d'émission A de l'agresseur et le niveau d'immunité I de cette victime.

En fait, il faut s'attacher à satisfaire cette inégalité :

$$M > I - A$$

Compte tenu de la complexité des systèmes et de la très grande diversité des équipements (ou sous systèmes), il est impossible, de résoudre au cas par cas tous les problèmes de compatibilité électromagnétique entre équipements. Les normes fixent des limites en émission, et en niveau d'immunité. Des tests normalisés permettent de vérifier le respect des ces limites et de qualifier les équipements. La mise en oeuvre d'équipements répondant aux exigences spécifiées dans les documents normatifs permet de régler un grand nombre de problèmes de « bon voisinage ». Mais, si les « normes » permettent de résoudre de nombreux problèmes de cohabitation, il restera

toujours quelques cas particuliers à résoudre. C'est tout l'intérêt du métier d'ingénieur !

C'est au concepteur du système d'identifier les sources d'émission et les équipements sensibles. C'est à lui, d'imposer les exigences à satisfaire pour assurer la compatibilité, et d'assembler entre eux des équipements satisfaisant à ces exigences. Cependant il faut toujours rester modeste et admettre que deux équipements pris séparément peuvent avoir un fonctionnement satisfaisant, par contre une fois assemblés..., ils peuvent nous réserver quelques surprises !

Une des grandes règles de la compatibilité électrique s'appuie sur le principe suivant : le signal utile se propage en mode différentiel (un fil conducteur aller et un fil conducteur retour), le signal perturbateur ou parasite se propage en mode commun (aller sur les fils de liaison et retour par là ou il peut et en particulier par les masses).

Définition.

La Compatibilité Electromagnétique (CEM) est définie comme étant l'aptitude d'un dispositif, d'un appareil ou d'un système à fonctionner dans son environnement électromagnétique de façon satisfaisante et sans produire lui-même des perturbations électromagnétiques intolérables pour tout ce qui se trouve dans cet environnement.

Les unités.

Nous aurons besoin d'exprimer des niveaux de champ électrique E et de champ magnétique H. Nous faisons ici quelques rappels (toujours bien utiles).

Le champ électrique E s'exprime en V/m ; le champ magnétique H s'exprime en A/m. H est lié à B (induction magnétique) par une constante qui dépend du milieu dans lequel est créé B. Dans l'air ou dans le vide $B = \mu_0 H$, où $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$. B s'exprime en T (Tesla), H en Ampère/mètre. Dans le vide ou dans l'air

$$1 \text{ A/m équivaut à } 4\pi \cdot 10^{-7} \times 1 \cong 1,25 \mu\text{T}$$

L'unité généralement utilisée par les électroniciens est le dB (décibel) : l'amplitude A d'un signal peut s'exprimer en dB selon la relation :

$$A_{dB} = 20 \cdot \log A/A_0 \text{ avec } A_0 \text{ le niveau de référence}$$

exemples : un champ électrique E de 1V/m, s'exprime par $E_{dB} = 120 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ lorsque $E_0 = 1\mu\text{V/m}$;

un champ magnétique H s'exprime en $\text{dB}\mu\text{A/m}$.

Relation entre les champs H et E.

Les lois de l'électromagnétisme établissent la relation :

$$E/H = 377 \Omega$$

c'est la valeur caractéristique de l'impédance du vide ou de l'air. Exprimé en dB cela revient à écrire :

$$E_{dB} - H_{dB} = 51 \text{ dB}$$

Compatibilité entre le matériel roulant ferroviaire, l'infrastructure et le monde environnant

La mise en circulation d'un train suppose que chacun des éléments qui le composent, la locomotive, le matériel remorqué, ou la rame TGV dans son ensemble, présente une certaine aptitude à s'intégrer au sein du convoi, de l'infrastructure ferroviaire, et plus généralement au sein du monde riverain environnant. Réciproquement, les trains en circulation, l'ouvrage ferroviaire pris dans son ensemble, et les systèmes externes, en dehors du domaine ferroviaire doivent « respecter » la circulation du train considéré. En d'autres termes, composer et faire circuler un train impose de respecter les règles élémentaires de compatibilité entre systèmes.

Assurer cette compatibilité entre systèmes est d'autant plus important que le chemin de fer utilise de plus en plus la traction électrique, que la puissance des engins moteurs augmente avec les charges remorquées et les vitesses commerciales pratiquées, et que leur mise en œuvre nécessite aujourd'hui des équipements à conversion statique d'énergie capables d'établir et de couper de fortes

intensités sous des tensions élevées. Le matériel moteur est par conséquent souvent dénoncé comme le principal perturbateur ou « agresseur ». Les équipements électroniques bas niveau se placent plutôt du côté des victimes.

Les principales exigences de l'infrastructure ferroviaire en matière de compatibilité électromagnétique imposent au matériel roulant ferroviaire de respecter les sous systèmes fondamentaux :

- la signalisation, assurant en particulier la sécurité des circulations ;
- l'alimentation en énergie de traction ;
- les télécommunications recouvrant la téléphonie (de l'opérateur ferroviaire et des riverains) et la radiodiffusion, ou les télécommunications hertziennes ;
- le voyageur et les marchandises transportées.

Les exigences du matériel moteur imposent aux équipements embarqués de supporter les agressions internes créées par la commutation des courants forts d'une part et les agressions existantes dans le monde riverain d'autre part.

Nous aborderons ces différents sujets ci-après.

I La signalisation.

Elle assure la protection et la sécurité des circulations.

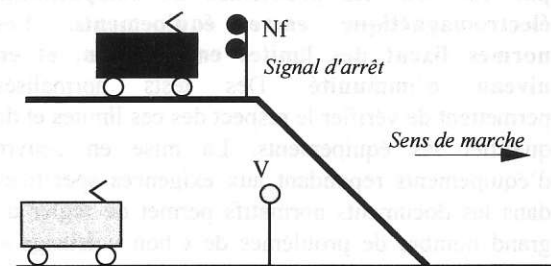
Le système de signalisation permet d'assurer le « cantonnement » ou l'espacement en sécurité des trains qui circulent sur la même voie. Il assure également la protection des zones de croisement, et des zones de gare. Il permet la mise en œuvre des itinéraires suivis par les trains. La signalisation doit être impérativement respectée par le conducteur.

Un des éléments du système de signalisation est le Circuit de Voie (CdV). Figures a et b



Assurer le cantonnement des trains

Figure a



Assurer la protection d'une zone de croisement

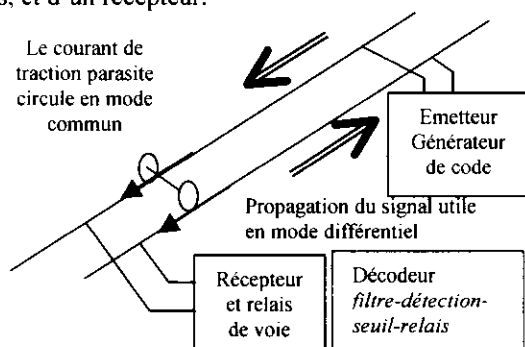
Figure b

1-1 Rôle des circuits de voie.

Le circuit de voie est un des sous-systèmes essentiels aux installations de signalisation. Son rôle est d'assurer la détection de la présence d'un train sur une zone définie par le segment de voie compris entre un émetteur et un récepteur. Ce segment de voie est appelé « canton » lorsqu'il s'agit d'une zone de pleine voie et lorsqu'il s'agit de contrôler simplement l'espacement des trains. Il est appelé « zone » lorsqu'il contrôle la présence d'un train sur une zone d'aiguille

1-2 Principe du circuit de voie (figure I-1).

Le sous-système CdV est composé d'un émetteur, d'un circuit électrique de transmission utilisant les rails, et d'un récepteur.



Principe de fonctionnement d'un CdV
Figure I-1

Le signal émis par l'émetteur se propage en mode différentiel le long de la voie. (un rail aller, un rail retour). Si aucun essieu ne shunte les rails, alors le récepteur "voit" le signal émis. Si ce signal est "reconnu" par le récepteur, le relais de voie associé à ce récepteur est excité : la voie est libre.

Dans le cas contraire le récepteur "ne voit" pas le signal de son émetteur ; le relais de voie est désexcité : le canton ou la zone sont occupés.

Le signal électrique généré par l'émetteur est plus ou moins complexe. Cette complexité est nécessaire ; elle améliore l'immunité du récepteur vis à vis d'autres signaux électriques parasites, en particulier le courant de traction qui lui aussi emprunte les rails. Il faut remarquer que le courant de traction parcourt les rails en mode commun.

1-3 Evénement redouté.

L'événement redouté est une excitation suffisamment longue du récepteur de circuit de voie alors qu'un train occupe le canton ou la zone d'aiguille. Cet incident peut avoir comme conséquence, la mise à voie libre, de manière inopinée du canton sur lequel se trouve le train. Il est donc important de se préoccuper des risques de perturbation des récepteurs de circuit de voie.

1-4 Risques de perturbation d'un récepteur de CdV.

La perturbation d'un récepteur de circuit de voie peut être engendrée par deux mécanismes distincts :

- le **déshuntage**, c'est à dire une dégradation du contact électrique entre les roues d'un mobile et les rails faisant apparaître une tension résiduelle aux bornes du récepteur ;
- la **perturbation électrique**, contenue dans le courant de traction, qui apparaît aux bornes du récepteur dont les caractéristiques en fréquence et en amplitude correspondraient à celles du signal émis par l'émetteur du CdV : elle pourrait alors, dans certaines conditions, leurrer le récepteur.

Le **problème du shuntage** (ou du déshuntage) est un des problèmes de l'interface entre la Voie et le Matériel. La qualité du contact électrique entre la roue et le rail est sensible à :

- * l'état de surface de la roue, sa rugosité ;
- * la résistance électrique de l'essieu monté qui ne doit pas être inférieure à $0,2\Omega$, mais également bien sûr au nombre d'essieux et à leur masse ;
- * l'utilisation de certaines semelles de frein en matière composite ;
- * la géométrie de la voie (courbe, alignement, rampe ou pente) ;
- * au nombre et au type de circulation qui emprunte le tronçon de voie (circulation HLP (locomotive seule) ou élément automoteur) ;
- * l'état de surface du rail (oxydation, résidu de sable laissé par les engins moteurs lors de patinage par exemple) ;
- * aux conditions météorologiques : pluie, vent de travers pour des engins légers.

La **perturbation des récepteurs par le courant de traction** (figure I-2) est également un problème de compatibilité entre les récepteurs (ou système de détection) et les matériels roulants. En cas de déséquilibre du retour de courant de traction, une tension résiduelle peut apparaître aux bornes du récepteur. Le cas de déséquilibre extrême est le « rail cassé » comme l'indique la figure I-2.

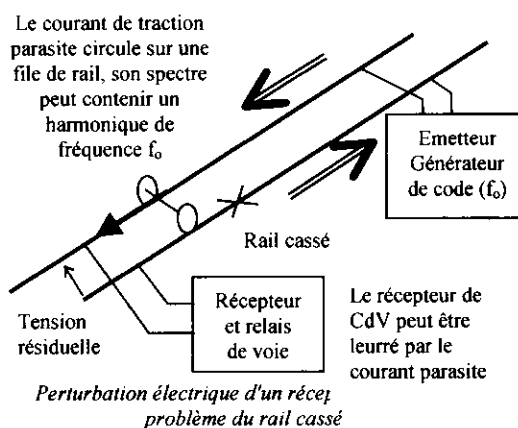


Figure I-2

Les perturbations électriques dans le domaine ferroviaire

Dans cette situation le récepteur ne voit plus le signal de son émetteur ; le circuit électrique entre les deux équipements est coupé : le récepteur est désactivé. Dans ces circonstances la sécurité des circulations est conservée, mais le trafic risque d'être perturbé. Cette situation pourrait devenir dangereuse si le courant de retour contenait des courants harmoniques, d'une amplitude suffisante, capables d'être reconnus et décodés par le récepteur. Ces courants parasites pourraient ainsi leurrer le récepteur.

Il y a compatibilité lorsque le contenu spectral du courant de traction reste en dehors du seuil d'immunité des récepteurs qui est spécifié à l'aide d'un « gabarit » dans le plan fréquence - amplitude.

1-5 Caractéristiques essentielles des circuits de voie principaux et de leurs utilisations.

Le tableau ci dessous donne les caractéristiques essentielles des CdV, leur population approximative, et leurs applications courantes.

| CdV | population | caractéristiques | utilisations |
|-----------|------------|--|---|
| 50 Hz | 4 000 | fréquence 50Hz | Cantonement lignes 1.5 kV |
| 83 Hz | 1 150 | fréquence 83Hz | Canton. Lg 25 kV 50 Hz essentiellement sur le réseau Nord technologie obsolète |
| 850/300 | 1 000 | fréquences alternées 800Hz, et 350Hz | Canton. : Ess ^m sur l'artère Nord Est et sur le réseau EST (technologie obsolète) |
| ITE | 35 000 | impulsion de tension élevée fréquence 3Hz amplitude 100V perce l'oxydation des rails | zones de gare et voies de service : voies courtes (600m env.) toutes lignes |
| 8500/8700 | 12 000 | fréquence 8500 ou 8700 Hz | CdV court, sans joint supporté par un autre CdV (pour les zones de PN) |
| UM 71 | 20 600 | fréquences porteuses f0 1700, 2000, 2300, 2600Hz et modulation de fréquence | Canton. ttes lignes : « classiques » LGV Sud Est LGV Atlant. intérêts : utilisation de rails soudés, sans joint supporte la TVM |

| | | | |
|-----------------|---------------|--|---|
| UM 71/C TVM 430 | 2 400 environ | fréquences porteuses f0 1700, 2000, 2300, 2600Hz et mod. de fréq. | Canton. Tun. s. la Manche, LGV Nord Europe, Jonct. LGV Méditerranée |
| UM 2000 | | en cours de dévelop ^t émet. identique à l'UM71 (détecte et gère un déshuntage) | Canton. à définir lignes interopérables ? |

source : Direction de l'Ingénierie Septembre 1996

1-6 Perturbations électriques des récepteurs de circuit de voie : mécanismes et certains remèdes

1-6-1 sources d'émission :

elles ont essentiellement pour origine :

en alimentation CC 1500V ou 3000V

- le résiduel de tension 50Hz présent sur la tension caténaire provenant d'un déséquilibre naturel au niveau des redresseurs de sous station; cette ondulation résiduelle est de l'ordre de 0,7V_{eff}, (la SNCB spécifie sa valeur maximale à 4V_{eff});
- l'ondulation sur la tension caténaire liée à une défaillance accidentelle d'un redresseur de sous station ;
- la pollution externe dépendante des installations industrielles voisines ;
- le courant pris à la caténaire dû au fonctionnement des convertisseurs de puissance modulé en amplitude par les asservissements ;
- les produits de modulation créés par la fréquence de fonctionnement des convertisseurs et le fonctionnement à fréquence variable des convertisseurs de traction ou des auxiliaires dans le cas des alimentations de moteurs triphasés. Une déformation d'un collecteur de moteur à courant continu peut également générer ce type de modulation.

En alimentation monophasée 25kV à 50Hz.

Le choix de la fréquence de fonctionnement des convertisseurs de puissance est fait en cohérence avec :

- les fréquences porteuses des CdV : l'utilisation de ces fréquences est interdite;
- les fréquences déjà existantes sur le réseau, non utilisées par les systèmes de signalisation ou de détection des trains, sont conseillées;
- le résiduel de tension présent sur la tension caténaire provenant d'une pollution externe (industrie), cette pollution se manifeste essentiellement par des composantes harmoniques paires (du 50Hz) ;
- le courant pris à la caténaire dû au fonctionnement des convertisseurs de puissance modulé en amplitude par les asservissements ;
- les produits de modulation créés par la fréquence de fonctionnement des convertisseurs

et le fonctionnement à fréquence variable des convertisseurs de traction ou des auxiliaires dans le cas des alimentations de moteurs triphasés. Une déformation d'un collecteur de moteur à courant continu peut également générer ce type de modulation.

Dans tous les cas, la fréquence de fonctionnement des convertisseurs de puissance est fait en tenant compte :

- des fréquences porteuses des CdV : l'utilisation de ces fréquences est interdite;
- des fréquences déjà existantes sur le réseau, non utilisées par les systèmes de signalisation ou de détection des trains : ces fréquences sont conseillées comme par exemple le choix du 300Hz (ou d'un multiple) comme fréquence de fonctionnement des hacheurs de traction et des convertisseurs auxiliaires.

I-6-2 Précautions pour limiter les effets perturbateurs des courants de traction.

La conception en sécurité des systèmes de détection des trains conduit à faire les choix permettant de discriminer au niveau du récepteur le signal utile créé par l'émetteur de circuit de voie, du signal parasite, ou perturbateur, supporté par les courants de traction circulant dans les rails. Le signal utile peut être considéré comme un code « fabriqué » par l'émetteur de CdV et « reconnu » par le récepteur associé.

1. **Les codes utilisés par les émetteurs de CdV** sont choisis judicieusement en évitant les fréquences créées par les installations fixes de traction électriques et par les matériels moteurs. Ces codes sont difficilement « imitables » par les convertisseurs de puissance.
2. **La propagation du signal codé (signal utile)** se fait en mode différentiel (un rail aller, un rail retour), alors que le courant de traction susceptible de perturber le récepteur de CdV (signal parasite) se propage dans les rails en mode commun : les courants de traction consommés à bord des engins « retournent » vers les sous stations, principalement, par les 2 files de rail. La distinction de ces modes de propagation peut être perturbée et devenir dangereuse lorsque les deux files de rail risquent d'avoir des impédances différentes pour le courant de traction.
3. **La détection par le CdV d'un déséquilibre d'impédance** entre les 2 files de rail fait « chuter la zone » et conduit à la mise au « rouge » du signal protégeant le canton. Un tel déséquilibre, non signalé, pourrait créer aux bornes du récepteur une différence de potentiel induite par le courant de traction, se traduisant par un signal susceptible de leurrer ce récepteur. Le déséquilibre extrême est le « rail cassé ».
4. **Le fonctionnement et le réglage des convertisseurs des matériels** sont conçus de

façon à ne pas générer des fréquences susceptibles « d'imiter » le code des CdV : les niveaux d'émission des signaux parasites sont limités, les engins doivent respecter les exigences imposées par le gabarit de chacun des CdV. Les matériels roulants ne sont pas conçus en sécurité. Néanmoins il est important de respecter et de conserver les performances en matière de compatibilité entre engin et système de détection des trains à la conception et tout au long de la vie du matériel.

5. **La mise en œuvre de CdV insensibles** à « la pollution » électrique pouvant exister dans certaines zones proches des lignes EDF, ou des sections de séparation 1500V/25kV 50Hz ; c'est le cas par exemple des CdV 50Hz qui doivent être remplacés par des UM71 .

La perturbation d'un récepteur de CdV peut engendrer un incident contraire à la sécurité lorsque plusieurs de ces règles ne sont plus respectées en même temps.

I-6-3 Précautions prises à bord du matériel

I-6-3-1 Engins à CC (1500V ou 3000V) .

Pour limiter la circulation des courants parasites induits par les sources extérieures, il est nécessaire de disposer d'un filtre d'entrée de type « LC » opposant une impédance suffisante (figure I-3). Aujourd'hui, l'impédance minimale à 50Hz exigée pour accéder au réseau français est de 0,3Ω.

| Engin moteur | Z (Ω) d'entrée à 50 Hz par loco. ou motrice | Composition du filtre d'entrée | | |
|-----------------|--|--------------------------------|-------|------------------------|
| | | L(mH) | C(mF) | Fréq. (Hz) d'accord |
| BB 7200 | 0,23 | 2 | 8 | |
| BB 22200 | 0,38 | 2,5 | 8 | |
| BB 26000 | 0,78 | 2,5 | 13,6 | 50 |
| TGV PSE | 1 | 4 | 8 | |
| TGVA | 1,2 | 4 | 8 | 50 |
| TGVR 1500V | 1,2 | 4 | 8 | 50 |
| TGVR 3000V SNCB | 4 | 16 | 2 | 50 |
| TGVR 3000V FS | 4 | 16 | 2 | 50 et 42 |
| Z 5600/8800 | 1,35 | 6 | 6 | |
| Z 20500 | 2,8 | 9 | 9 | 50 |

Tableau -I-6-3

L'impédance d'entrée à 50Hz des principaux matériels mis en service depuis 25 ans et admis à circuler sur le réseau de la SNCF sont présentées dans le tableau ci dessus.

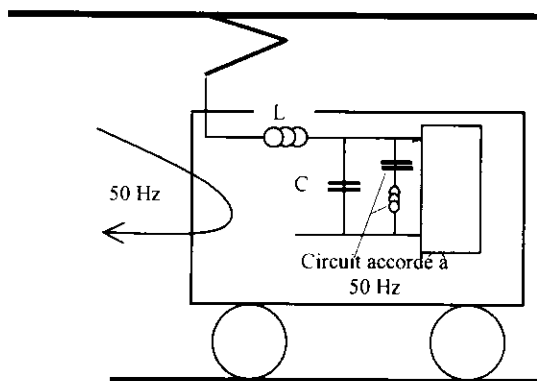
Un convertisseur statique du matériel remorqué ou d'une voiture Corail par exemple, dispose également d'un filtre d'entrée. (voir figure I-3)

L'impédance à 50Hz doit être au minimum, selon la fiche UIC 550 éditée en 1994, de 40Ω sur le réseau de la SNCF, et 80Ω pour accéder aux réseaux de la SNCB (Belgique) et des FS (Italie). L'exigence de la RENFE (réseau espagnol) pour l'impédance à 50Hz est de 300Ω .

L'impédance du filtre d'entrée à la fréquence f est donnée par la relation :

$$Z = L\omega - 1/C\omega$$

en négligeant la résistance de l'inductance du filtre L et celle du câblage, avec $\omega = 2\pi f$.

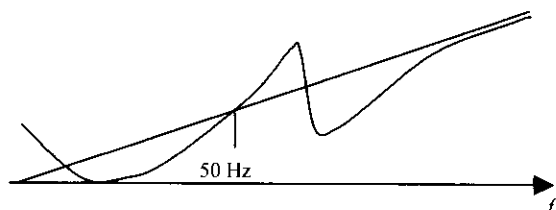


Rôle du filtre d'entrée vis à vis des courants "absorbés et générés"

Figure 1-3

L'intérêt de disposer un circuit accordé à 50Hz aux bornes de la capacité C du filtre principal est :

- d'augmenter sensiblement la valeur de l'impédance d'entrée à 50Hz ($Z_{50}=L\omega$);
- de piéger à l'intérieur de l'engin toutes composantes à 50Hz générées par les convertisseurs statiques de traction ou d'auxiliaire.



Evolution de l'impédance du filtre d'entrée d'une motrice TGV.

Figure 1-4

La figure 1-4 présente l'impédance d'entrée en fonction de la fréquence d'une motrice TGVR dans sa configuration 3000V SNCB.

La figure 1-5 représente pour la motrice TGVR une cartographie simplifiée des produits de modulation créés par le fonctionnement des hacheurs et des onduleurs de traction. Cette cartographie permet d'identifier les « rendez-vous » de fréquence attendus en alimentation à courant continu, en fonction de la vitesse du train. Les « fréquences attendues » sont les fréquences utilisées par les circuits de voie. La fréquence des hacheurs de

traction est de 300Hz. L'ondulation du courant imposé par l'onduleur et vue par le hacheur de traction f_0 représente 6 fois la fréquence statorique du moteur de traction (pour un « tour » de rotor il y a 6 commutations de l'onduleur). Cette fréquence statorique f_s de la machine est donnée en fonction de la vitesse du train V , par la relation suivante (avec un diamètre de roue de 920mm) :

$$f_s \text{ (Hz)} = V(\text{km/h}) \times 2/3$$

$$\text{ainsi : } f_0 = 6.f_s = 4.V(\text{km/h})$$

$$f_s = 200 \text{ Hz à } 300\text{km/h.}$$

la recherche des « rendez vous » de fréquence en fonction de la vitesse du train se fait en croisant les combinaisons $f_h \pm f_s$, $f_h \pm 6.f_s$, $f_h \pm 12.f_s$, et fréquences de fonctionnement des CdV :50 Hz ou celles de l'UM71 : 1700 , 2000, 2300, 2600Hz.

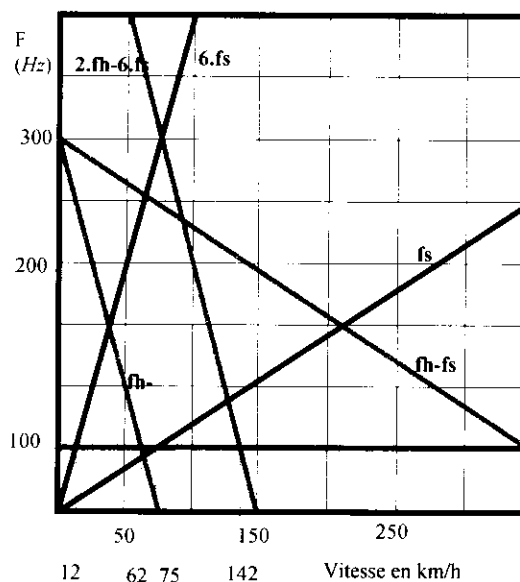


Figure 1-5

1-6-3-2 Engins monophasés 25kV 50Hz

Le courant de traction contient essentiellement des composantes harmoniques impaires du 50Hz. Il est important de ne pas créer de composantes paires. En effet, certaines fréquences (paires) sont utilisées par les CdV UM71 (1700, 2000, 2300, et 2600Hz). **Pour respecter cette exigence il faut absolument que le courant absorbé par le redresseur soit symétrique** : c'est à dire que le courant absorbé pendant l'alternance positive de la tension soit identique à celui absorbé pendant l'alternance négative. Pour respecter cette symétrie il faut :

- concevoir un circuit de puissance le plus symétrique possible (même nombre de semi-conducteurs dans chacun des bras du redresseur par exemple)
- concevoir une électronique de commande permettant de déclencher l'allumage des semi-conducteurs de puissance de chacun des bras, avec le même angle de commande par rapport au passage par 0 de l'onde de tension

- utiliser sur les cartes de commande si possible des composants sans offset ;
- utiliser la technique de « recopie d'angle » d'une alternance sur l'autre peut être intéressant ;
- utiliser un asservissement trop rapide ne permet pas toujours de garantir la symétrie suffisante ;
- vérifier périodiquement la stabilité des réglages.

Comme en alimentation à courant continu, il existe des produits de modulation créés par les convertisseurs de traction ou d'auxiliaires ainsi que par leurs asservissements. Dans le cas d'un pont à diode ou à thyristor, le redresseur est lui-même un modulateur fonctionnant à 50Hz. Les fréquences au secondaire du pont monophasé se retrouvent côté primaire, donc à la ligne, modulo 50Hz. Le PMCF, à GTO ou à IGBT, est un modulateur fonctionnant à la fréquence de découpage; ces fréquences de découpage étant de l'ordre de 350 à 450Hz selon les engins.

Exemple : une composante à 133Hz générée par les onduleurs de traction se retrouve côté ligne à 83Hz (133-50Hz) et à 183Hz (133+50Hz).

Il est également possible, comme en courant continu, de faire la cartographie des produits de modulation attendus et de prédire les « rendez-vous » entre les fréquences utilisées par les CdV et celles fonction de la vitesse du train.

2 Alimentation en l'énergie .

Les installations fixes de traction électrique (IFTE) se composent essentiellement :

- d'un ensemble de sous stations raccordées au réseau national, c'est notre cas en France ;
- du système de caténaire et de feeder assurant le transport d'énergie jusqu'aux engins de traction;
- du circuit de retour constitué des rails et d'un ensemble de conducteurs enterrés et aériens.

Le circuit électrique ainsi formé est également appelé : circuit de traction.

En France il existe principalement trois grands systèmes d'alimentation électrique :

- le 750V continu par troisième rail ;
- le 1500V continu ;
- et le 25000V monophasé 50Hz.

Le Métro parisien, la ligne de St Gervais à Vallorcine et la ligne de Villefranche de Conflent à la Tour de Carol par exemple, sont alimentés en 750V continu.

Pour des raisons historiques le 1500V couvre le Sud Ouest et le Sud Est de la France. Le 25kV 50Hz s'est développé dans les années 50 en Savoie. Il occupe le Nord et l'Est. Toutes les électrifications nouvelles sont en général réalisées en 25kV 50Hz. Pour des raisons liées à la puissance consommées par les trains le 25kV 50Hz est utilisé sur toutes les lignes à grande vitesse (LGV).

En alimentation à courant continu le raccordement au réseau s'effectue sur les lignes 63kV ou 90kV. La sous station, selon l'importance du trafic, est équipée d'un ou plusieurs groupes transformateur - redresseur d'une puissance de 6600kW.

En alimentation monophasé 25kV 50Hz le raccordement au réseau EDF est réalisé sur le 63 ou le 90kV, le 225kV ou exceptionnellement sur le 400kV. Les sous stations « TGV » sont en général constituées de deux transformateurs de 60MVA. Elles sont raccordées au réseau principal de EDF : 225kV ou 400kV.

Les tensions d'alimentation des réseaux européens voisins sont les suivantes :

- 15kV 16,66Hz : Allemagne, Suisse, Autriche ; cette fréquence spéciale impose un réseau de distribution monophasé spécifique à la tension de 110kV appartenant aux réseaux ferroviaires ;
- 25kV 50Hz : Luxembourg, Eurotunnel, Angleterre, ;
- 3000V continu : Belgique, Espagne, Italie ;
- 1500V continu : Hollande ;
- 750V continu par 3^{ème} rail : Angleterre (à la sortie du Tunnel sous la Manche).

En général les nouvelles électrifications sont réalisées en 25kV 50Hz.

2-1 Les objectifs :

- **tenter de consommer « propre »** en réduisant la génération de courants harmoniques parcourant le circuit de traction, et pouvant polluer le réseau national ; c'est aussi limiter les déformations de l'onde de tension à la caténaire ;
- **tenter de consommer avec un facteur de puissance λ proche de 1**, c'est capter au pantographe l'énergie active juste nécessaire à la traction du train, c'est aussi contribuer à réduire le dimensionnement des installations fixes de traction électrique ;
- **adapter la puissance de l'engin** à celle disponible à la caténaire en limitant principalement l'intensité absorbée au pantographe en fonction de l'itinéraire et de la tension caténaire ; c'est partager avec les autres trains circulant dans la même zone, la puissance offerte par les sous stations encadrantes.

2-2 Les moyens :

la **réduction des courants harmoniques** peut s'obtenir par :

- * filtrage au niveau des installations fixes ;
- * filtrage en embarqué ;
- * utilisation de convertisseurs de traction peu polluants ;

il est évident que l'installation de filtre au sol est beaucoup plus aisée qu'en embarqué.

Les perturbations électriques dans le domaine ferroviaire

L'amélioration du facteur de puissance au pantographe pour les engins monophasés est réalisable :

- * avec une compensation en embarqué en apportant des « kVAr » à l'aide du schéma de l'engin moteur, c'est le rôle d'un circuit d'amélioration du facteur de puissance « AFP » des matériels TGV par exemple ;
- * avec l'utilisation de convertisseurs de traction réglés pour consommer un courant à la caténaire en phase avec la tension, c'est le rôle des redresseurs à commutation forcée tel le PMCF.

L'adaptation à la puissance disponible à la caténaire :

elle se fait à l'aide du dispositif contrôle commande de l'engin. Pour les engins de forte puissance (TGV, locomotive) un réglage par un sélecteur de puissance permet un premier niveau d'adaptation de la puissance maximale appelée à la caténaire. Ce dispositif est à la disposition de l'agent de conduite. Pour les engins disposant d'un système de contrôle commande électronique un 2^{ème} niveau de réglage permet de limiter l'intensité appelée à la caténaire en fonction de la tension disponible : $I = f(U)$.

3 Télécommunications :

Les effets des courants électriques consommés par les engins moteurs se manifestent de 2 manières distinctes en fonction du domaine fréquentiel considéré :

dans le domaine basses fréquences, perturbation des lignes téléphoniques et des lignes de transmission de grande longueur, voisines de l'infrastructure ferroviaire ;
(domaine BF : $f < 5000$ Hz).

Au dessus de quelques kHz : perturbation électromagnétique de l'environnement voisin du domaine ferroviaire (domaine RF : $f > 10$ kHz → 1GHz)

3-1 Perturbation des lignes téléphoniques et de transmission .

Les lignes de transmission voisines du domaine ferroviaire peuvent être le siège de bruits électromagnétiques induits par les courants de traction circulant au travers du système d'alimentation depuis les sous stations, la caténaire, l'engin moteur, les rails et le sol. **La valeur limite du bruit induit sur les lignes de télécommunication est de 1mV** selon les recommandations de l'U.I.T. (Union Internationale des Télécommunications). La gêne est d'autant plus intense, que :

- le couplage M entre les deux systèmes est important,
- le spectre des courants est riche en composantes de fortes amplitudes.

Ces composantes sont d'autant plus importantes en alimentation à courant monophasé que les besoins

de l'exploitation demandent des engins de plus en plus puissants .

A noter que les systèmes de traction électrique sont les seuls qui ne soient pas, même en régime normal d'exploitation, symétriques par rapport à la terre. Ils utilisent comme conducteurs de retour, les rails, des liaisons équipotentielles câblées, et bien involontairement le sol. En France la législation admet cette exception, à charge pour les réseaux ferroviaires d'en réduire les effets sur les installations des riverains.

3-1-1 Le couplage dépend de :

- la topologie des 2 systèmes (câbles aériens, lignes enterrées, etc.) ;
- la distance de l'un par rapport à l'autre ;
- leur parallélisme;
- la nature du sol (sa résistivité : ρ) ;

un sol peu conducteur, comme en Bretagne, riche en granit, est très favorable à l'étalement et l'éloignement des courants de traction dans le sol. Un sol résistif favorise la mutuelle M. Les sols du Nord de la France composés de carbone, sont moins résistifs. Ils apportent une contribution très appréciable au respect par la SNCF des exigences de France-Télécom.

3-1-2 Le spectre du courant absorbé ou généré par l'engin moteur se caractérise par la grandeur appelée **Intensité Psophométrée : I_{ps}** (ou intensité pondérée). Cette grandeur représente la somme quadratique des composantes harmoniques du courant caténaire affectées de coefficients pondérateurs reflétant la bande passante de l'oreille humaine pour chacune de ces fréquences :

$$I_{ps} = [\sum(p_f \cdot I_f)^2]^{1/2}$$

I_f la valeur efficace de la composante de fréquence f et p_f le poids du coefficient de pondération à la fréquence f : la valeur maximale est légèrement supérieure à 1 entre 800 et 1200Hz.

Fondamental

Le courant psophométré "I_{ps}" constitue seulement un indicateur du caractère perturbateur d'un engin de traction. D'autres facteurs indépendants du matériel moteur, contribuent à la gêne pour le riverain victime.

3-1-3 Loi de sommation

Dans le cas de l'utilisation de plusieurs engins de traction dans un train, cas des TGV ou d'un UM de locomotives, l'intensité psophométrée du convoi est approximativement la somme arithmétique des intensités psophométrées de chacun des engins. Cela s'explique par la synchronisation du fonctionnement des équipements de puissance par le réseau d'alimentation, et donc de la création de composantes harmoniques synchrones jusque vers 600Hz, et se déphasant progressivement au delà.

Les perturbations électriques dans le domaine ferroviaire

Les principes de la mesure et de la sommation des intensités psophométrées ont été acceptés par le CENELEC dans le document EN 50121-3-1.

3-1-4 Réduction du trouble sur les lignes téléphoniques

Pour limiter les effets perturbateurs des courants de traction plusieurs solutions techniques côté réseau ferroviaire, sont envisageables. Les solutions utilisées côté "Télécoms" ne sont pas de notre compétence. Nous pouvons simplement citer :

- éloignement des lignes téléphoniques de l'infrastructure ferroviaire ;
- passage en câble enterré ;
- croisement de la ligne ferroviaire de manière perpendiculaire ;
- etc.

en alimentation à courant continu :

- favoriser le retour du courant de traction par les rails et des câbles enterrés ;
- filtrer des courants au niveau des sous stations afin de réduire l'amplitude des composantes dues au redressement ;

en alimentation 25kV 50Hz :

- favoriser le retour du courant de traction par les rails et des câbles enterrés ou aériens ;
- diminuer les longueurs de boucle caténaire - engin de traction - sol, c'est un des principes de l'alimentation 2x25 kV grâce à la répartition judicieuse des autotransformateurs : l'effet réducteur du système 2x25kV est de l'ordre de 4 par rapport au système d'alimentation classique ;
- diminuer l'agressivité des engins moteurs en réduisant la valeur de l'I_{ps} :
 en accroissant le facteur de puissance (c'est améliorer la consommation de l'engin par rapport à la puissance active nécessaire aux besoins) ;
 en tentant de ne pas générer des composantes harmoniques dans la bande sensible de l'oreille au voisinage de 800 à 1200Hz : c'est le rôle du Pont Monophasé à Commutation Forcé (PMCF).

3-1-5 Ips_o mesurée de quelques engins moteurs (alimentation 25kV 50Hz), tableau ci-dessous.

Les valeurs de l'intensité psophométrée indiquées dans ce tableau sont les valeurs maximales observées pendant la période de mesure, dans les conditions de montée en vitesse à effort maximal.

Intensités Psophométrées mesurées sur les matériels récents

| Mat. | Puiss kW | schéma du conv. d'entrée | I ligne A | Vit. km/h | Ips _o max A |
|-----------|-------------|--------------------------------|--------------|--------------|------------------------------|
| Z 6400 | 2400 | PM | 94 | | 7,2 |
| Z | 2800 | PC + | Tractio | v<10 | 4,5 |

| | | | | | |
|-------------|----------------------|--|-------------------|------------------|--------------------------------------|
| 8800 Z | | filtre | n 105 | 0 | |
| 20500 | | | | | |
| Z9500 | 1400 | PM | 75 | | 4,5 |
| TGV PSE | 2500 5000 6400 | PM avec prise au niveau du transfo. | 160 360 500 | | 1/3 : 17,5 2/3 : 13,8 3/3 : 35 |
| TGV A | 8000 | 2 PM série + AFP réglage de puiss. | 240 380 | 90 300 | 15 12 |
| TGV R | 8800 | 2 PM série + AFP réglage de puiss. | 400 | 300 | 12 |
| BB 15000 | 4400 | 2 PC + PM | 180 260 120 | 30 60 130 | 17 14 6 |
| BB 25200 | 4000 | PD | 280 | 120 | 9,5 |
| BB 22200 | 4400 | PM + filtre | 140 290 240 | 30 130 160 | 4,5 9 8 |
| BB 26000 | 5600 | PM + filtre réglage de puiss. | 330 | 90 | 10 |
| BB 36000 | 5600 | PMCF | 265 | 80 | 1,2 |

Légende :

AFP : Circuit d'Amélioration du Facteur de Puissance

filtre : filtre « LC » (contrôle en tension U_{filtre} = cte)

PM : pont mixte thyristor et diode

PC : pont complet thyristor

PMCF : Pont Monophasé à Commutation Forcée (4 Quadrants ou 4QS)

3-2 Perturbations électromagnétiques.

3-2-1 Sources d'émission.

Le matériel roulant intégré dans le système ferroviaire peut créer dans son environnement proche des perturbations éventuellement gênantes pour d'autres sous systèmes du monde ferroviaire, mais aussi pour des riverains proches de l'infrastructure du chemin de fer. Ces perturbations sont des émissions rayonnées liées aux dimensions et aux structures des installations fixes de traction électriques, au fonctionnement des engins moteurs, aux vitesses de service, et à la qualité de l'ouvrage ferroviaire dans son ensemble.

L'expérience actuelle montre que les émissions perturbatrices sont essentiellement de deux types :

- émission en basse fréquence (BF) dans la gamme des grandes ondes ;
- émission en haute fréquence ayant l'allure d'un bruit large bande.

Dans le cas des émissions BF la composante H du champ électromagnétique rayonné est en relation avec les courants circulant dans le circuit de traction. La caténaire qui véhicule ces courants, joue le rôle d'une antenne de grande longueur. Sa fréquence propre est de l'ordre de 100 à 300kHz : c'est le domaine des grandes ondes (GO). La perturbation émise peut gêner la réception des émissions radiophoniques telles que France Inter (162kHz), Europe 1 (184kHz), RTL (234kHz) etc. Le champ électromagnétique rayonné par la caténaire peut gêner les riverains bien avant que le train soit à proximité du récepteur perturbé.

Dans le cas des émissions HF c'est le contact glissant pantographe-caténaire qui est la source d'émission. Ce sont les arcs électriques, sièges de dv/dt , générés par les défauts de captage qui rayonnent un champ électromagnétique dans la bande 10 à 300MHz environ. La perturbation est locale. Les émissions liées au captage sont du type « large bande ». Elle s'atténue rapidement avec la distance.

Les régimes transitoires, comme la mise en contact du pantographe sur la caténaire, la fermeture du disjoncteur sont aussi des sources de perturbations. Le niveau d'émission est d'autant plus élevé que la tension caténaire est importante ; en effet ce type de phénomène est plus à craindre en alimentation 25kV 50Hz qu'en 1500V continu. La durée du phénomène perturbateur est de l'ordre de quelques millisecondes. Son caractère impulsionnel n'a pas permis, pour le moment, de normaliser au niveau européen la méthode de mesure.

Les fréquences caractéristiques rayonnées ou conduites par ces transitoires sont imposées par :

- la caténaire (100 à 300kHz) ;
- la ligne de toiture de l'engin moteur (20 à 60MHz) ;
- la structure de caisse, et ces dimensions (1 à 10MHz).

Ordre de grandeur des différents composants HF, figure III-7 :

- caténaire : inductance = 1mH.km, capacité par rapport au sol = 10nF.km ;
- ligne de toiture : inductance = 10μH, capacité apportée par les isolateurs = 150pF (10 à 20 pF/isolateur environ), la traversée de toiture (cas des machines 25kV) 400pF ;
- structure de caisse : quelques μH, quelques pF (5μH et 120pF pour une structure de motrice TGV ; il n'existe pas de modélisation de la structure de caisse actuellement) ;
- contact roue-rail : inductance de connexion quelques 10μH, capacité de contact inférieure à quelques 1pF.
- le dv/dt à la fermeture d'un disjoncteur à ampoule sous vide est de l'ordre de 4000V/ns

3-2-2 les tests du matériel roulant

L'objectif est de mesurer l'intensité des émissions électromagnétiques rayonnées par le « mobile ferroviaire » intégré dans son environnement, en condition opérationnelle, et de le qualifier par rapport aux valeurs limites définies dans la norme européenne EN 50121-2 qui définit aussi la méthode de mesure. Celle-ci consiste à capter le signal émis par la source mobile grâce à une antenne implantée à 10m de la voie, à une hauteur de 1m.ou 3m Le signal est transmis à un récepteur qui permet d'étudier simultanément les représentations temporelle et fréquentielle. Les mesures sont effectuées dans deux domaines fréquentiels complémentaires :

- de 9kHz à 30MHz pour le champ H ;
- et de 30MHz à 1GHz pour le champ E.

Pour couvrir toutes les plages de fréquences, en fonction de la nature du champ mesuré, magnétique ou électrique, on utilise plusieurs modèles d'antenne :

- antenne cadre (9kHz-30MHz) pour la mesure du champ H ;
- antenne biconique (30MHz-300MHz), pour la mesure du champ E ;
- antenne log-périodique (300MHz-1GHz), pour la mesure du champ E.

4- Protection du matériel roulant

4-1 Sources de perturbation

L'environnement est agressif ! Certaines sources de perturbations sont externes au domaine ferroviaire, elles sont situées aux abords de la voie comme les émetteurs de puissance, les radars d'aéroport, la foudre.... Elles sont aussi à bord du matériel roulant : ce sont les commutations des semi-conducteurs de puissance, les di/dt des bobines du relaiage ou des électrovalves, les téléphones portables des clients voire également des agents du service commercial, etc.

Ces sources d'émission se couplent aux équipements électroniques embarqués selon deux modes d'agression :

- agression conduite sur les câbles et les liaisons entre équipements
- agression en rayonnement direct sur l'enveloppe des équipements et sur les liaisons entre équipements.

L'expérience actuelle montre que **les perturbations conduites sont les plus importantes sur nos matériels**. En effet la structure des matériels roulants est encore métallique ! Cette structure apporte une « faradisation » et atténue sensiblement les agressions en rayonnement provenant des sources externes. A titre d'exemple la structure de caisse d'une remorque TGV atténue d'environ 30dB le niveau d'émission à 1,3MHz : la

composante mesurée H, du champ électromagnétique rayonné par l'émetteur de Camphin près de Lille, situé au pk188 de la LGV Nord, est d'environ 90dB μ A/m au bord de la voie, elle n'est plus que de 60dB μ A/m à l'intérieur de la rame.

Les perturbations conduites par les câbles sont produites par des ouvertures de circuits inductifs sur le réseau batterie (BT), par les dv/dt sur les circuits haute tension (HT ou puissance) des semi-conducteurs des convertisseurs statiques de traction ou des auxiliaires. Elles sont également induites par le fonctionnement des alimentations à découpage, et des générateurs d'impulsions par exemple.

Les agressions créées par les circuits BT se propagent en mode différentiel, le long des câbles B+ et B-. Mais elles peuvent se coupler à d'autres liaisons sensibles, telles les liaisons capteurs, ou les liaisons « signaux » entre équipements. La perturbation se propage dans ce cas en mode commun.

4-1-1 Les agressions types

Il existe sur le réseau batterie de nos matériels de nombreuses charges inductives : électrovalves, relais, contacteurs, etc. l'ouverture de ces circuits crée des rafales de transitoires. Ces di/dt se traduisent par des surtensions aux bornes des contacts, une injection de transitoires dans les circuits d'alimentation, et une émission d'un champ électromagnétique de courte durée et rapidement atténué avec la distance. Ces perturbations haute fréquence affectent en général les circuits numériques mal conçus.

La durée du phénomène est de l'ordre de la milliseconde L'amplitude de ces signaux parasites est de l'ordre de 800 à 1500V. Le temps de montée est inférieur à la microseconde. Le spectre de ce type de perturbation est très large .

En supposant que l'inductance de la bobine est de 1H, le courant qui la traverse de 50mA, et la capacité entre contact de l'ordre de 100pF, on peut alors estimer la surtension créée à l'ouverture du contact. L'énergie piégée dans la bobine ($1/2LI^2$) va se transférer dans la capacité ($1/2CV^2$). Ainsi $V = I\sqrt{L/C}$.

L'application numérique donne $V = 50 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{1/100 \cdot 10^{-12}} \Rightarrow V = 5kV$ (c'est une manière très simplifiée de voir le phénomène).

4-2 Protection des équipements embarqués.

La CEM se conçoit à la conception des équipements

4-2-1 Règles de conception

règles de câblage :

- réduire l'impédance de la référence de potentiel : mailler le 0V ;

- réduire l'impédance des mises à la masse : tresses, liaisons courtes,

la masse est la terre à bord

c'est une très bonne référence de potentiel ;

- réduire la surface des boucles ;
- blinder les liaisons sensibles en faisant attention aux reprises de blindage ;
- disposer des écrans si nécessaire : transfo. d'impulsion ;
- filtrer : couple capacité inductance ou résistance capacité « RC » ;
- écrêter : parafoudre sur les circuits HT, diode de « roue libre » ou Transil, ou circuit « RC » sur certaines bobines de relais ou électrovalves ;
- séparer les circuits, câbles ou liaisons conduisant des signaux de nature différente ;

règles d'installation :

- réserver des « zones propres » (filtrées , dépolluées) ne pas faire entrer de câble non filtré dans ces « zones propres » ;
- regrouper dans une même zone les composants à fort di/dt ;
- disposer les filtres le plus près possible des entrées ou sorties ;
- faire passer les liaisons sensibles près de la masse ou du châssis ;
- prendre garde des connexions sur de la peinture... ;
- utiliser des tresses pour les mises à la masse ;
- veiller aux reprises de blindage, elles doivent être circulaires ;

limitation des émissions

- disposer des filtres ou des écrêteurs en sortie des équipements polluants
- écouler les signaux parasites à la masse par des liaisons les plus courtes possibles
- réduire les surfaces de boucle

4-2-2 Protection des équipements électroniques embarqués.

Les électroniques de commande des semi-conducteurs de puissance doivent être particulièrement protégées des agressions dues aux commutations en dv/dt de plus en plus élevées des composants de puissance.

La mise en œuvre des thyristors conduit à des dv/dt de l'ordre de 1kV/ μ s. Dans le cas des GTO les dv/dt atteignent plutôt 10kV/ μ s. Avec les IGBT la vitesse de commutation est encore 10 fois plus élevée, elle peut être de l'ordre de 100kV/ μ s. La capacité présentée par un IGBT de 3300V et 1200A, entre l'ensemble des pastilles de silicium et la semelle est voisine de quelques nF.

Remarque : une commutation de 10kV/ μ s sur une capacité « parasite » de 1nF crée un courant de 10A au travers de cette capacité (rappel : $i = C \cdot dv/dt$).

Ce courant parasite ainsi créé trouvera un chemin pour revenir à l'endroit où il a pris naissance.

Il faut donc absolument lui imposer « le bon chemin » plutôt que de le laisser vagabonder là où il pourrait perturber des équipements sensibles.

4-2-3 Les tests

La norme européenne EN 50 121-3-2 préconise un ensemble de tests permettant de vérifier l'immunité des équipements par rapport à des niveaux d'agression et des signaux parasites susceptibles d'être rencontrés à bord de nos matériels. Les procédures d'essais sont définies par les recommandations de la CEI et reprises sous formes de normes NF EN de la famille 61000-4 (ex CEI 801)

Ces essais permettent d'évaluer le niveau d'immunité des équipements constitutifs du matériel, sans toute fois perdre de vue qu'il n'existe pas de corrélation entre les performances d'un matériel complet et celles des équipements pris séparément.

Essais d'immunité

■ **immunité aux décharges électrostatiques (DES) (CEI 61000-4-2)**: cet essai est peut représentatif des conditions réelles: il se pratique sur des équipements susceptibles d'être en contact avec le personnel de bord ou les voyageurs.

■ **Immunité aux transitoires rapides en salves (CEI 61000-4-4)**: cet essai permet d'étudier l'effet des surtensions créées par l'ouverture de circuits inductifs, les rebonds de contacts d'un relais. Le niveau de tension exigé dans le domaine ferroviaire est de 2kV; ce qui correspond au niveau 3 de la norme pour les alimentations et au niveau 4 pour les Entrées Sorties (E/S) des lignes commande - contrôle. (Ce test et cette valeur ont été reconnus par l'ensemble de la profession ferroviaire).

■ **Immunité aux surtensions (CEI 61000-4-5)**: cet essai permet de soumettre un équipement à des transitoires de commutation. Le générateur utilisé dispose d'un générateur de tension commuté automatiquement en générateur de courant au déclenchement du dispositif de protection de l'équipement testé. Le niveau du test est également de 2kV avec un couplage capacitif entre fils d'alimentation et la masse. Il est de 1kV lorsque l'injection est réalisée en mode différentiel entre les deux fils d'alimentation.

■ **Immunité aux rayonnements (CEI 61000-4-3 et CEI 61000-4-6)** La vérification de l'immunité aux rayonnements électromagnétiques est réalisée avec 2 tests complémentaires :

- le premier essai consiste à soumettre l'équipement à un rayonnement électromagnétique entre 80MHz et 1GHz (CEI 61000-4-3) les niveaux de test recommandés sont :

⇒ 10V/m lorsque l'équipement est situé à l'extérieur de la structure de caisse ou en cabine de conduite, (zone faiblement faradisée) ;

⇒ 3V/m est suffisant dans les autres cas (zone protégée par une structure métallique) ;

- le second consiste à injecter un courant HF résultant du couplage entre une onde incidente et le câblage relié à cet équipement. La fréquence du courant injecté est comprise entre 150kHz et 80MHz (CEI 61000-4-6). le niveau de test est de 3Veff.

5- Les Normes du domaine ferroviaire .

Les normes sont des outils indispensables à l'ingénieur pour spécifier et concevoir les équipements du matériel roulant. Elles précisent et fixent les exigences à respecter en matière de compatibilité électromagnétique entre les différents sous systèmes de l'ouvrage ferroviaire. Elles précisent également les valeurs limites en émission à respecter par le « monde ferroviaire » vis à vis de ses riverains industriels, commerciaux et publics. Ces normes contribuent au dimensionnement des équipements et définissent les contraintes fonctionnelles, les niveaux en émission et en immunité. Elles définissent également les tests et les méthodes de mesures qui permettent de vérifier le respect des valeurs limites.

Les principales normes européennes actuellement en application (EN) ou en projet (prEN) permettent aux opérateurs ferroviaires de spécifier leurs exigences avec un langage commun et précis. Elles donnent aux industriels européens l'opportunité de concevoir et de construire des matériels selon un référentiel reconnu par toute la communauté. Il est clair que le respect des exigences normatives permet aux opérateurs ferroviaires de faire circuler leurs trains respectifs sans craindre de dysfonctionnement sur l'infrastructure du réseau voisin. Il est désormais plus aisé d'élaborer et de mettre en œuvre les Spécifications Techniques d'Interopérabilité (STI) des Trains à Grande Vitesse en Europe en utilisant ce référentiel normatif.

BIBLIOGRAPHIE

Compatibilité électromagnétique, bruits et perturbations radioélectriques ; Sous la direction de P. Degauque et J. Hamelin, édition Dunod.

Performances en matière de compatibilité électromagnétique des systèmes de conversion statique utilisés dans le transport ferroviaire ; François Maumy, Alstom, Revue Générale de l'électricité Novembre 1991.

Perturbations électriques générées par la traction.

Identification et actions ; Victor Sabaté, Alstom, Revue technique GEC Alstom N°5 1991.

Traction électrique ferroviaire Techniques de l'Ingénieur (TI) chapitre 2 ; C. Courtois, F. Lacôte, M. Provoost, V. Sabaté. (1999)

LA BB 36000

LA LOCOMOTIVE "PASSE FRONTIERES"

Alain JEUNESSE

SNCF Division Electronique,

Direction du Matériel et de la Traction

Marc DEBRUYNE

Alstom Transport

Résumé

La locomotive BB 36000 conçue par Alstom sur un cahier des charges de la SNCF possède une motorisation asynchrone. Capable de circuler sur divers réseaux européens elle est adaptée au trafic international en respectant les nouvelles normes européennes en matière de compatibilité électromagnétique (CEM) ainsi que les dernières restrictions en matière de fluides caloporteurs.

Conçue pour offrir les mêmes performances sous différentes tensions, elle respecte les impositions des réseaux en matière de facteur de puissance et de courant perturbateur équivalent ; elle est équipée d'un freinage électrique à récupération d'énergie.

La fiabilité est accrue par l'intégration moto-réducteur au niveau de la traction par quatre moteurs asynchrones. Le refroidissement à eau permet de respecter les contraintes de l'environnement.

Principes retenus pour la conception de la machine.

La mise en oeuvre des « corridors fret », souhaitée par la communauté européenne et conduite par les réseaux ferroviaires, impose la définition d'engins moteurs capables de franchir les frontières des états qui correspondent souvent également aux frontières des systèmes d'alimentation électrique de traction. Un des axes fret, qui intéresse particulièrement la SNCF, relie MUIZEN proche d'ANVERS, en Belgique, et SIBELIN près de LYON. Cet axe passe par BETTEMBOURG au Luxembourg. Il a des prolongements vers TURIN et MILAN via MODANE dans les Alpes.

Pour accomplir ce service international, ces machines « passe frontières » doivent être conçues pour fonctionner sous les diverses tensions d'alimentation du réseau national d'une part, 25 kV 50 Hz monophasé, et 1500 V continu, et d'autre part sur les réseaux 3000 V continu de nos voisins belges, et italiens. Il serait également souhaitable que certaines variantes puissent fonctionner sous l'alimentation 15 kV 16 2/3 Hz monophasé des réseaux allemand et suisse.

L'objectif économique recherché est bien sûr de disposer d'une machine ayant une forte productivité qui se caractérise essentiellement par :

- la traction de fortes charges, de l'ordre de 1100t jusqu'à 1800t ;
- une vitesse commerciale élevée (100 km/h pour les trains lourds, 120,140 voire 160km/h pour certains trains de transport combiné par exemple) ;
- la suppression des temps d'immobilisation prolongée aux frontières à des fins d'échange de machine liés aux différences de système d'alimentation électrique et aux échanges de personnel de conduite ;
- et des temps d'immobilisation liés aux nécessités de maintenance corrective ou préventive.

L'exigence des opérateurs ferroviaires est donc de disposer de locomotives capables de tracter leur train de bout en bout sans arrêts aux frontières. Elle se traduit par une spécification technique de besoin qui conduit à une locomotive multitenion européenne de forte puissance, ayant des caractéristiques de traction identiques sous les diverses tensions d'alimentation.

La locomotive BB 36000 constitue une réponse aux attentes d'une part, de l'exploitant (SNCF), qui souhaite disposer d'une machine apte au trafic

international, et d'autre part, à celui du constructeur (Alstom) qui complète ainsi son " catalogue " à l'exportation avec une locomotive à moteurs asynchrones. Cette nouvelle locomotive est un prolongement naturel de la locomotive BB 26000 équipée de moteurs synchrones autopilotés. Ces deux machines présentent le caractère d'universalité de service ; elles sont aptes toutes les deux à tracter aussi bien un train de voyageurs rapide qu'un train de marchandises lourd. Leur définition correspond à une puissance à la jante de 5,6 MW et un effort au démarrage de 320 kN. Ces performances leurs confèrent les aptitudes aux services suivants (figure n°1):

- remorque d'un train de voyageur de 16 voitures à 200 km/h en rampe de 2,5 ‰
- remorque d'un train de marchandise de 2050 t à 80 km/h en rampe de 8,8 ‰

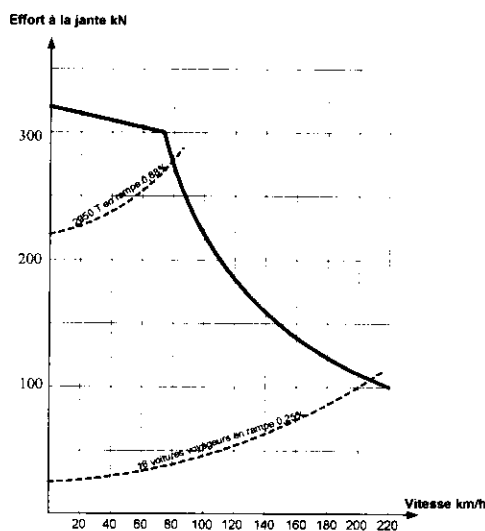


Figure n°1 : Caractéristique Effort -Vitesse

Pour la conception de cet engin de traction " passe frontières " exigé par le développement du trafic marchandises " fret ", et par l'ouverture des réseaux à de nouveaux opérateurs, la SNCF et le constructeur Alstom ont fortement souhaité que la définition de la locomotive BB 36000 évolue et porte également sur les aspects liés au respect de l'environnement ferroviaire et public.

Les nouveaux besoins des Clients

Exigences en matière de Compatibilité Électromagnétique (CEM).

L'admission sur les réseaux étrangers comme sur le réseau français, nécessite de respecter les exigences en matière de compatibilité électromagnétique (CEM) des nouvelles normes européennes de la famille des EN 50 121.

Ces exigences imposent de limiter les émissions électromagnétiques pour ne pas perturber la réception des émissions de radio et de télévision de nos riverains. Elles imposent aussi de protéger

également les équipements électroniques embarqués vis à vis des agressions internes dues au fonctionnement des convertisseurs de forte puissance, mais aussi des agressions externes dues aux émetteurs de radiodiffusion, aux téléphones portables, etc. .

Compatibilité avec les réseaux téléphoniques.

Les exigences d'accès aux réseaux ferrés imposent également aux engins moteurs de limiter le niveau des courants perturbateurs susceptibles de parasiter les liaisons téléphoniques entre les centraux et les abonnés. Cette exigence est caractérisée par le niveau de courant psophométré : I_{pso}. Cette grandeur est définie par l'UIT (Union Internationale de Télécommunications) comme une somme quadratique des composantes harmoniques du courant appelé à la caténaire affectées de coefficients pondérateurs traduisant leur influence sur l'oreille humaine. Elle se définit comme suit :

$$I_{pso} = [\sum (p_f * I_h)^2]^{1/2}$$

avec,

I_h : valeur efficace de l'harmonique de courant à la fréquence f (f < 5kHz)

p_f : poids attribué à la fréquence f ; la valeur de p_f est maximale et proche de 1 entre 800 et 1200 Hz.

Cette grandeur I_{pso} est communément appelée Intensité perturbatrice équivalente : IPE.

L'objectif fixé au constructeur pour la BB 36000 est de réduire par 5 environ le niveau d'émission d'une locomotive classique telle que la BB 26000 dont la valeur maximale est de l'ordre de 10 A sous alimentation 25 kV 50 Hz.

Économie d'énergie, compatibilité entre les installations fixes de traction électriques et l'engin moteur.

La compatibilité entre l'engin moteur et les alimentations monophasées de traction électrique demande :

- de réduire la consommation d'énergie réactive ; ainsi le facteur de puissance λ de l'engin moteur doit être maintenu proche de l'unité ;
- de limiter la production de courants harmoniques à la caténaire susceptibles de perturber nos matériels roulants d'une part, et d'autre part les installations de nos riverains au travers du fournisseur d'énergie (EDF en France).

Pour respecter ces exigences le constructeur a mis en œuvre un convertisseur d'entrée fonctionnant en commutation forcée capable de contrôler l'énergie réactive consommée. Ce convertisseur est appelé PMCF : pont monophasé à commutation forcée. C'est un convertisseur totalement réversible ; il permet le freinage par récupération d'énergie.

Respect de l'environnement

Les engins de puissance récents utilisent le Fréon comme fluide caloporteur pour évacuer les pertes des semi-conducteurs de puissance. L'utilisation de ce produit est aujourd'hui limitée par la convention de Montréal. Cette nouvelle locomotive met en œuvre une technologie de refroidissement des semi-conducteurs de puissance utilisant tout simplement l'eau.

Disponibilité opérationnelle et maintenance

Un des soucis majeurs de l'exploitant est d'assurer la régularité de son trafic et d'offrir à ses clients une qualité de service tout en intégrant les inévitables défaillances du matériel de traction. Pour un service fret, la SNCF a fixé comme objectif une réduction maximale de 25% des performances de traction sur panne simple d'un équipement.

Un des autres besoins de l'opérateur est de réduire ses coûts de maintenance en limitant les temps d'immobilisation des engins pour dépannage et réparation.

La solution proposée par le constructeur est basée sur un ensemble de convertisseurs reconfigurables en cas de défaillance de l'un d'entre eux, et sur l'emploi de structures modulaires relativement légères aisément démontables et réparables. L'équipement électronique de la locomotive doit offrir également aux dépanneurs une aide au diagnostic intégrée permettant d'identifier l'unité déposable défaillante.

Le schéma de puissance.

Le choix du schéma de puissance a été guidé par le cahier des charges fonctionnel de la SNCF qui avait formulé le souhait d'avoir une locomotive universelle européenne possédant entre autres les atouts suivants :

- pouvoir réaliser les mêmes performances sous diverses tensions d'alimentation utilisées en Europe, c'est à dire garder la même courbe effort-vitesse en 25kV-50Hz, 3000V CC et 1500V CC ;
- respecter les impositions des réseaux en matière de facteur de puissance et de courant perturbateur équivalent (IPE) ;
- être pourvue d'un freinage électrique à récupération et rhéostatique ;
- avoir une disponibilité en service améliorée par rapport à la BB 26000 (version bi-tension à bogies monomoteurs équipée de chaînes de traction synchrone).

Le respect de la spécification a conduit à adopter un schéma de puissance divisé en 4 convertisseurs d'entrée et 4 onduleurs moteurs susceptibles d'être isolés un par un en cas de défaillance, ce qui assure une disponibilité de service optimale.

Les convertisseurs d'entrée.

Alimentation monophasée

Sous alimentation monophasée 25kV-50Hz un transformateur à 4 enroulements secondaires abaisse la tension à 1450V à l'entrée de chacun des 4 ponts monophasés à commutation forcée (PMCF) à GTO qui ont leurs sorties toutes connectées en parallèle pour constituer un bus commun de tension continue 2750V.

Le PMCF, redresseur à modulation de largeur d'impulsion, a plusieurs fonctions :

- délivrer une tension continue en sortie
- maintenir le facteur de puissance proche de l'unité
- diminuer les courants harmoniques renvoyés en ligne (pollution du réseau et réduction de l'IPE).

Le filtrage du courant secondaire du transformateur est assurée par la self de fuite de ce dernier choisie volontairement importante pour minimiser les courants perturbateurs (IPE). C'est la raison pour laquelle la tension de court-circuit primaire-secondaire est de 37% alors qu'avec un redresseur d'entrée à commutation naturelle (pont mixte à thyristors par exemple) la tension de court-circuit est communément prise à environ 15%.

Côté sortie, la tension redressée de 2750V est filtrée par des condensateurs et un circuit LC série accordé au double de la fréquence réseau destiné à réduire à quelques pour-cents l'ondulation 100Hz sur le bus commun. Ceci évite d'exciter la transmission mécanique par des battements entre le bus et l'onduleur quand ce dernier fonctionne à une fréquence proche de 100Hz.

Pour améliorer le facteur de forme du courant ligne, le PMCF utilise la technique de découpage MLI (modulation de largeur d'impulsion) et l'entrelacement, cette méthode permet de repousser en fréquence les premiers harmoniques de courant. Avec 4 PMCF décalés et une fréquence de commutation des GTO de 300Hz, les premiers harmoniques réguliers se situent autour de 2400 Hz, ceci permet de respecter le niveau d'IPE de 2A.

L'équilibrage des courants secondaires des 4 PMCF est assuré par 4 boucles de régulation de courant recevant une consigne unique émise par le régulateur de tension continue qui, lui n'est réalisé qu'une seule fois par le PMCF maître.

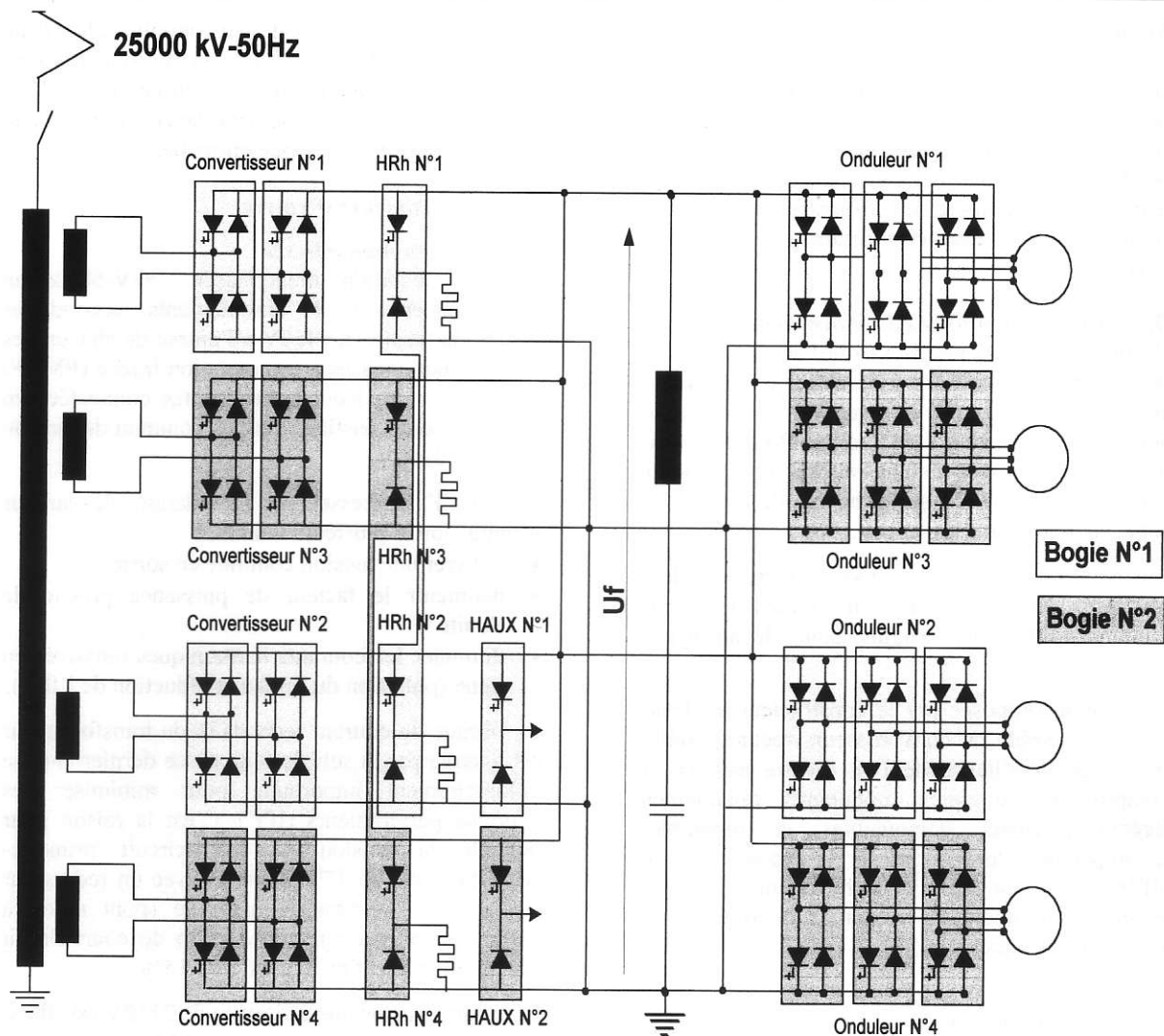


Schéma N°1 : Configuration sous caténaire 25 kV- 50 Hz

Alimentation sous tension continue

Sous tension continue, les convertisseurs d'entrée sont reconfigurés en hacheur élévateur sous 1500V, en hacheur abaisseur type série-parallèle (HSP) sous 3000V.

Un filtre d'entrée lui aussi reconfigurable limite les harmoniques renvoyés au réseau. Il est constitué d'un circuit LC avec un filtre court-circuiteur 50Hz connecté en parallèle sur le condensateur. Ce filtre atténue le 50 Hz produit par les onduleurs moteurs et permet ainsi de respecter les gabarits de courant imposés par les circuits de signalisation 50Hz.

Fonctionnement en 3000V

En 3000V l'énergie transite par 4 convertisseurs qui régulent deux bus indépendants Uf1 et Uf2 réglés à 2750V tant que la tension caténaire reste supérieure à 3000V, au dessous de 3000V la tension bus est réduite, le courant ligne est limité.

On constitue ainsi un convertisseur global HSP à 4 cellules en parallèle. Les GTO des modules commutent tous à 300Hz. Dans un même bras ils sont complémentaires, dans un même convertisseur ils sont calés à 180°.

Les convertisseurs 1 et 4 sont en phase, 2 et 3 calés à 90° par rapport à 1,4, ce déphasage réduit les harmoniques courants coté ligne en quadruplant la fréquence de commutation de base de 300Hz en fonctionnement normal, ce déphasage est maintenu quelque soit le nombre de convertisseurs en service. En cas d'isolement d'un convertisseur par exemple on retrouve des harmoniques de courant 600Hz coté réseau au lieu de 1200Hz.

La régulation de chaque bus est indépendante, le convertisseur maître supérieur, N°1 par exemple régule le bus Uf2, et inversement le convertisseur maître inférieur, N°2 par exemple régule Uf1. Une boucle de courant interne équilibre les courants entre les deux convertisseurs connectés en parallèle sur le même bus de tension

En régime équilibré traction les convertisseurs supérieurs fonctionnent en hacheur abaisseur dit « série » avec Uf1 en entrée, Uf2-Uf1 en sortie tandis que les convertisseurs inférieurs fonctionnent en hacheur élévateur dit « parallèle » avec cette tension Uf2-Uf1 en entrée et Uf2 en sortie d'où le nom de hacheur série-parallèle.

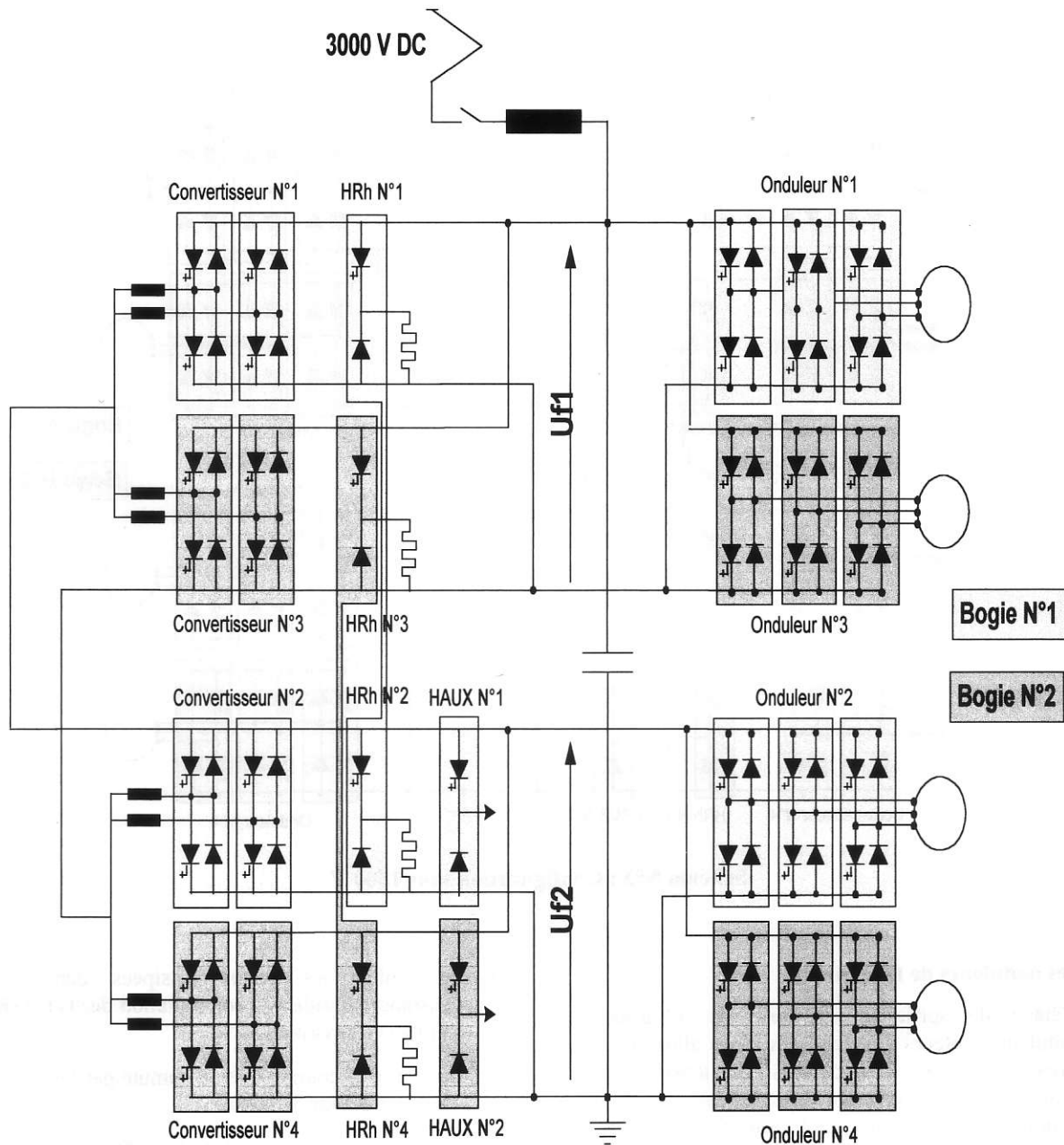


Schéma N°2 : Configuration sous 3000 V

Fonctionnement en 1500V

Sous 1500V, le schéma de puissance subit un léger changement par rapport au HSP dans la connexion des points communs des 4 selfs.

Les convertisseurs fonctionnent tous en hacheur élévateur et maintiennent les bus à 2750V. Comme en HSP les convertisseurs sont décalés avec les mêmes déphasages, soit 1 et 4 en phase, 2 et 3 déphasés de 90° par rapport à 1,4, la fréquence de

commutation des GTO est toujours de 300Hz. Les principes de régulation sont similaires, un convertisseur maître régule la tension de son bus continu, une boucle de courant interne équilibre les courants dans les deux convertisseurs connectés en parallèle coté bus

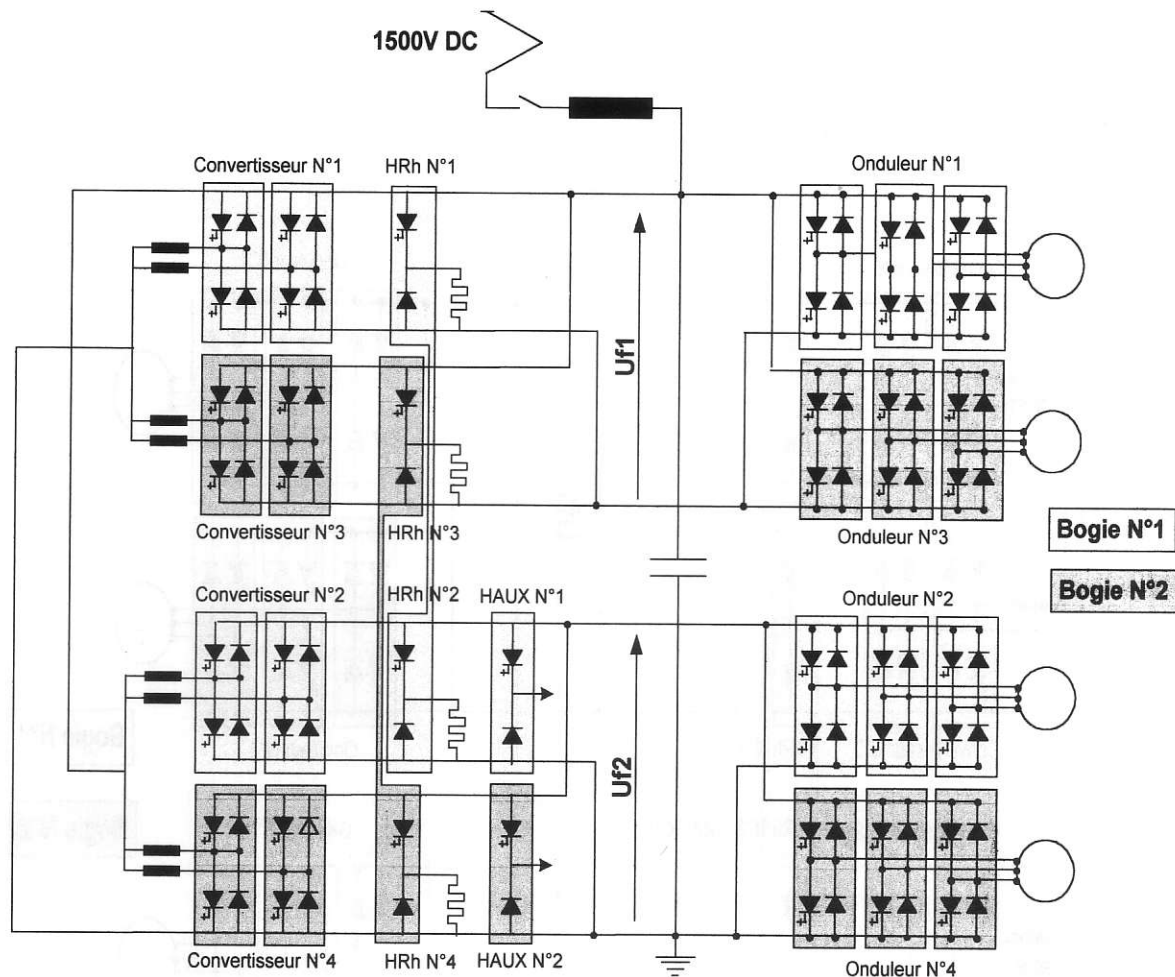


Schéma N°3 : Configuration sous 1500 V

Les onduleurs de traction

L'étage de sortie se compose de 4 groupes onduleurs moteurs indépendants. Sous alimentation monophasée les 4 onduleurs de tension sont connectés au bus commun unique, dans le cas de l'alimentation continue, 1500v ou 3000V, il y a 2 onduleurs en parallèle sur chacun des deux bus continus Uf1 et Uf2.

Les onduleurs peuvent fonctionner sous une tension bus d'entrée variable de 1500V à 2750V, valeur nominale. En régime nominal pleine onde la tension entre phases moteur atteint 2070V. A vitesse maximum 220kmh la fréquence stator est à 140Hz. Pour faire varier tension et fréquence dans tout le plan effort vitesse de la locomotive les onduleurs utilisent la technique de modulation de largeur d'impulsions (MLI). La stratégie de modulation a été choisie pour répondre aux spécifications de performance demandée et respecter les limites du matériel, notamment des modules à GTO.

Dans les limites ou choix que l'on s'est fixé on peut citer principalement :

- de limiter les pertes dissipées dans les résistances d'aide à la commutation des GTO (R snubber) à environ 8,5kW ;
- de limiter le courant crête commuté par les GTO onduleur autour de 2400A
- de minimiser les pertes dans les GTO
- de réduire les couples pulsatoires par élimination de certains harmoniques de tension

Les instants de changement de modes de modulation sont choisis pour respecter à tout instant le courant crête commutable par les GTO et la température de jonction des semi-conducteurs directement liée aux pertes par conduction et commutation qui peuvent atteindre 1400W/GTO

Le freinage électrique

Sous caténaire monophasée le freinage dynamique normal est du type à récupération d'énergie. En cas de perte de la tension caténaire les équipements basculent automatiquement en freinage

rhéostatique. Il n'est pas prévu de conjugaison entre les deux types de freinage.

Sous caténaires continues le freinage uniquement rhéostatique fait appel à 4 hacheurs à GTO qui modulent chacun une résistance de 4,6 Ohm à la fréquence de 300Hz. Voir Schémas N°1,2 ou 3

D'un point de vue général les performances en freinage par récupération de la BB36000 peuvent égaler voire même être légèrement supérieures à celles en traction puisque l'ensemble des pertes électriques et mécaniques concourent à accroître l'effort de retenue, mais pour limiter la sollicitation d'adhérence en freinage et par souci de cohérence avec l'autre mode de freinage électrique, les performances en récupération ont été calquées sur celles réalisables en freinage rhéostatique, seul mode de freinage autorisé sous caténaires continues 1500 ou 3000V.

Avec une caténaire « continue », en effet, la récupération de l'énergie n'est pas toujours possible. Or le freinage électrique se doit d'avoir une disponibilité et une efficacité toujours maximale quelque soit les conditions d'environnement (réceptivité du réseau d'alimentation, état du rail) d'où la justification des limitations retenues

En conséquence la puissance de freinage a été fixée à 2950kW à la jante avec un effort de retenue maximum de 130kN.

Du point de vue régulation de la tension bus continue la stratégie diffère selon le mode de freinage. En récupération les onduleurs contrôlent le couple moteur et les PMCF maintiennent la tension bus commun à 2800V pour assurer la pleine puissance de freinage jusqu'à 28kV caténaire. Tandis qu'en freinage rhéostatique, les 2 hacheurs connectés au même bus régulent la tension bus autour de 2400V. Ici aussi comme pour les PMCF en monophasé la régulation de tension des bus est assurée par un hacheur maître, l'autre fonctionne en esclave en recopiant l'angle d'ouverture calculé par le maître

En cas de perte de la tension caténaire, les onduleurs passent automatiquement en très faible freinage pour maintenir les bus sous tension et assurer l'alimentation des circuits auxiliaires.

Les moteurs de traction

La locomotive est équipée de 4 moteurs asynchrones à cage à ventilation forcée.

Le moteur a deux paires de pôles, ses principales caractéristiques sont regroupées ci-dessous.

CARACTERISTIQUES des MOTEURS de TRACTION

| | |
|---|---|
| Type | Asynchrone à cage |
| Puissance nominale | 1530 kW |
| Couple de démarrage | 11450 Nm |
| Vitesse maximale à 220kmh | 4160 t/mn |
| Tension maximale entre phases | 2070 V |
| Courant de démarrage | 600 A |
| Fréquence stator maximale à 220 km/h | 140 Hz |
| Masse | 2550 kg |
| Ventilation | forcée, axiale, 1,8 m³/s |
| Isolation | Classe 200 |
| Arrangement Mécanique | Flasque moto-réducteur intégré |
| Fixation | Entièrement suspendu en 3 points sur le châssis de bogie |

La particularité constructive est l'intégration moteur-réducteur qui minimise le nombre de roulements ce qui accroît la fiabilité. Le roulement de sortie coté pignon d'attaque est rejeté à l'extérieur du réducteur.

L'ensemble moto-réducteur est fixé en 3 points sur le châssis de bogie : 2 points fixes et un point élastique permettant des montages et démontages aisés.

Les bobinages sont imprégnés sous vide avec des résines silicone sans solvant pour tenir des tensions de 3000V.

Les équipements auxiliaires

Le schéma des auxiliaires a été conçu avec le souci de garantir une disponibilité de service maximale sous toutes les tensions d'alimentation. La philosophie retenue est que la panne d'un convertisseur auxiliaire quelconque n'entraîne aucune incidence sur le déroulement de la mission de la locomotive, c'est à dire que les pleines performances traction demeurent inchangées ce qui implique que les convertisseurs auxiliaires soient redondés et leur agencement reconfigurable en cas d'avarie.

Le schéma des auxiliaires (schéma n°4)

Le schéma retenu est adapté à une locomotive multitension AC et DC, dans ce sens l'énergie nécessaire aux fonctions auxiliaires est prise sur les bus continus intermédiaires traction. Cette façon de procéder présente plusieurs avantages :

- le schéma général des auxiliaires n'a pas besoin d'être reconfiguré en fonction de la tension d'alimentation ce qui accroît la fiabilité ;
- les auxiliaires restent toujours alimentés même sans présence de tension caténaire par la mise en freinage des onduleurs ;
- la ponction de puissance auxiliaire est équitablement répartie sur 2 convertisseurs d'entrée en continu, 4 PMCF en monophasé ;
- en monophasé l'énergie auxiliaire transite uniquement par les 4 PMCF équilibrés en courant ce qui facilite le respect de la contrainte IPE .

Deux hacheurs abaisseurs à GTO connectés au bus continu de traction inférieur, donc référencés à la masse peuvent délivrer au travers une inductance et une diode anti-retour une tension continue de 525 V

à un bus auxiliaire unique sur lequel sont connectés les charges. Cette tension intermédiaire de 525V est déjà utilisée sur la BB26000 ; elle offre donc la possibilité d'une réutilisation des mêmes convertisseurs auxiliaires. Chaque hacheur auxiliaire a une puissance de 200kW et peut alimenter seul l'ensemble des consommateurs de la locomotive.

En fonctionnement normal un seul hacheur est actif et alimente le bus 525V le second est arrêté, en cas de défaillance ce dernier prend automatiquement le secours. Comme il n'y a pas d'isolement galvanique en sortie des hacheurs, un dispositif à thyristor est prévu court-circuiter le bus auxiliaire s'il atteint 650V.

Les charges sont constituées par quatre petits onduleurs triphasés et deux chargeurs batterie, tous à transistors de puissance, reconduits des BB26000 pour leur excellente fiabilité.

Le bus 525V alimente :4 onduleurs de tension à transistors identiques de 75 KVA nominal, 100KVA max., 3*380V-50Hz , refroidis en ventilation à air forcé :

- deux onduleurs sont destinés au compresseur d'air, aux pompes à huile et à eau, aux climatiseurs et charges diverses, ils fonctionnent à tension et fréquence fixes
- deux autres onduleurs sont destinés aux charges fonctionnant à vitesse variable (moteurs ventilateurs des moteurs de traction, du bloc central, du rhéostat de freinage et du transformateur principal), ils fonctionnent à tension et fréquence variable de 0 à 380V-50Hz selon une loi U/f constant

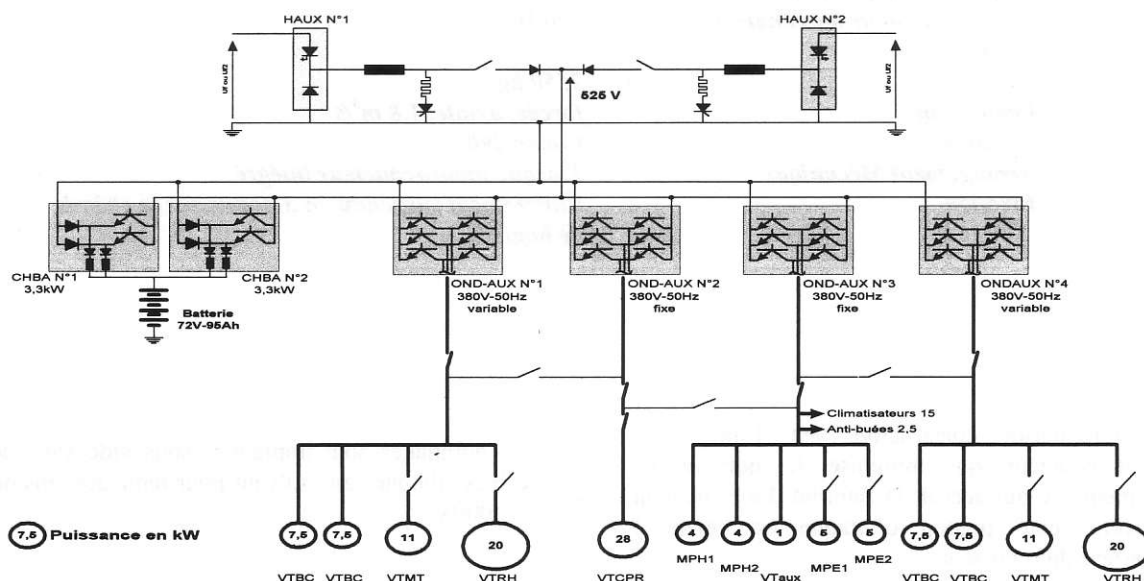


Schéma n°4 : Architecture générale des circuits auxiliaires

Deux chargeurs de batterie doubles indépendants travaillent en parallèle. Chacun peut délivrer 2x40A max sous 72V nominal. Le système peut continuer d'assurer la pleine charge avec une voie de chargeur hors service sans perturber le fonctionnement de la locomotive.

En cas de panne d'un quelconque onduleur auxiliaire, il y a reconfiguration des 3 restants, 2 sont toujours affectés aux charges à vitesse variable, le troisième à celles à vitesse constante. Voir schéma n°4.

L'électronique de contrôle commande.

L'électronique de commande est réalisée en cartes Eurofer 6U au format 233,4x220mm. Les cartes sont du standard AGATE d'ALSTOM déjà utilisé sur de nombreux engins SNCF.

La génération d'AGATE à bord de la BB 36000 est basée sur une architecture multiprocesseurs, non hiérarchisée composée d'unités intelligentes communiquant uniquement par réseau série CAN (Controller Area Network) et de cartes d'interface entrées-sorties standardisées. Les unités intelligentes font appel à des micro-contrôleurs 16 bits 80C196 d'Intel. Cette architecture permet de découpler les fonctions qui sont affectées dans des "coeurs microcontrôleurs" identiques et séparés.

Les cartes utilisent largement la technologie CMS (Composants Montés en Surface) et l'hybridation pour réduire les volumes et améliorer la fiabilité en minimisant les connexions soudées.

L'architecture du contrôle commande de la BB36000 a été conçue pour qu'en général, une panne simple n'entraîne pas une perte de puissance traction de plus de 25% des performances nominales. Certaines fonctions découpées au niveau bogie comme le freinage électrique par cohérence avec le frein pneumatique qui agit par bogie et non par essieu peuvent être réduites à 50% sur défaillance simple.

Ainsi la structure de la baie de commande d'un bogie comporte trois sous-ensembles :

- un qui traite les fonctions communes au bogie (CBOG)
- deux autres identiques qui traitent les fonctions pour chaque chaîne de traction moteur (CMOT)

Les fonctions communes à l'ensemble de la locomotive sont assurées par l'une des commande CBOG agissant comme pilote, l'autre prenant le relais en cas de défaillance. La plupart de ces fonctions sont ainsi redondées, le risque de perdre l'effort de traction sur un bogie ou même sur toute la locomotive est ainsi extrêmement réduit.

Les fonctions traitées par les électroniques CMOT ne sont pas redondées, la perte de l'une d'elles n'entraîne au pire qu'une diminution de 25% de performance de la locomotive par isolement d'un moteur.

La technologie des équipements

Les Modules de puissance et leur refroidissement

L'électronique de puissance est regroupée en 24 modules utilisant tous le même type de thyristor GTO 4500V-4000A et les mêmes sous-ensembles standard, seul l'arrangement des semi-conducteurs est susceptible de changer avec la fonction à réaliser

On retrouve pour une locomotive :

- 20 modules bras d'onduleur ou de convertisseurs d'entrée
- 2 modules regroupant chacun les 2 hacheurs à GTO pour le freinage rhéostatique d'un même bogie
- 2 modules hacheur auxiliaire à GTO

Le module bras d'onduleur

Le module bras d'onduleur ou de convertisseur d'entrée pris comme exemple est du type à circuit d'aide à la commutation asymétrique.

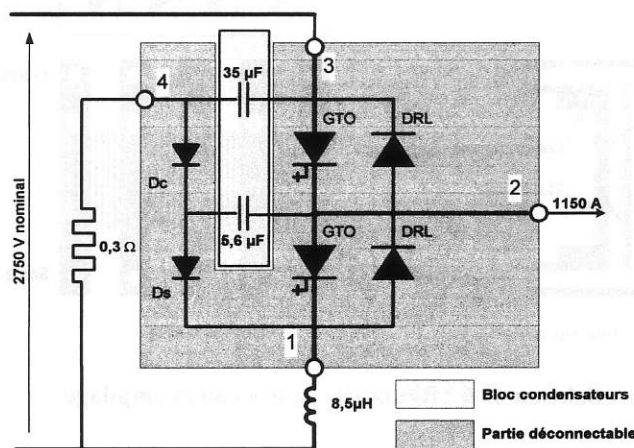


Schéma n°5 : Schéma électrique d'un bras d'onduleur

Il regroupe les semi-conducteurs de puissance, les condensateurs du circuit d'aide à la commutation, les allumeurs et le système de refroidissement.

Les connexions internes au module ont été réalisées en feuilles de cuivre laminé isolé (bus bar) pour réduire au minimum les inductances parasites de câblage et donc limiter les surtensions de commutation, le module peut ainsi couper en toute sécurité 2600A sous 3250V max.

Le refroidissement des modules.

Pour la BB36000, ALSTOM a choisi le refroidissement par eau au lieu de la technologie de refroidissement par immersion dans un fluide fluoro-carboné caloporteur comme le fréon R113 ou le FC72.

La technique d'immersion bien que très performante et largement utilisée jusqu'à présent est maintenant de plus en plus souvent frappée par des restrictions légales concernant l'environnement, les clients lui préfèrent le refroidissement par eau nettement moins polluant et facile à recycler. De plus le refroidissement à eau tout en étant très performant offre de nets avantages en matière de maintenance :

- la masse des modules a pu être abaissée au dessous des 50 kg pour éviter l'emploi d'outillage spécifique de mise en œuvre délicate ;
- l'accessibilité aux composants du module est immédiate et très simple
- la réparation du module ne nécessite plus d'atelier spécialisé et peut être envisagée dans un site client proche de l'exploitation ;
- le fluide de refroidissement : l'eau
- glycolée déjà utilisée dans l'automobile est facile à approvisionner ;

- le refroidissement de l'eau centralisé facilite l'installation, simplifie les circuits aérauliques et surtout réduit le débit d'air global nécessaire par rapport à un système de refroidissement direct par air forcé.

Le refroidissement par circulation d'eau adopté pour la BB 36000 est basé sur l'utilisation d'eau non désionisée (mélange eau/éthylglycol comparable à celui utilisé en automobile), le radiateur isolant électriquement mais conducteur thermiquement assure le diélectrique nécessaire entre le semi-conducteur et le circuit d'eau.

Le radiateur est principalement constitué d'un pavé de cuivre qui assure la conduction électrique entre les semi-conducteurs dans lequel sont logés des tubes d'alumine AL2O3 (électriquement isolants) où circule l'eau de refroidissement.

Les radiateurs et les semi-conducteurs constituant un bras d'onduleur ou de redresseur sont ainsi empilés alternativement et serrés fortement pour constituer la "pile" de semi-conducteurs du module correspondant à un bras d'onduleur ou de convertisseur d'entrée.

La température d'entrée d'eau est aux environs de 60°, la sortie est vers 64°C pour une dissipation thermique de 6 kW avec un débit d'eau de 36 l/mn. Ce mode de refroidissement très performant permet d'extraire jusqu'à 2,5 kW par GTO sans dépasser 125°C à la jonction. Dans le cas de la BB36000 les pertes maximales surviennent sous 1500V en hacheur élévateur où les GTO doivent dissiper jusqu'à 2400W, toutes les autres fonctionnements sollicitent moins les semi-conducteurs et laissent des marges thermiques importantes.

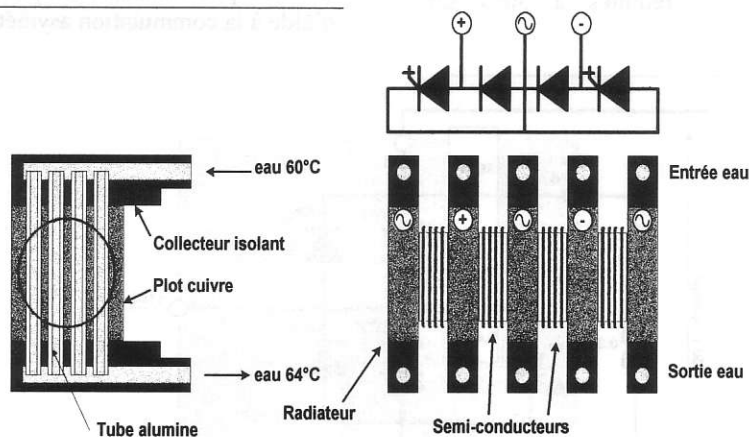


Schéma n° 6 : Radiateur isolé à eau et empilage

Les radiateurs et les semi-conducteurs constituant un bras d'onduleur ou de redresseur sont ainsi empilés alternativement et serrés fortement pour constituer la "pile" de semi-conducteurs du module correspondant à un bras d'onduleur ou de convertisseur d'entrée.

La température d'entrée d'eau est aux environs de 60°, la sortie est vers 64°C pour une dissipation thermique de 6 kW avec un débit d'eau de 36 l/mn. Ce mode de refroidissement très performant permet d'extraire jusqu'à 2,5 kW par GTO sans dépasser 125°C à la jonction. Dans le cas de la BB36000 les pertes maximales surviennent sous 1500V en hacheur élévateur où les GTO doivent dissiper jusqu'à 2400W, toutes les autres fonctionnements sollicitent moins les semi-conducteurs et laissent des marges thermiques importantes.

Le module est constitué de deux parties :

- une partie amovible aisément démontable par desserrage rapide des connexions électriques et hydrauliques. Sur cette partie sont installés la
- "pile" de semi-conducteurs et ses radiateurs, les allumeurs et leur plaque froide. L'eau de

refroidissement est amenée au module par deux flexibles débouchables et munis de raccords auto-obturants. L'eau circule dans les radiateurs situés entre les semi-conducteurs et dans la plaque de refroidissement des allumeurs. La masse de cet ensemble est de 47 Kg.

- une partie fixe située à l'arrière avec les condensateurs des circuits d'aide à la commutation.

Il y a un circuit de l'eau de refroidissement par bogie qui comporte (schéma n°7):

- une pompe de circulation débitant 216 l/mn sous 4,4 bars
- un aéroréfrigérant refroidi par air forcé : 4 m³/s à 40°C
- un ensemble de tuyauteries,
- 12 modules de puissance en série deux par deux.

La grande fiabilité des sous-ensembles de la boucle à eau, notamment des auxiliaires moto-pompes, a autorisé une installation regroupée commune à deux moteurs.

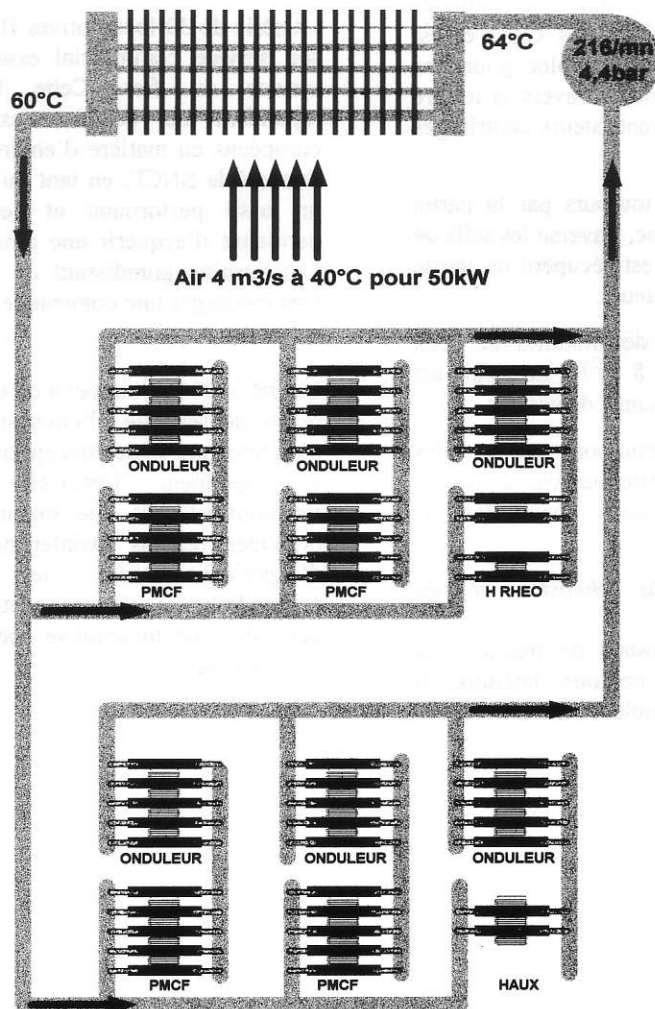


Schéma n° 7 : Circuit hydraulique pour un bogie

Le Bloc central

Le bloc central abrite l'équipement de traction-freinage électrique des deux bogies :

- les modules semi-conducteurs pour la traction-freinage et les hacheurs auxiliaires ;
- l'appareillage de puissance pour les reconfigurations et l'isolement de convertisseurs
- les rhéostats de freinage ;
- les électroniques de commande.

L'accessibilité aux équipements est réalisée par les deux couloirs latéraux.

Le bloc central est constitué de deux demi-blocs, les "blocs moteurs" chacun abritant l'équipement d'un bogie.

Dimensions du bloc central:

| | |
|-------------|---------|
| - longueur: | 5,120 m |
| - largeur: | 1,650 m |
| - hauteur: | 2,600 m |
| - masse: | 8800 kg |

Le circuit de ventilation de l'électronique de puissance.

D'un côté de chacun des blocs moteurs l'air traverse horizontalement les aéro-réfrigérants du circuit d'eau de refroidissement des modules, refroidit les résistances des circuits snubbers des GTO et est récupéré dans la partie centrale du bloc pour être évacué en partie haute du bloc, à travers la toiture de la locomotive, par deux ventilateurs centrifuges (VTBC) par bloc moteur.

De l'autre côté l'air pénètre toujours par la partie haute de la face latérale du bloc, traverse les selfs de limitation di/dt des GTO et est récupéré en partie centrale par les mêmes ventilateurs.

Le débit d'air dans l'ensemble des modules des deux blocs moteurs est d'environ $8 \text{ m}^3/\text{s}$. Le débit est modulé en fonction de la puissance demandée.

Les pompes de circulation d'eau sont quant à elles toujours maintenues en fonctionnement à vitesse nominale afin d'éviter tout point chaud dans le circuit hydraulique.

Circuit de ventilation du rhéostat et du transformateur principal.

L'air de ventilation des rhéostats de freinage est également aspiré dans les couloirs latéraux, il pénètre sous le plancher des couloirs, traverse les

aéroréfrigérants du transformateur (un de chaque côté du bloc central), est aspiré vers le haut par les

ventilateurs hélicoïdes des rhéostats (VTRH) et évacué en toiture. Ce circuit de ventilation est ainsi entièrement indépendant de celui des semi-conducteurs.

Le débit d'air dans chaque rhéostat est d'environ $6 \text{ m}^3/\text{s}$. Ce débit se répartit en amont entre l'aéroréfrigérant transformateur (4 m^3) et le by-pass (2 m^3).

Comme pour les semi-conducteurs le débit d'air est diminué à puissance réduite. A l'arrêt en gare les ventilateurs des rhéostats ainsi que ceux des moteurs de traction sont totalement arrêtés par mesure de réduction de bruit. Le transformateur est alors refroidi par circulation naturelle de l'air dans les aéroréfrigérants et les cheminées des rhéostats, les pompes à huile sont elles maintenues en fonctionnement à vitesse nominale pour éviter l'apparition de "points chauds" dans la cuve.

Conclusions et perspectives d'avenir.

La série de 30 locomotives BB 36000 a commencé son service commercial essentiellement dédié au service du fret. Cette locomotive moderne répondant aux dernières exigences des réseaux européens en matière d'environnement et de CEM donne à la SNCF, en tant qu'opérateur ferroviaire, un outil performant et compétitif qui va lui permettre d'acquérir une dimension internationale. Les besoins grandissant du trafic fret Nord Sud font envisager une commande supplémentaire de 30 autres locomotives.

La BB 36000 fait appel à de nouvelles technologies respectueuses de l'environnement. Les choix d'architecture et de conception modulaire apportent à l'opérateur ferroviaire une disponibilité opérationnelle et une maintenance accrues. Les principes retenus maintenant associés au retour d'expérience seront les axes directeurs qui prévaudront à la conception d'une nouvelle génération de locomotive spécialisée au trafic fret international.

CONTRIBUTION A LA CONCEPTION GLOBALE D'UNE CHAÎNE DE TRACTION FERROVIAIRE

X. ROBOAM, C. LOCHOT, B. de FORNEL

LEEI UMR CNRS – INPT N° 5828,

2 Rue Ch Camichel, BP 7122,

31071 Toulouse Cedex 7

Résumé

Dans cet article, nous abordons le problème de la caractérisation globale d'un système complexe, c'est à dire l'analyse des performances, de la stabilité et des principaux couplages d'un dispositif préconçu. Contrairement à l'approche classique qui simplifie la conception en séparant les problèmes par disciplines, le système, constitué ici d'une chaîne de traction ferroviaire asynchrone (locomotive BB36000), est vu dans sa « globalité » de la caténaire au rail. Ce travail montre qu'il est primordial de mettre en adéquation la nature et le degré de finesse des modèles avec l'analyse à effectuer. Des exemples d'études illustrent ce propos, allant de l'analyse de la stabilité de la chaîne de traction à la caractérisation des effets couplés typiques de ces dispositifs. Nous étudions ainsi les interactions mécano-électriques (exemple du phénomène de « broutement de bogie ») et surtout les couplages électro-mécaniques, en fonctionnement normal (influence des temps morts dans l'onduleur ou d'un décollement de pantographe) ou dégradé (influence de courts circuits d'interrupteurs).

1.- Introduction

L'approche globale ou « systémique » de la conception a pour objet l'étude des systèmes complexes (hétérogènes, non linéaires, couplés) considérés dès l'origine dans leur « totalité ». Elle nécessite de formaliser un ensemble de règles permettant de synthétiser le problème sous son aspect fonctionnel puis structurel, en conservant à tout instant une liaison la plus étroite possible avec le cahier des charges du système complet. Si cette phase de synthèse est évidemment fondamentale dans le processus qui mène à la réalisation d'un dispositif, la caractérisation globale que nous abordons ici, c'est à dire l'analyse des performances, de la stabilité et des principales caractéristiques du système préconçu, reste un problème éminemment complexe à résoudre qu'il convient d'aborder avec soin et méthode. C'est notamment par la mise en adéquation du type de modèle et de son degré de finesse avec le niveau d'analyse recherché que le problème de la caractérisation systémique peut être résolu.

L'approche classique simplifie la conception en séparant les problèmes par disciplines. Ainsi, dans le domaine de la conversion électromécanique en général et de la traction ferroviaire en particulier, on sépare les problèmes électriques et mécaniques. Par exemple, l'étude du comportement électromagnétique d'un actionneur embarqué sur une chaîne de traction et la conception de l'algorithme de contrôle s'effectuent à partir d'une modélisation simplifiée de la transmission mécanique. De même, la conception de l'algorithme de contrôle s'effectue en considérant l'électronique de puissance et son alimentation de façon simplifiée. Ainsi, pour un actionneur asynchrone, l'alimentation de l'onduleur de tension ne tient pas compte des éléments de filtrage. Cette approche par la « séparation disciplinaire » a largement fait ses preuves et permis de mettre au point la plupart des dispositifs actuels.

Alors pourquoi remettre en cause l'approche classique ? Un certain nombre d'arguments permet de justifier cette remise en cause pour les systèmes électromécaniques et en particulier pour les chaînes de traction ferroviaire. Ces systèmes, grâce aux progrès des composants de puissance et de commande, deviennent plus complexes et nécessitent d'être optimisés en raison des besoins industriels dont les cahiers des charges sont de plus en plus contraignants. Ces contraintes soumettent les composants à des fonctionnements extrêmes, posant le problème de la fiabilité des équipements et de certains choix de conception effectués selon l'approche classique. Pour les chaînes de traction ferroviaires deux exemples permettent d'illustrer cela :

- les dynamiques de couple atteintes par les actionneurs asynchrones se rapprochent « dangereusement » des dynamiques résonantes, tant du filtre d'entrée de l'onduleur de tension que de la chaîne de transmission mécanique. Cette coïncidence des modes propres pose des problèmes de stabilité

globale du système, problèmes non encore rencontrés sur des dispositifs moins optimisés. La dynamique de couple est en fait imposée par la nécessité de contrôler l'adhérence au niveau du contact roue / rail par des dispositifs d'anti-patinage / anti-enrayage.

- Les interactions des composants de puissance avec le circuit et le système sont classiquement considérées comme secondaires. Elles s'avèrent parfois prépondérantes sur ces applications et occasionnent par exemple des modes dégradés. On a ainsi des phénomènes que l'on peut qualifier de « chaotiques » quand une surintensité dans un interrupteur de puissance provoque sa mise en court circuit et se répercute jusqu'à la partie mécanique, ce phénomène pouvant aller jusqu'à causer la rupture d'un arbre de transmission.

La modélisation et la simulation sont les opérations de base d'une approche globale de la conception. La simulation donne de tester, à l'échelle du système, le comportement d'une solution de structure ou/et de dimensionnement en tenant compte de l'environnement.

L'augmentation de complexité et d'optimisation des systèmes entraîne une conception elle aussi plus complexe et coûteuse en raison des nombreuses interactions des constituants tels que:

- l'alimentation par convertisseur statique, avec ses contraintes spécifiques: fiabilité des composants dans leur environnement (CALC, allumeur), temps de commutation, filtre d'entrée, perturbations de la tension d'alimentation (caténaire,...),
- la machine électrique, représentée par un modèle plus ou moins complexe suivant les phénomènes physiques considérés (saturation magnétique, effets thermiques, courants de Foucault,...),
- la chaîne de transmission mécanique, qui nécessite la représentation de phénomènes tridimensionnels complexes par des formalismes de modélisation spécifiques (Bond Graph,...),
- le calculateur, avec les phénomènes numériques de quantification, de discrétisation et de traitement du signal (bruits de mesures, repliement de spectre,...),
- l'algorithme de contrôle, faisant appel aux techniques modernes de l'Automatique.

Cependant, la méthode de simulation conditionne la fiabilité des résultats et doit être choisie avec une grande attention. Les constantes de temps des dispositifs électromécaniques sont très diversifiées, de la micro seconde au niveau des composants de puissance, à la minute pour les parties mécaniques ou thermiques, soit un rapport d'environ 10^8 . Il est donc totalement utopique de vouloir associer les modèles les plus complexes d'un bout à l'autre de la chaîne, en raison de temps de calcul excessifs. Disposer de plusieurs niveaux de modélisation utilisables selon l'essai considéré apparaît ici primordial. Actuellement, de nouveaux solveurs généralistes tels que SABER, SIMPLORER, ELDO, AMESIM, EASY5,... permettent de gérer ces simulations de systèmes complexes et hétérogènes. Nous utilisons au LEEI le logiciel Saber de la société Analogy Inc dont le concept de « simulation mixte » permet d'associer des éléments à caractère très différents (analogique, logique, numérique,...), issus de plusieurs disciplines (électrique, électronique, mécanique, hydraulique,...).

2.- Modélisation d'une chaîne de traction ferroviaire asynchrone

Le travail, présenté dans la suite, a été réalisé au LEEI en collaboration avec la société Alstom Transport et la SNCF, sur le thème de la caractérisation systémique du comportement d'une chaîne ferroviaire asynchrone de forte puissance. Il correspond en grande partie à la thèse de Christophe Lochot [Lochot.99] dont les objectifs étaient de caractériser :

- la stabilité de la chaîne de traction,
- les effets couplés :
 - interactions électriques – magnétiques - mécaniques,
 - interactions composants – circuit – système,
- les performances globales du système en fonctionnement normal ou dégradé.

Sans réduire le caractère générique des méthodes de modélisation et d'analyse, nous avons envisagé deux cas concrets de chaînes de traction : la BB36000 et le TGV Nouvelle Génération (TGV NG). Les résultats présentés ici correspondent à la première de ces deux chaînes.

2.1.- Les contraintes liées à la traction ferroviaire asynchrone

Le cahier des charges d'une chaîne de traction ferroviaire asynchrone comporte de nombreuses contraintes [Jeunesse,98], [Lacôte,TI], [Lancien,98], [Thomas,99], [Lochot,99], [Steimel,96] qui doivent être prises en compte de plus en plus tôt dans le processus de conception. Celles ci peuvent être classées en deux catégories :

- les **contraintes principales** parmi lesquelles :
 - *les exigences CEM*: limitation impérative des émissions électromagnétiques et protection des équipements électroniques embarqués contre les pollutions internes (convertisseur de puissance,...) et externes. Limitation du rejet harmonique vers le réseau d'alimentation,

- *l'exploitation des voies* : limitation impérative de la masse à l'essieu,
- *la stabilité du système* : notamment en raison de la présence d'éléments de filtrage et des résonances mécaniques (bogies,...),
- *les exigences thermiques* liées à la limitation des pertes dans les convertisseurs de puissance afin de garantir la fiabilité du système,
 - les **contraintes secondaires** telles que :
 - *l'économie d'énergie* : optimiser le facteur de puissance par la mise en œuvre de structures d'alimentation adaptées,...
 - *le respect de l'environnement* : recyclage des fluides (refroidissement à l'eau, l'huile,...),
 - *la disponibilité opérationnelle et la maintenance* : réduction minimale (25% actuellement) des performances lors d'une panne. Utilisation de structures modulaires, facilement démontables et réparables,...

Les objectifs principaux de la chaîne de traction visent :

- L'optimisation du gabarit couple – vitesse aux roues,
- L'obtention de dynamiques de couple suffisantes pour contrôler l'adhérence (patinage, enrayage) en particulier à basse vitesse, lors du démarrage de la chaîne de traction,
- Le coût global du système « évidemment ».

2.2.- La chaîne de traction BB36000

Nous présentons ci dessous le schéma de puissance de la locomotive BB36000 (Figure 1) avec une alimentation sous 25kV alternatif, quatre moteurs asynchrones de traction de 1.4MW alimentés par onduleur à thyristors GTO. Cette locomotive aussi qualifiée de « locomotive multitenion européenne » s'adapte également aux réseaux 1.5 et 3kV DC.

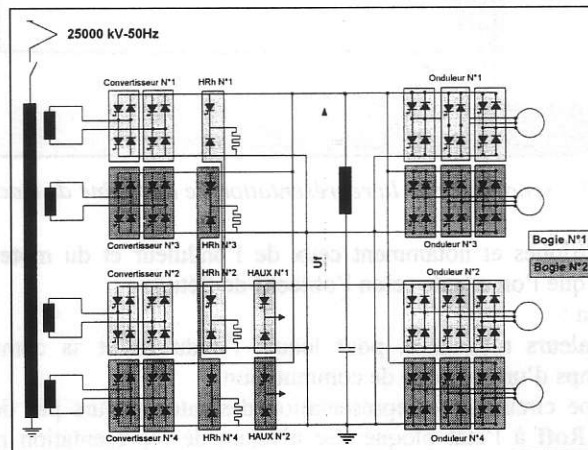


Figure 1 – schéma de puissance de la locomotive BB36000

Dans cette étude, nous effectuons une simplification de ce système en considérant une chaîne de traction monomoteur, modélisée selon la représentation du synoptique de la Figure 2 et comprenant :

- Une alimentation continue parfaite (caténaire), éventuellement perturbable en liaison avec l'environnement (décollement de pantographe,...),
- un filtre d'entrée (R,L,C),
- un onduleur de tension, dont les cellules de commutation peuvent être simulées selon différents degrés de finesse,
- un moteur asynchrone, représenté par plusieurs modèles de niveaux de complexité différente (linéaire, saturable...),
- une chaîne de transmission de l'arbre moteur à la roue dont le modèle est du 10^{ème} ordre pour le bogie de la BB36000 et du 13^{ème} ordre pour la transmission type réducteur semi-suspendu d'un TGV nouvelle génération,
- une loi de contact non linéaire qui donne la force transmise à la roue en fonction du glissement entre la roue et le rail,
- un modèle de la dynamique de bogie et un autre de la caisse de la locomotive qui permettent d'adapter le paramétrage de la loi de contact suivant les conditions dynamiques de masse à l'essieu. Ce modèle quasi-statique permet notamment de prendre en compte les déchargements d'un essieu sur l'autre (phénomène de « broutement de bogie »),
- une loi de commande vectorielle classique utilisant le principe du flux rotorique orienté [Blaschke,72] avec plusieurs lois de modulation (MLI) permettant de piloter les interrupteurs de l'onduleur en tenant compte de façon plus ou moins fine de leurs imperfections (temps morts, retards,...).

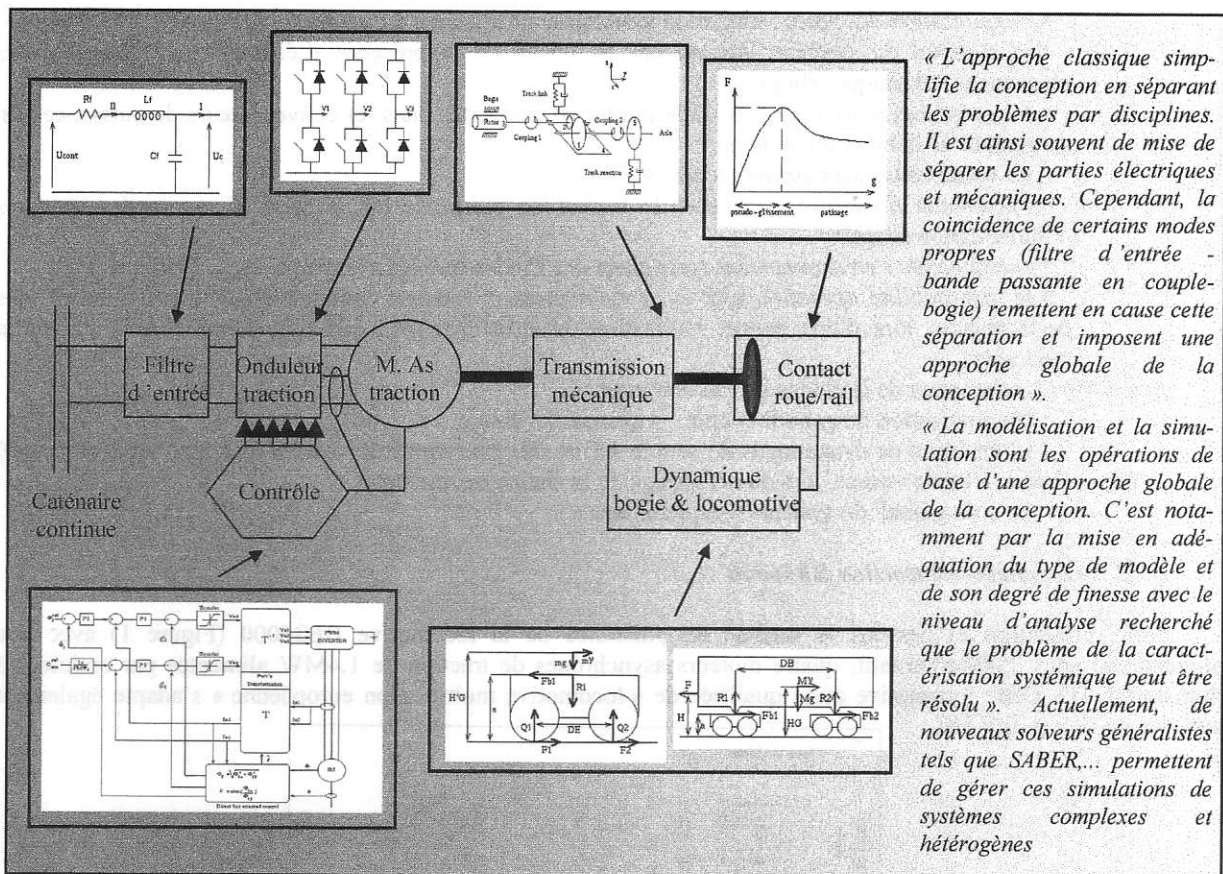


Figure 2 – synoptique de la représentation de la chaîne de traction monomoteur

Pour les modèles électriques et notamment ceux de l'onduleur et du moteur asynchrone, on fait appel à plusieurs niveaux de finesse que l'on adapte selon l'objectif de l'étude :

- onduleur de tension :
 - modèle aux valeurs moyennes, pour lequel l'onduleur et sa commande rapprochée sont vus à l'échelle de temps d'une période de commutation ;
 - modèles de type circuit avec représentation des interrupteurs par des résistances variables, R_{on} à l'état passant, R_{off} à l'état bloqué. Ce niveau de représentation permet aussi de représenter les phénomènes de temps morts et de retard à la commutation ;

On peut grossièrement considérer qu'un facteur 10 sur la simulation globale sépare les coûts de calculs associés à chacun de ces deux types de modèles.

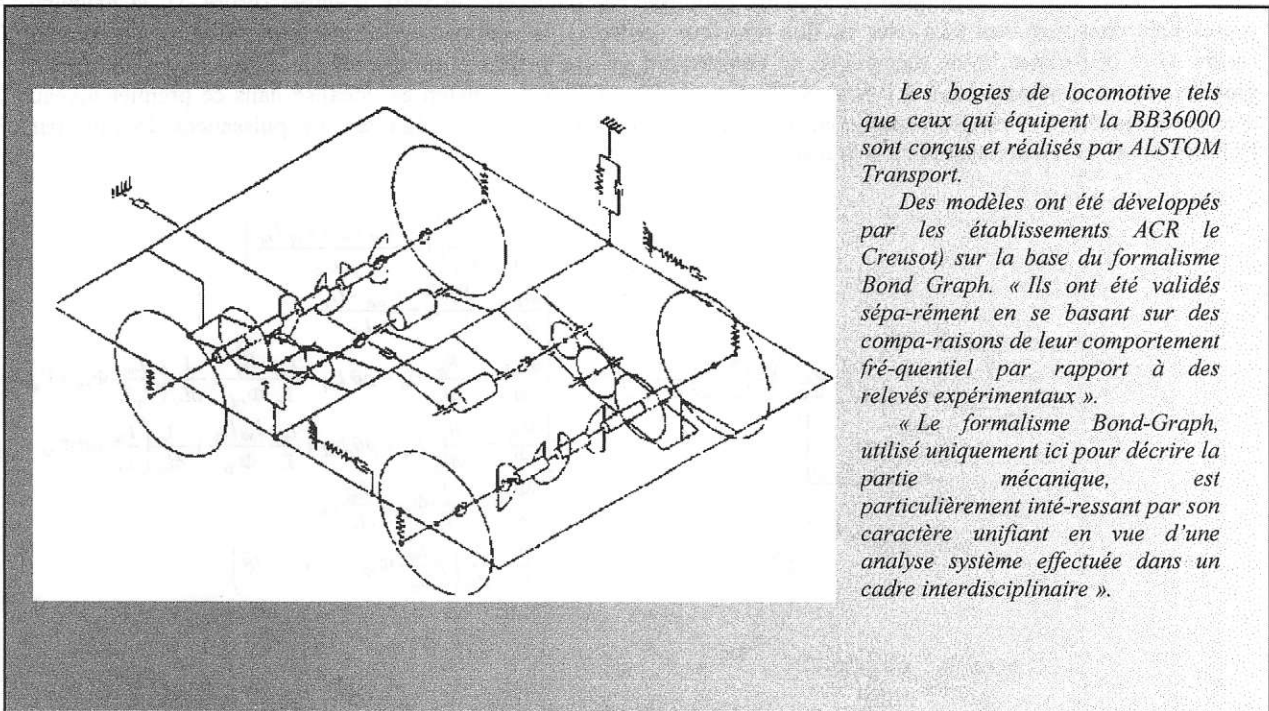
- moteur asynchrone :
 - modèle de Park linéaire ;
 - modèle prenant en compte la saturation magnétique. Ce modèle développé au LEEI [Kasmieh,98], [Lochot,99] permet de tenir compte des variations des inductances (inductance magnétisante & inductances de fuites) en fonction du niveau de magnétisation ;

Pour la partie mécanique, les modèles ont été fournis sur la base de Bond-Graph par le site ACR Le Creusot d'Alstom Transport. Ils ont été validés séparément en se basant sur des comparaisons de leur comportement fréquentiel par rapport à des relevés expérimentaux et sont décrits en détail dans [Lochot,99].

2.3.- Modèles de la transmission mécanique

A titre d'exemple sont représentés, ci-dessous, la photo et la vue synoptique 3D (Figure 3) du bogie BB36000 et sa représentation basée sur un schéma Bond Graph (Figure 5).

Le formalisme Bond-Graph, utilisé uniquement pour décrire la partie mécanique, est particulièrement intéressant par son caractère unifiant en vue d'une analyse système effectuée dans un cadre interdisciplinaire [Borne,92]. Tous ces modèles ont été insérés dans le logiciel Saber qui a servi d'outil d'analyse principal pour cette étude. Une approche par calcul symbolique, à l'aide du logiciel Maple, a également été utilisée pour analyser la stabilité de la chaîne de traction.



Les bogies de locomotive tels que ceux qui équipent la BB36000 sont conçus et réalisés par ALSTOM Transport.

Des modèles ont été développés par les établissements ACR le Creusot sur la base du formalisme Bond Graph. « Ils ont été validés séparément en se basant sur des comparaisons de leur comportement fréquentiel par rapport à des relevés expérimentaux ».

« Le formalisme Bond-Graph, utilisé uniquement ici pour décrire la partie mécanique, est particulièrement intéressant par son caractère unifiant en vue d'une analyse système effectuée dans un cadre interdisciplinaire ».

Figure 3 - Bogie de la BB36000

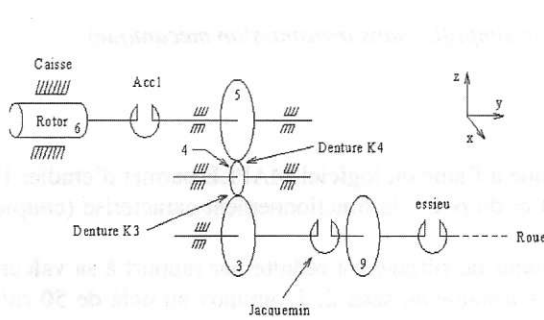


Figure 4 - Synoptique de la BB36000

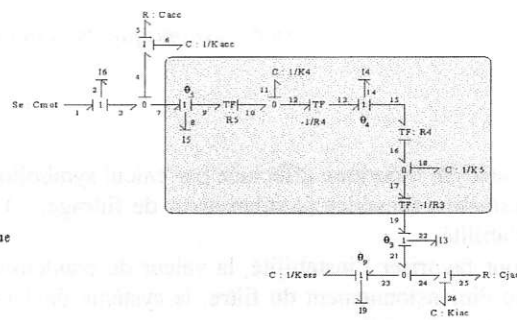


Figure 5 - Bond graph de la chaîne de traction

3.- Analyse de stabilité [Lochot,99]

Le premier exemple d'analyse est consacré à la stabilité de la chaîne de traction. Ce problème a déjà été étudié pour de tels systèmes, en considérant uniquement la partie électrique avec en particulier son filtre d'entrée résonant, responsable, suivant son dimensionnement, de l'instabilité de certains points de fonctionnement [Jacquot,95], [Delemontey,95].

Il y a plusieurs définitions de la stabilité : stabilité globale/locale, asymptotique, exponentielle,... Nous avons recours ici à la théorie de Lyapunov (1^{er} critère) qui permet d'analyser la stabilité locale des systèmes non linéaires. Dans cette approche, le comportement autour d'un point de fonctionnement du système non linéaire doit être semblable à celui du système linéarisé pour des petites variations autour de ce même point. Après avoir linéarisé le système par le calcul de ses Jacobiennes, la méthode consiste à analyser le signe des valeurs propres :

- si les valeurs propres sont à parties réelles strictement négatives, le point d'équilibre est asymptotiquement stable pour le système non linéaire,
- si une des valeurs propres est à partie réelle strictement positive, le point d'équilibre est asymptotiquement instable pour le système non linéaire,
- si une des valeurs propres est à partie réelle nulle, le système linéarisé est « marginalement stable » et aucune conclusion ne peut être donnée pour le système non linéaire.

3.1.- Analyse de stabilité sur un système simplifié

Cette méthode est appliquée au système simplifié qui comprend le filtre d'entrée (ordre 2), la machine représentée dans des axes (d,q) liés au flux rotorique (ordre 3), la commande vectorielle représentée en continu (ordre 3) et une transmission mécanique ne comprenant qu'une inertie et un frottement (ordre 1), ce qui donne globalement un système réduit à l'ordre 9 (Figure 6). L'onduleur de tension est idéalisé dans ce premier niveau d'analyse, le filtre d'entrée étant connecté au reste du système par l'égalité des puissances fournie par l'alimentation ($U_c \cdot I_c$) et absorbée par la machine ($V_{sd} \cdot I_{sd} + V_{sq} \cdot I_{sq}$).

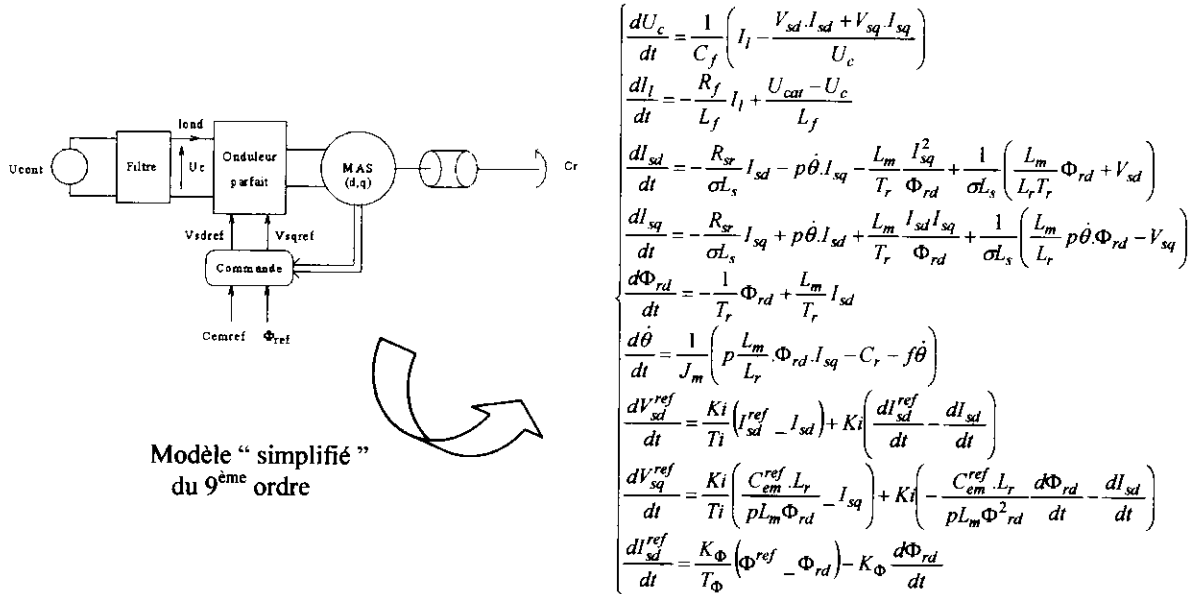


Figure 6 – synoptique du système simplifié (sans transmission mécanique)

L'analyse théorique effectuée par calcul symbolique à l'aide du logiciel MAPLE permet d'étudier l'influence des paramètres sensibles (condensateur de filtrage,...) et du point de fonctionnement caractérisé (couple, vitesse) sur la stabilité.

Pour favoriser l'instabilité, la valeur du condensateur de filtrage est réduite par rapport à sa valeur normale. Avec ce dimensionnement du filtre, le système devient instable au sens de Lyapunov au delà de 50 rd/s pour un condensateur de 3mF.

Pour valider cette approche, le même modèle est simulé sous Saber par analyse temporelle qui consiste à perturber le système par le biais de la tension continue d'entrée. La limite de vitesse stable obtenue ici (45 rd/s) est très proche de celle trouvée par l'approche théorique, d'où une validation de celle-ci.

La forme (amplitude, fréquence, forme) de la perturbation influe pourtant sur le niveau de stabilité du système ce qui constitue un premier inconvénient, lié à la différence entre stabilité locale et globale. Il est délicat en effet de connaître a priori la forme adéquate de perturbation pour analyser correctement la stabilité.

Dans l'étape suivante, le même système simplifié est représenté à l'aide de modèles « plus fins » pour chaque élément. L'onduleur avec sa MLI sont simulés en valeur moyenne, le moteur asynchrone représenté par le modèle de Park linéaire et la commande vectorielle simulée en échantillonné. Pour la même perturbation, nous trouvons, sur Saber, une limite de stabilité sensiblement décalée en raison des différences de représentation. Ceci illustre la complexité du problème général de la stabilité des systèmes non linéaires hybrides (continus / discrets).

3.2.- Analyse de stabilité du système complet (chaîne BB36000)

La même analyse théorique de la stabilité au sens de Lyapunov est effectuée sur le système BB36000 avec la transmission mécanique réelle. Le contact roue / rail est cependant considéré sans glissement, ce qui mène à un modèle du 16^{ème} ordre. Nous aboutissons alors à un cas critique pour lequel le système est « marginalement stable » du fait de la présence de valeurs propres nulles. Aucune conclusion sur la stabilité du système non linéaire ne peut alors être apportée.

Ceci nous amène à conclure à un « échec relatif », quant à l'utilisation du premier critère de Lyapunov, pour l'analyse de la stabilité d'un système complexe, hybride et non linéaire:

- Selon l'approche théorique par calcul symbolique, on peut aboutir à l'absence de conclusion tangible suivant la topologie et l'ordre du système,
- Selon l'approche par simulation temporelle, il existe des cas où le système peut être stable ou instable suivant la forme de la perturbation.

D'autres méthodes d'étude de la stabilité existent néanmoins, telles que le second critère de Lyapunov basé sur l'analyse d'une fonction d'énergie. Un travail plus fouillé sur ce sujet reste souhaitable d'autant plus que des moyens existent pour agir sur la stabilité des systèmes électromécaniques, soit par action sur leur structure ou leur dimensionnement, soit par la commande [Delemontey,95].

4.- Interactions entre les différentes parties du système [Lochot,99]. [Pena,99]

Cette partie, consacrée à l'étude de phénomènes couplés entre les parties électriques, magnétiques et mécaniques du système remet en cause la séparation classique entre celles ci et justifie une approche systémique globale. Plusieurs scénarios conduisent à :

- perturber l'entrée du système (*interactions électro – mécaniques*) par des variations de la tension caténaire, par exemple lors d'un décollement de pantographe.
- perturber la sortie du système (*interactions mécano – électriques*) par des variations de la masse à l'essieu qui provoquent des oscillations de la caisse de la locomotive et le déchargement dynamique d'un essieu sur l'autre (broutement de bogie).

Des exemples significatifs sur l'interdépendance des composants (composants de puissance) avec le circuit (convertisseur statique) et le système (chaîne de traction) : « interactions composants – circuit – système » sont étudiés :

- soit en fonctionnement normal, par l'étude de l'influence des temps de commutation des composants (temps morts),
- soit en fonctionnement dégradé, par l'étude de l'influence de défauts des interrupteurs de puissance, correspondant par exemple à des courts circuits.

4.1.- Interactions électro – mécaniques : « décollement de pantographe » [Pena,99]

Le décollement de pantographe provoque une rupture de l'alimentation, précédée de la formation d'un arc électrique. La modélisation de cet arc est un problème extrêmement complexe qui n'a pas été étudié ici. Il a été abordé de façon qualitative, à partir de relevés expérimentaux fournis par Alstom Transport.

Suivant les fréquences propres contenu dans le spectre de la perturbation caténaire, les résonances électriques (filtre d'entrée) et mécanique (bogie) peuvent être excitées menant à des oscillations importantes des grandeurs électromécaniques. Pour la transmission BB36000, ce phénomène est critique car ses modes propres sont très proches de la résonance du filtre d'entrée. Au cours du décollement du pantographe (Figure 7), les oscillations du courant dans l'inductance et de la tension du condensateur du filtre LC (entrée du système) ainsi que celles de la force transmise à la roue (sortie du système) illustrent cette interaction. Ces oscillations dépendent de la durée du décollement et de la résistance d'arc. Elles ont toujours lieu aux fréquences résonantes et sont de forte amplitude à l'instant du retour de l'alimentation (i.e. recollement du pantographe).

4.2.- Interactions mécano – électriques : broutement de bogie

De manière duale, il est possible d'exciter le système par sa sortie. Une variation sinusoïdale basse fréquence est appliquée sur la charge à l'essieu, en tenant compte dans le modèle de la dynamique de caisse et de bogie et de la loi d'adhérence roue/rail. Même en se plaçant dans le pire des cas, une oscillation de la masse à la fréquence propre de la transmission, cette perturbation ne provoque que peu de glissement entre la roue et le rail. Contrairement au cas précédent, la perturbation est donc très bien filtrée, notamment par la loi d'adhérence et on obtient une réduction des oscillations dans un rapport 5. La souplesse des accouplements mécaniques (« transmission Jacquemin ») se charge aussi d'atténuer cette perturbation.

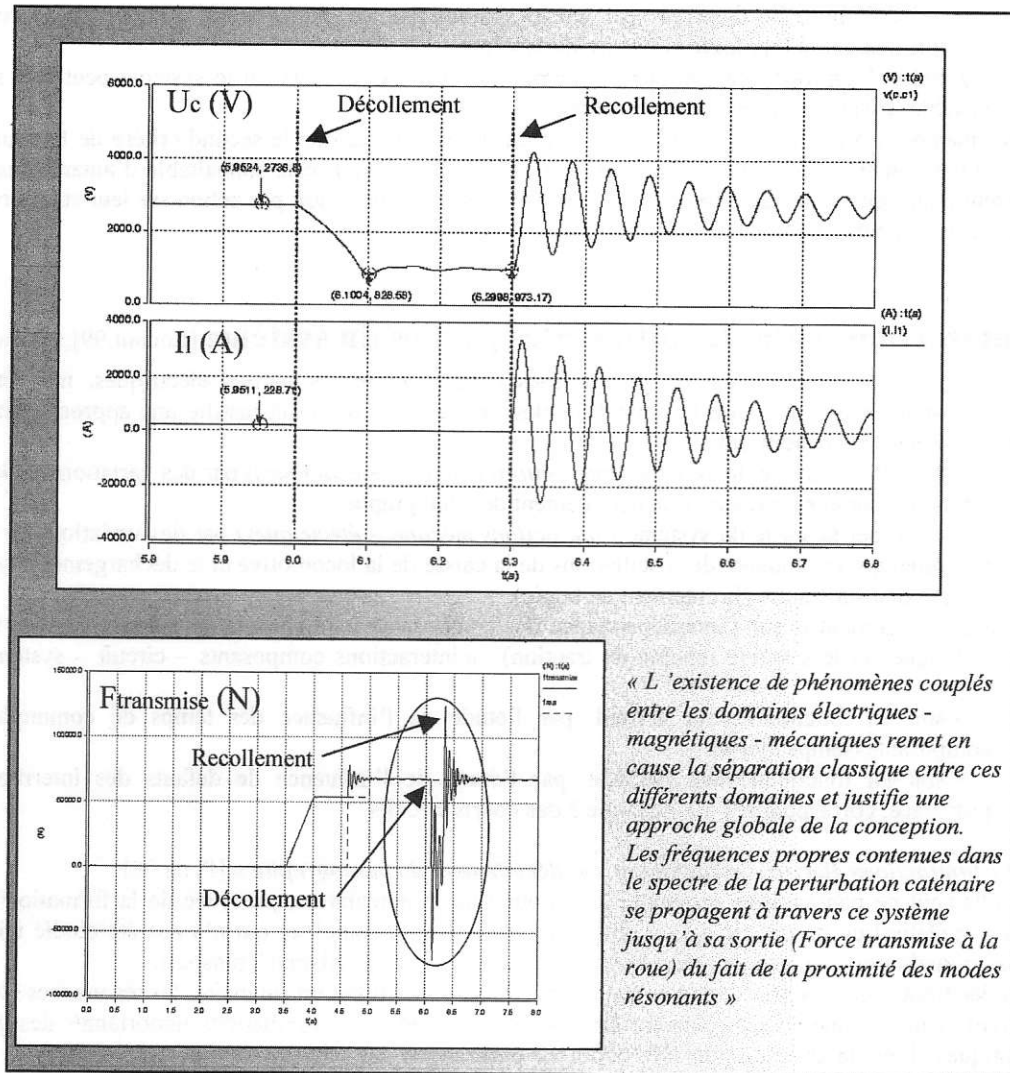


Figure 7 – décollement de pantographe sur BB36000

4.3.- Interactions composant – circuit – système : influence des commutations d'interrupteur

Nous étudions ici l'influence des retards à l'amorçage et au blocage des interrupteurs, c'est à dire les temps morts de sécurité.

Les temps morts provoquent, suivant le signe du courant, une diminution ou une augmentation de tension induisant un harmonique 6 ($6.f_s$) sur les grandeurs électriques et en particulier sur le couple moteur. Ils interviennent sur le système comme une perturbation d'amplitude constante dont la valeur est proportionnelle au rapport entre la durée du temps mort et la période de modulation de l'onduleur :

$$\left(\Delta V_{\text{temps morts}} \cong \frac{T_{\text{mort}}}{T_{\text{onduleur}}} \cdot E_{\text{continu}} \right).$$

Lors du démarrage de la chaîne, cette perturbation est d'autant plus importante que la tension aux bornes du moteur est faible ($\frac{\Delta V_{\text{temps morts}}}{V_{\text{moteur}}}$ élevé). Pendant l'augmentation progressive de la fréquence stator (f_s) du

moteur, l'harmonique 6 s'identifie successivement aux fréquences de résonance créant des oscillations. C'est une des raisons qui amènent à choisir une fréquence de modulation (MLI) faible pour les basses vitesses des chaînes de traction ferroviaire, car cela tend à atténuer l'effet du temps mort sans toutefois l'annuler. Une compensation du temps mort est possible mais reste délicate à mettre en œuvre.

Pour illustrer ce phénomène, nous avons simulé le démarrage d'une chaîne BB36000 (Figure 8) en dimensionnant le système pour des interrupteurs à IGBT ($T_{\text{mort}} \cong 5 \mu\text{s}$, $F_{\text{onduleur}} = 1000\text{Hz} \Leftrightarrow \frac{T_{\text{mort}}}{T_{\text{onduleur}}} \cong 0.5\%$). Nous

constatons une amplification des oscillations au passage des fréquences résonantes tout au long de la chaîne de transmission et jusqu'à la force transmise à la roue.

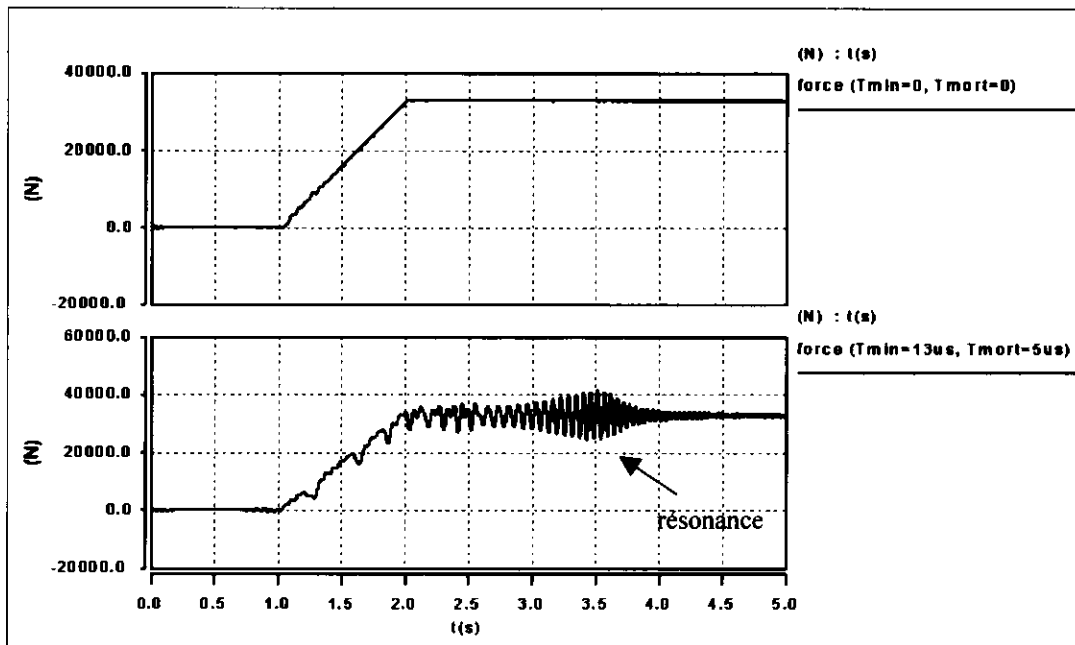


Figure 8 – démarrage de la chaîne BB36000 en présence de temps morts

4.4.- Interactions composant – circuit – système : analyse des modes dégradés

Les interactions entre les composants, les circuits de puissance et le système interviennent directement sur la fiabilité de la chaîne de traction. En effet, en raison de contraintes parfois excessives sur les composants de puissance lors de certains transitoires, ou suite à leur vieillissement, ceux-ci peuvent subir des dégradations souvent irréversibles, ouverture ou mise en court-circuit de l'interrupteur (IGBT ou GTO). La fiabilité des composants est étudiée en Electronique de Puissance et en particulier sur les systèmes de transports ferroviaires [Baudesson,98].

Nous nous sommes intéressés aux modes dégradés de ces interrupteurs en simulant des court-circuits de façon qualitative ou idéalisée. La représentation des interrupteurs par des résistances binaires, faibles à l'état passant et fortes à l'état bloqué semble suffisante pour connaître l'effet du défaut sur le dispositif. Si on cherche à prédire les causes des court-circuits, un modèle plus affiné de la cellule de commutation doit être choisi [Alonso,96].

Deux scénarios différents sont considérés :

- le *court-circuit symétrique*, c'est à dire celui d'un bras d'onduleur, donc du condensateur de filtrage. Ce défaut dégénère quasi instantanément en un « court-circuit triphasé » par l'intermédiaire des diodes de roue libre, c'est à dire en un court-circuit des trois phases de la machine. Les conséquences du défaut sont indépendantes de l'instant où il se produit et de la topologie de l'onduleur à cet instant,
- le *court-circuit asymétrique*, c'est à dire celui d'un seul interrupteur. Au contraire du précédent, ses conséquences dépendent de la phase des signaux électriques et de la topologie de l'onduleur.

Plusieurs travaux [Retière,97] ont été réalisés sur l'analyse des effets du court-circuit symétrique. Il provoque une inversion brutale de couple suivi d'un dépassement important dont l'amplitude peut atteindre 8 fois le couple nominal sur une chaîne type BB36000. Une telle perturbation peut causer des dommages irréversibles et très coûteux sur la partie mécanique (rupture d'arbre de transmission, phénomène dit de « balourd tripode »,...). C'est la raison pour laquelle Alstom Transport et la SNCF ont lancé plusieurs campagnes d'essais expérimentaux sur des chaînes existantes. La comparaison de nos simulations avec les relevés d'essais sur une rame BB36000 (Figure 9) a contribué à valider nos modèles [Lochot,99]. En effet, pour 9 essais enregistrés en différents points de fonctionnement, nous avons constaté un écart relatif moyen voisin de 5% entre simulations et expérimentations, concernant la pointe de couple de court-circuit.

Cette étude a également permis d'examiner l'influence de certaines grandeurs électromagnétiques sur les fonctionnements lors des courts-circuits. Ainsi, on montre que la valeur maximale atteinte par le couple est proportionnelle au carré du flux imposé en référence à la commande vectorielle, ce qui est tout à fait logique compte tenu de son expression théorique. Comme on pouvait également l'attendre, cette amplitude maximale est inversement proportionnelle à l'inductance de fuites totales responsable des modes rapides du moteur. Par contre, la vitesse du train n'influe que légèrement sur le défaut et le niveau de couple imposé avant l'apparition du court-circuit est indifférent. Enfin, les grandeurs mécaniques et leur paramétrage (conditions d'adhérence) n'ont que très peu d'effet sur l'amplitude maximale de ce couple de court-circuit et n'interviennent que sur la forme et le temps

de relaxation du défaut. Cette conclusion, valable pour une chaîne de transmission souple, peut être différente pour une transmission plus rigide. Cette simple remarque peut à elle seule justifier l'approche globale (« système ») de la conception des chaînes de traction.

Lors d'un court circuit symétrique, le niveau de magnétisation dans le moteur est toujours inférieur ou égal à celui imposé avant le défaut. Ainsi, le modèle saturé du moteur n'est pas indispensable. Au contraire pour un court circuit asymétrique, il est impératif de tenir compte de la saturation en raison de l'augmentation brutale du niveau de magnétisation. On peut dans ce cas parler d'« interactions électriques – magnétiques – mécaniques ».

Cette perturbation est plus délicate à analyser car ses effets dépendent de la topologie de l'onduleur et de la phase des signaux. Dans le pire des cas, ce défaut provoque un surcouple sensiblement supérieur à celui entraîné dans les mêmes conditions par un court circuit symétrique. Enfin, il est intéressant d'imaginer la gestion de tels défauts (symétrisation du défaut, arrêt de l'onduleur,...). Pour cela, la prise en compte du temps de défaut, depuis son occurrence jusqu'à son traitement, des temps de retard à l'amorçage et au blocage ainsi que des temps minimaux de commutation est fondamentale.

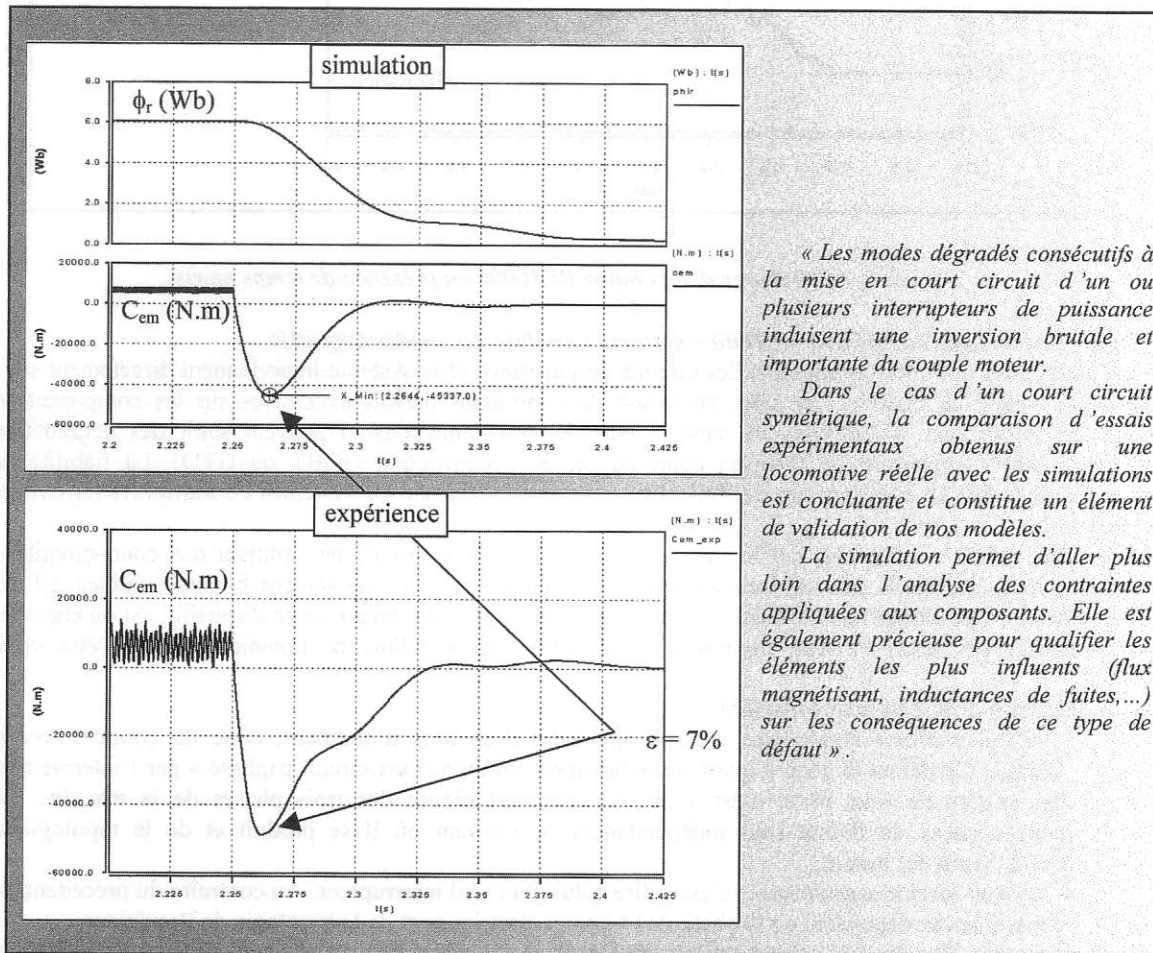


Figure 9 : transitoire de couple moteur suite au court circuit d'un bras d'onduleur (CC symétrique)

5.- Conclusion

L'étude présentée ici et détaillée dans [Lochot,99], [Pena,99] est particulièrement utile pour la remise en cause de certains choix de structures ou de dimensionnement sans entraîner un surcoût excessif de la conception du système. Ainsi, certaines chaînes de traction comme celles de l'Eurostar ont été retouchées après analyse du problème, afin de tenir compte des défauts de court circuit.

Les modèles développés au cours de ce travail ont été implantés sur le logiciel Saber et sont utilisés par Alstom Transport pour faire le choix des structures et du dimensionnement dès les premières phases de conception. Au Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique Industrielle, ils permettent de développer différents travaux de thèse sur la commande de systèmes de traction multimachines. Les modèles électromécaniques sont ainsi repris et adaptés pour caractériser différentes structures de contrôle (maître-esclave, moyenne,...) et pour étudier le problème de la reconstitution des états non mesurables (flux magnétique) sur des structures multimachines [Escané,99].

Les résultats, présentés dans cet article, montrent l'intérêt d'une modélisation globale pour rendre compte de manière exacte des phénomènes d'interactions entre les différentes parties du système. Seule cette approche systémique permet de dimensionner correctement la chaîne de traction alors qu'une autre approche amènerait à des solutions où la stabilité et la fiabilité de fonctionnement ne seraient pas assurées. Cependant, même si la puissance de calcul et les outils informatiques actuels nous autorisent le « luxe » de représenter de tels systèmes dans leur globalité, il reste que le choix des modèles et leur adéquation avec l'analyse à effectuer demeure fondamentale.

Bibliographie

- [Alonso,96] C. ALONSO, X. ROBOAM, T. A. MEYNARD, "Modélisation d'une chaîne de traction permettant l'étude des causes de défauts de l'onduleur et des conséquences sur le système", EPF'96, Grenoble, 16 - 18 Décembre 1996.
- [Baudesson,97] P. BAUDESSON, F. RICHARDEAU, T. MEYNARD, "Caractérisation du convertisseur multicellulaire série en présence de défauts de commutation", EPF'98, Belfort, Décembre 1998.
- [Blaschke,72] F. BLASCHKE, "The principle of field orientation as applied to the new transvector closed-loop control system for rotating field machine", Siemens review 34, May 1972.
- [Borne,92] P. BORNE, G. DAUPHIN TANGUY & al, "Modélisation et identification des processus, tome 2, Col Méthodes et pratiques de l'ingénieur, ISBN 2 7108 0615.
- [Chapoulie,99] P. CHAPOULIE, "Modélisation systémique pour la conception de véhicules électriques multi-sources", thèse de doctorat de l'INP de Toulouse, 1999.
- [Delemontey,95] B. DELEMONTÉY, "Contribution à la commande des entraînements asynchrones de forte puissance ; application au problème de traction", Thèse de doctorat de l'INP de Lorraine, 1995.
- [Escané,99] P. ESCANÉ, C. LOCHOT, M. PIETRZAK-DAVID, B. DE FERNEL, *Electromechanical interactions in a high speed railway traction system - Comparison between two drive control structures*, EPE'99 Conference, Lausanne, September 1999.
- [Jacquot,95] B. JACQUOT, "Conception, étude et réalisation des algorithmes de commande des systèmes de traction asynchrones pour les TGV nouvelle génération", Thèse de doctorat de l'INP Toulouse, 1995.
- [Jeunesse,98] A. JEUNESSE, M. DEBRUYNE, "La BB36000 : la locomotive multitenion européenne", Revue REE N°9, Octobre 1998.
- [Kasmieh,98-a] T. KASMIEH, "Modélisation et caractérisation de la saturation magnétique des machines asynchrones en vue de la commande", Thèse de Doctorat de l'INPT, 9 Septembre 1998, Toulouse.
- [Kasmieh,98-b] T. KASMIEH, Y. LEFEVRE, X. ROBOAM, J. FAUCHER, "Establishment of a two phase non linear simulation model of the dynamic operation of the induction machine, European Physics Journal, Janvier 1998, pp 57-66.
- [Lacôte,TI] F. LACÔTE, M. PROVOOST, C. COURTOIS, V. SABATE, "Dossier sur la traction électrique ferroviaire".
- [Lancien,98] D. LANCIEN, "L'évolution de la traction ferroviaire ; les récents développements techniques", techniques de l'ingénieur, p D5500, D5501, D5502.
- [Lochot,97] C. LOCHOT, X. ROBOAM, B. DE FERNEL, F. MOLL, "High speed railway traction system modelling for simulating electromechanical interactions", WCRR'97, November 1997, Firenze.
- [Lochot,99] C. LOCHOT, "Modélisation et caractérisation des phénomènes couplés dans une chaîne de traction ferroviaire asynchrone", Thèse de doctorat de l'INP Toulouse, 1999.
- [Pena,99] R. PENA, "Etude du fonctionnement d'un système bi-machine asynchrone de traction ferroviaire; étude des phénomènes dus à un décolllement de pantographe et à l'introduction des temps morts", Rapport de DEA de l'INP Toulouse, 24 Juin 1999.
- [Retière,97] N. RETIERE, L. GERBAUD, D. ROYE, "Modelling and simulation of induction motor drive under inverter fault operation", 2.749, EPE'97 Trondheim, Norway, Septembre 1997.
- [Roboam,95] X. ROBOAM, M. FADEL, B. DAGUES "Interaction convertisseur statique - machine asynchrone. Illustration à l'aide des logiciels POSTS", Revue 3EI, Mars 1995.
- [Roboam,96] X. ROBOAM, B. DAGUES, P. AZEMA, M. PROVOOST (SNCF), "Electromechanical behaviour of a traction drive with short circuits defects on VSI switches", ELECTRIMACS'96, St Nazaire, Septembre 1996.
- [Steimel,96] A. STEIMEL, "Electric Railway Traction in Europe, A Survey of the state of art", IEEE, 0-7803-3334-9/96, 1996.
- [Thomas,99] J.L. THOMAS, "Commande des Machines à Courant Alternatif, Vol I chapitre 2 : Problématique industrielle", Traité des Systèmes pour l'Ingénieur, éditions Hermès, 1999.

DETERMINATION EXPERIMENTALE DE L'INDUCTANCE D'UN BUS-BAR, améliorations apportées à la commutation des IGBT

Daniel ROGER
Hervé ROISSE
LSEE - Université d'Artois
Technoparc Futura
62400 BETHUNE

Duong CHADUC NGUYEN
Luc PAVY
Société AUXEL
ZI de la Barre
59147 GONDECOURT

Résumé

Les convertisseurs électroniques modernes utilisent des composants de plus en plus rapides dans une gamme de puissance de plus en plus élevée. Dans ce contexte, l'influence des caractéristiques électriques du système d'interconnexion des composants n'est plus négligeable. Cet article propose une méthode de mesure de l'inductance du bus bar et compare les résultats avec ceux obtenus en utilisant un système de barres de cuivre. L'observation des commutations met l'accent sur l'influence des caractéristiques électriques du système de connexion sur les surtensions et les surintensités obtenues lors de l'ouverture et de la fermeture de l'interrupteur électronique. Enfin, la partie expérimentale met en évidence l'apport du bus bar en ce qui concerne les contraintes supportées par les composants lors des commutations.

I Introduction

Les semi-conducteurs de puissance présentent des performances sans cesse croissantes. En effet, les pertes par conduction diminuent, les fréquences des commutations sont de plus en plus élevées associées à des fronts de plus en plus raides. Parallèlement, des progrès importants ont été accomplis dans la miniaturisation des composants et dans l'intégration de fonctions intelligentes.

Cependant, la course à l'amélioration des puissances massiques et volumiques des équipements est freinée par les dimensions des composants passifs (les systèmes d'interconnexions, les condensateurs, les circuits magnétiques, ...).

Dans cet article, nous nous proposons d'étudier l'impact de la fonction d'interconnexion sur les performances exploitables des IGBT selon la technologie d'interconnexion utilisée. Dans le cadre de cette étude, nous comparerons les inductances de deux systèmes de liaison entre un condensateur et un IGBT ainsi que les conséquences induites.

Ces travaux sont à l'initiative de la société AUXEL qui souhaite améliorer la caractérisation de son produit bus bar. Ils ont été menés en collaboration avec le Laboratoire des Systèmes Electrotechniques et Environnement (LSEE) de l'Université d'Artois.

Dans une première partie, le jeu de barres en cuivre présenté à la figure 1 est étudié. Il sert de liaison électrique et mécanique entre un condensateur et un IGBT. Il est constitué de trois barres uniformément espacées et posées sur une même surface. Des perçages ont été effectués de manière à assurer la connexion des composants (IGBT, capacité, charge).

Dans la deuxième partie, le bus bar de la figure 2 est étudié. Le bus bar est un système de connexion multicouche constitué de trois plaques de cuivre (plaque +, plaque -, plaque de sortie) isolées entre elles par des feuilles isolantes de polyester. Etant donné la faible épaisseur des feuilles isolantes, la section offerte au flux produit par les courants est réduite. Cette disposition multicouche permet d'obtenir une inductance de câblage de très faible valeur.

Des mesures ont été réalisées sur les bus bars avec des épaisseurs d'isolant de 0,2 ; 0,4 ; 1 ; 2,4 et 5 mm. Comme pour les barres, les plaques de cuivre, de 1 mm d'épaisseur, sont percées pour assurer la connexion des composants (IGBT, capacité, charge).

A l'une des extrémités du jeu de barres et du bus bar, la connexion de l'IGBT peut être réalisée pour cinq positions différentes permettant de faire varier sa distance par rapport au condensateur lors de la mesure d'inductance. A l'autre extrémité, des connexions pour l'alimentation et la charge sont prévues. Diverses connexions servent aux branchements des capacités. Parfois la mise en série de deux capacités est nécessaire afin d'assurer une tenue en tension suffisante pour le montage.

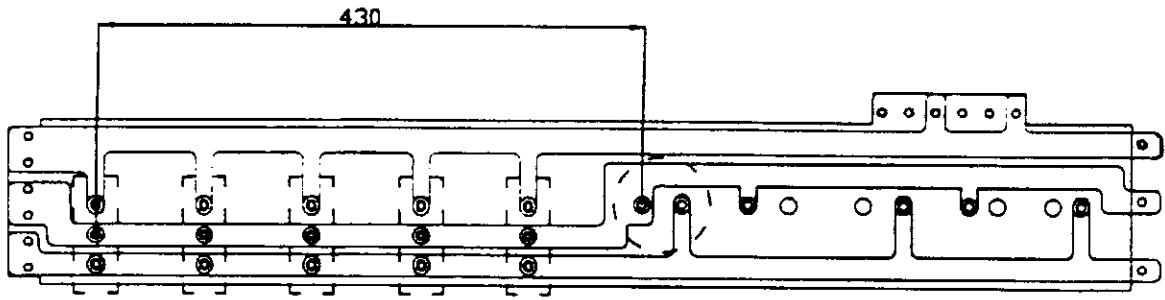


Figure 1
Jeu de barres en cuivre

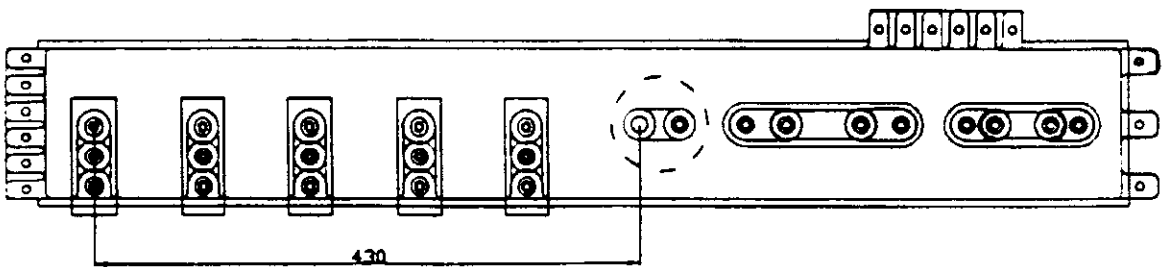


Figure 2
Bus bar multicouche

II Détermination des inductances

II.1 Banc de test

Pour mesurer les inductances du jeu de barres et du bus bar, un banc de test a été mis au point. Celui-ci est constitué de deux parties : la première concerne directement le jeu de barres ou le bus bar avec leur alimentation sous tension variable et la deuxième est plus directement dédiée à la commande du composant d'électronique de puissance nous permettant d'envoyer des impulsions sur ce bus. Le composant utilisé est de type IGBT. De manière à s'affranchir de tous les problèmes d'oscillations parasites dus aux boucles de masse, la commande des IGBT est totalement autonome et possède sa propre alimentation à partir de batteries (isolation totale). Dans cette même optique, une isolation galvanique de l'alimentation de la partie puissance du banc de test vis à vis du réseau est réalisée.

De manière à prendre en compte uniquement les inductances du jeu de barres ou du bus bar, l'alimentation du circuit puissance s'effectue directement aux bornes des capacités connectées au système étudié. Le banc de test adopte la configuration présentée à la figure 3.

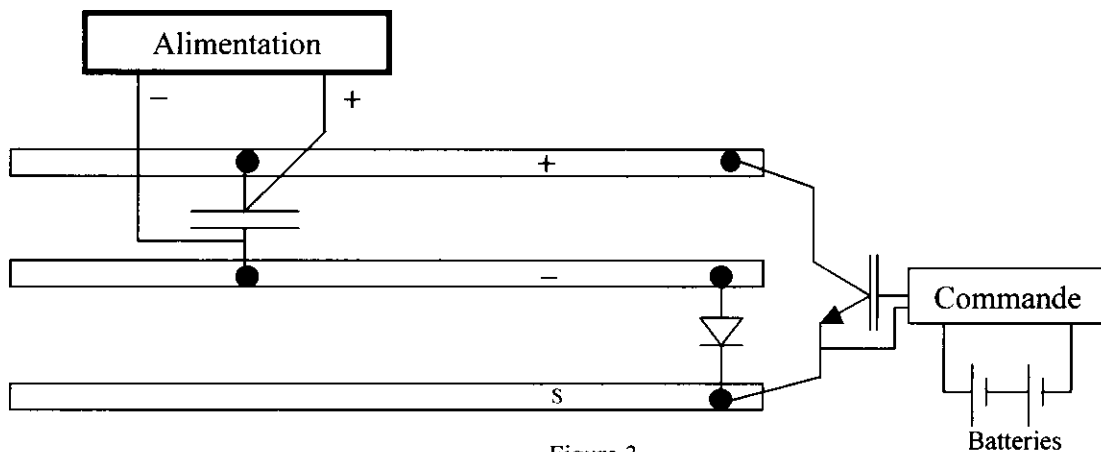


Figure 3
Description du banc de test

II.2 Principe de mesure de l'inductance

L'inductance mesurée est celle des deux barres ou plaques d'alimentation (+ et -), là où les courants varient rapidement en fonctionnement normal. Le montage est alimenté, comme le montre la figure 4, sous tension réduite, car la diode de roue libre est directement court-circuitée par un barreau de cuivre.

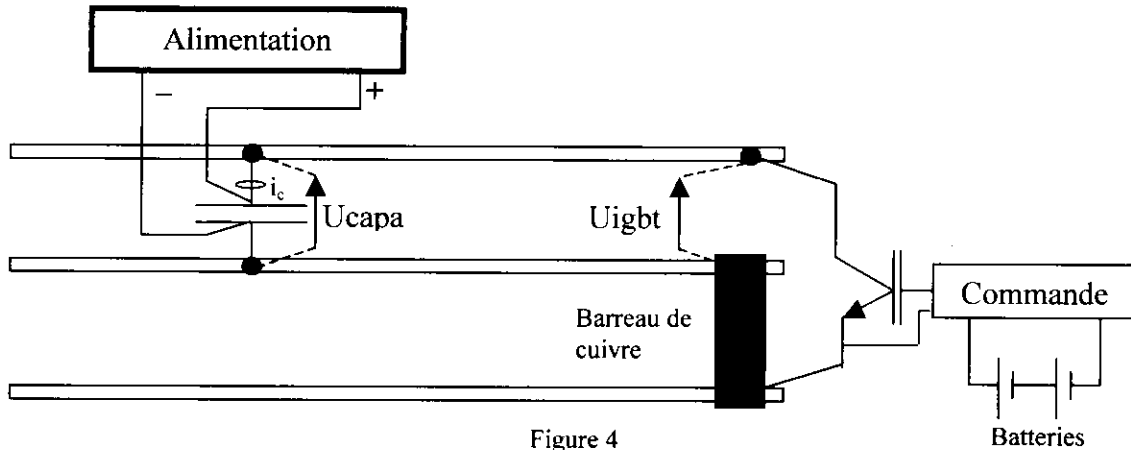


Figure 4
Description du banc de test

La mesure du courant i_c , consommé par le montage, s'effectue au niveau de la capacité par une sonde de courant large bande (100 MHz) placée autour de l'entretoise de connexion du condensateur. La détermination de l'inductance globale du jeu de barres ou du bus bar est fondée sur la loi suivante :

$$U = L \frac{di_c}{dt}$$

La figure 5a montre l'évolution du courant (i_c) et de la tension aux bornes de l'IGBT (U_{igbt}) en fonction du temps. Pendant la phase de montée du courant, la tension U_{igbt} peut être considérée comme constante comme le montre la figure 5b.

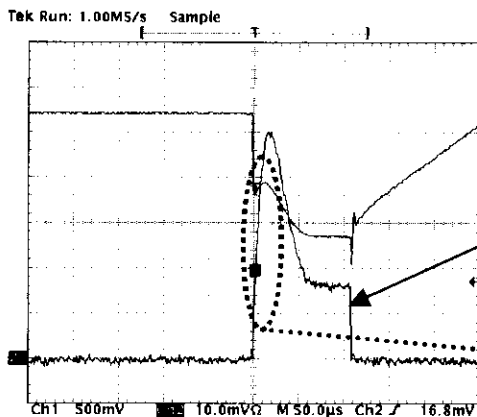


Figure 5a
Tension aux bornes de l'IGBT et courant absorbé par le montage

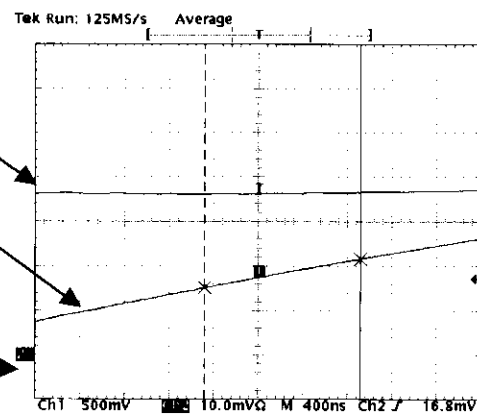


Figure 5b

Par l'intermédiaire du relevé de deux tensions, une aux bornes de l'IGBT et du barreau de cuivre (U_{igbt}) et l'autre aux bornes de la capacité (U_{capa}), ainsi que la variation du courant (i_c) dans la charge, l'inductance est déterminée par :

$$L = (U_{capa} - U_{igbt}) * \frac{\Delta t}{\Delta I_c}$$

II.3 Mesure de l'inductance d'un jeu de barres de cuivre

Une fois le banc de test mis au point et la méthodologie de mesure validée, nous avons mesuré les inductances d'un jeu de barres de cuivre pour différentes distances entre le condensateur et l'IGBT. La méthode de mesure employée est celle décrite précédemment. La figure 6 donne l'évolution de l'inductance en fonction de la distance entre le condensateur et l'IGBT.

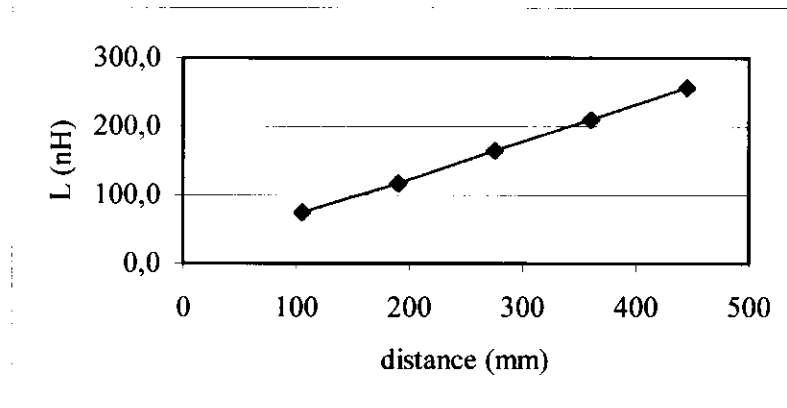


Figure 6

Evolution de l'inductance du bus en fonction de la distance entre le condensateur et l'IGBT

L'évolution de l'inductance L en fonction de la distance entre le condensateur et l'IGBT est quasiment linéaire et tend vers zéro pour une distance nulle. L'inductance linéique de ce jeu de barres de cuivre est de 580 nH/m.

II.4 Mesure des inductances du bus bar

Nous présentons ici les mesures de l'inductances du bus bar pour différentes distances entre le condensateur et l'IGBT et différentes épaisseurs d'isolant. L'évolution de l'inductance du bus bar en fonction de la distance est donnée à la figure 7.

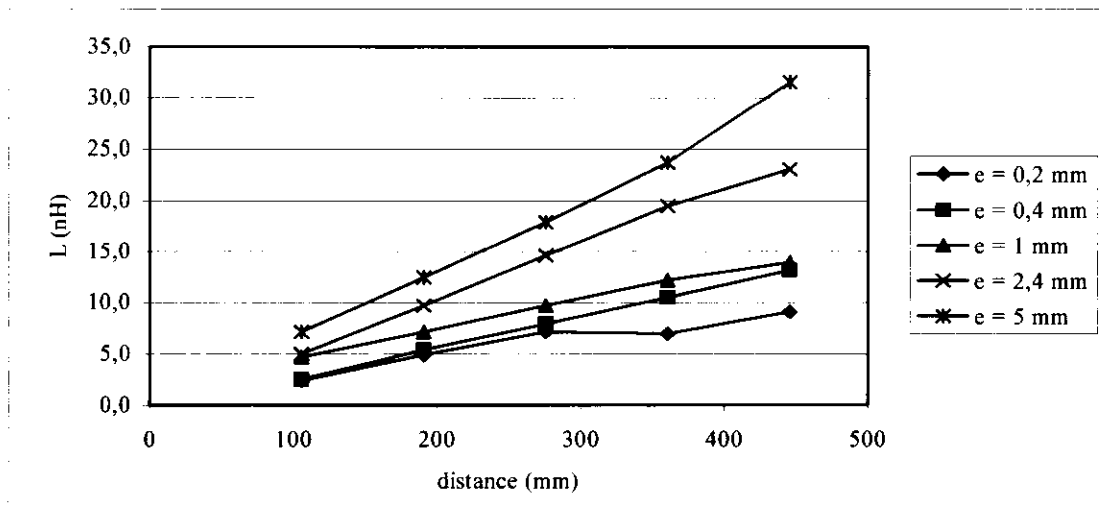


Figure 7

Evolution de l'inductance du bus en fonction de la distance entre le condensateur et l'IGBT pour différentes épaisseurs d'isolant

L'inductance du bus bar augmente en fonction de l'épaisseur (e) des isolants. Nous pouvons remarquer que, pour une position donnée, l'inductance du jeu de barres en cuivre est de 8 à 28 fois plus élevée que celle d'un bus bar pour des épaisseurs d'isolant respectives de 5 à 0,2 mm. La figure 8 donne la comparaison des inductances d'un jeu de barres classique et celle d'un bus bar pour différentes positions et épaisseurs d'isolant.

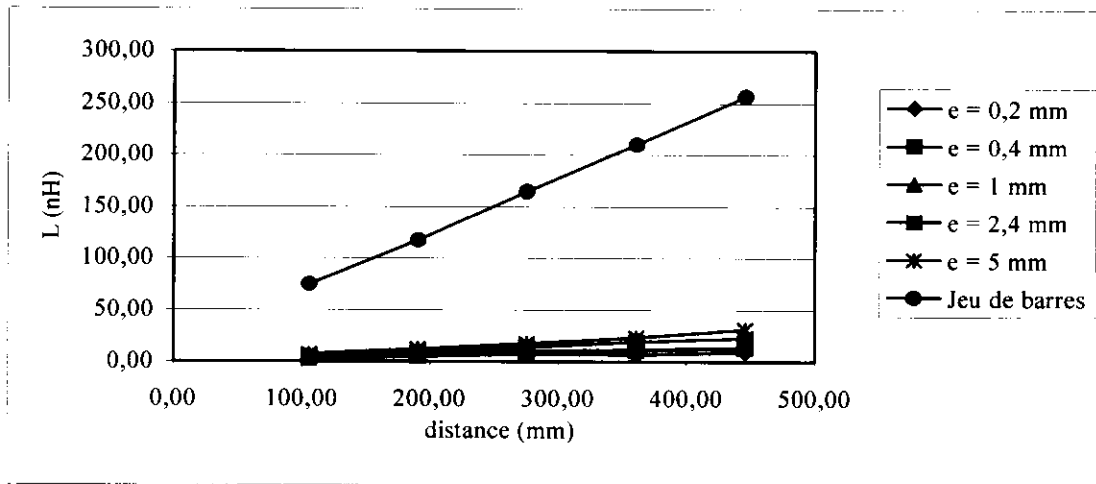


Figure 8
 Comparaison entre l'inductance d'un jeu de barres et celle d'un bus bar

Il est possible d'obtenir une formule théorique simple pour estimer l'inductance linéique d'une connexion formée de deux conducteurs plans en cuivre séparés par une feuille isolante de perméabilité μ_0 . Le calcul du flux embrassé par les deux conducteurs plans parcourus par des courants en sens inverse n'est simple qu'en appliquant les hypothèses suivantes :

- l'effet de peau est négligé,
- le courant est réparti uniformément dans chaque conducteur plan,
- le champ magnétique est supposé uniforme, les effets observés au bord des conducteurs sont négligés.

Dans ces conditions l'inductance L de la connexion plane est donnée par :

$$L = \mu_0 \frac{(e_c + e)l_0}{l_a}$$

où l_0 désigne la longueur de la connexion, l_a sa largeur, e_c l'épaisseur des plaques de cuivre et e celle de l'isolant séparant les deux plaques de cuivre.

En considérant la géométrie du bus bar expérimental ($l_a=120$ mm, $e_c=1$ mm), on obtient une inductance linéique de 20,9 nH/m pour un isolant de 1 mm d'épaisseur. La valeur expérimentale est plus élevée (32 nH/m) car les hypothèses simplificatrices ne sont pas toutes respectées. L'effet de peau n'est pas négligeable, la densité de courant n'est pas constante sur toute la largeur du bus bar à cause des trous de fixation des composants. Cette formule permet cependant de donner l'ordre de grandeur de l'inductance linéique du bus bar.

Les inductances de câblage provoquent une surtension aux bornes des composants, lors du blocage, pouvant engendrer leur destruction par dépassement de sa tension de claquage. Une des premières préoccupations des utilisateurs de systèmes de câblage est de connaître la valeur de leur inductance. L'avantage du bus bar sur le jeu de barres classique, au niveau de ce paramètre, est indéniable.

III Observation des commutations

La figure 9 représente le schéma du dispositif expérimental. Le transistor et la diode font partie d'un bras d'onduleur type SKM50GB dont le second transistor est maintenu à l'état bloqué. L'IGBT est commandé par un circuit spécialisé standard, imposant un rapport cyclique de 15%, alimenté par des batteries afin d'assurer une isolation totale de la partie commande.

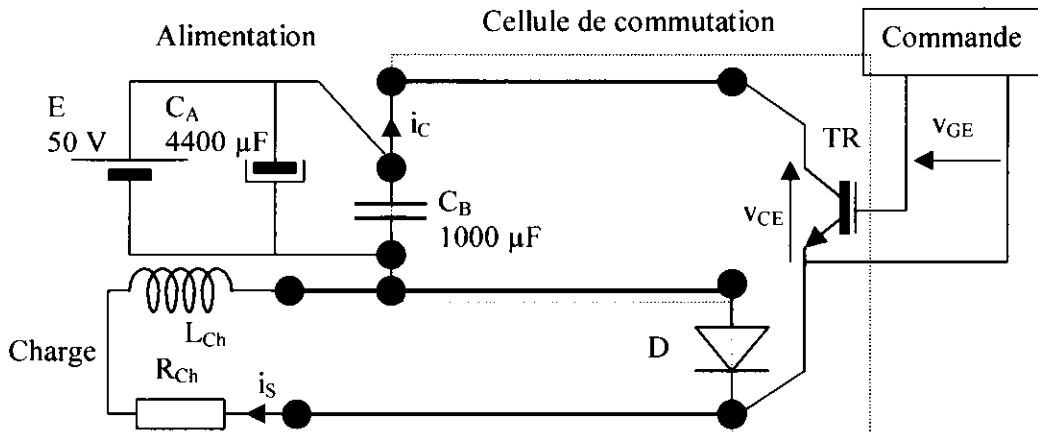


Figure 9
Dispositif expérimental

La cellule de commutation est constituée du bras d'onduleur associé à son système de connexion. Le condensateur C_A , de technologie électrochimique standard, est câblé avec des fils de connexion classiques. Il a pour but de limiter la chute de tension de l'alimentation pendant la conduction de l'IGBT. La véritable source imposant la tension d'entrée de la cellule de commutation est matérialisée par le condensateur C_B de type polypropylène métallisé à hautes performances et à faible inductance série de la société S.C.R. Ce condensateur est vissé sur les barres de connexion par l'intermédiaire d'entretoises en laiton de 30mm qui laissent la place nécessaire à la sonde de courant qui mesure i_C . Les points noirs dessinés sur la figure 9 représentent les vis ou écrous de fixation des composants sur les barres de cuivre. La figure 10 montre les formes d'ondes du courant de sortie i_S , du courant collecteur i_C , de la tension de commande V_{GE} et de la tension V_{CE} aux bornes de l'IGBT sur une échelle des temps montrant une période entière.

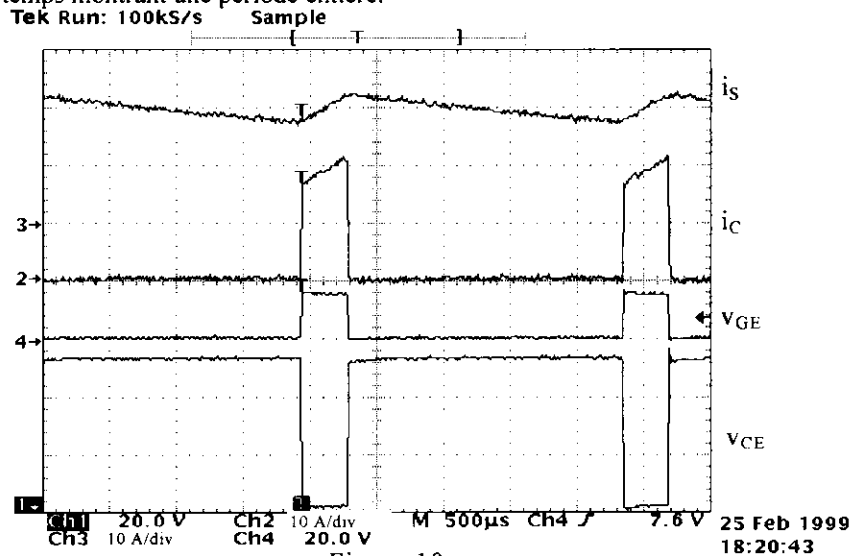


Figure 10
Formes d'ondes des courants i_S , i_C et v_{ce}

Cette figure permet de situer les conditions d'essai :

- tension d'alimentation $E=50V$,
- valeur moyenne du courant de sortie $I_S=18A$,
- fréquence $f=400 Hz$.
- Distance entre le condensateur SCR et l'IGBT $d=445mm$

Les commutations sont observées en dilatant la base de temps de l'oscilloscope.

III.1 Etude des commutations du jeu de barres

III.1.1 A la fermeture de l'IGBT

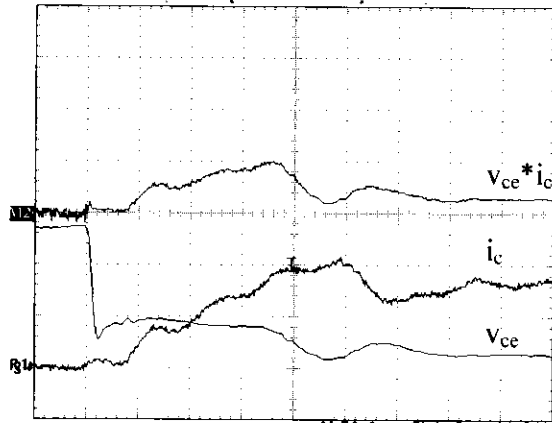
Lors de la fermeture, il est intéressant d'estimer l'énergie perdue dans le transistor. Cette énergie est issue du calcul de la surface sous la courbe représentant le produit de la tension à ses bornes (v_{ce}) et du courant le traversant (i_C). Au moment de la commutation, le courant i_C évolue relativement lentement vers sa valeur finale

sans admettre de surintensité. Pendant ce temps, la tension v_{ce} évolue rapidement vers sa valeur finale comme le montre la figure 11.

L'énergie dissipée à la fermeture est égale à 126 μ J.

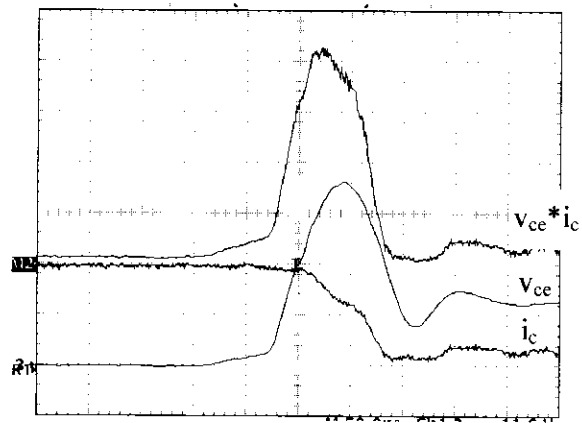
III.1.2 A l'ouverture de l'IGBT

Les évolutions de la tension v_{ce} , du courant i_c et de leur produit lors de l'ouverture de l'IGBT sont présentées à la figure 12.



v_{ce} : 20 V/div, i_c : 10 A/div, $v_{ce} * i_c$: 500 VA, t : 50ns
Figure 11

Commutation à la fermeture



v_{ce} : 50 V/div, i_c : 10 A/div, $v_{ce} * i_c$: 1000 VA, t : 50ns
Figure 12

Commutation à l'ouverture

La tension v_{ce} admet un dépassement ou une surtension de 200 % par rapport à sa valeur finale. Cette contrainte nécessite de prévoir un IGBT pouvant supporter cette surtension, afin d'éviter sa destruction. Ceci montre l'effet de l'inductance du jeu de barres connecté aux bornes de l'IGBT.

L'énergie dissipée à l'ouverture est égale à 456 μ J.

III.2 Etude des commutations avec le bus bar

L'épaisseur des isolants du bus bar pour cette étude est de 2,4 mm. Comme pour le jeu de barres classique, il est intéressant d'observer les commutations, d'en déterminer les contraintes sur les composants, ainsi que l'énergie perdue durant chaque commutation. Le circuit de commande de l'IGBT est identique à celui utilisé précédemment.

III.2.1 A la fermeture de l'IGBT

Comme lors de l'étude du jeu de barres classique à la fermeture du transistor, l'estimation de l'énergie perdue au niveau du transistor ainsi que les évolutions temporelles du courant i_c et de la tension v_{ce} (figure 13) sont intéressantes.

Nous pouvons remarquer une légère pointe en courant lors de la fermeture due à l'impédance caractéristique du montage et au recouvrement inverse de la diode.

L'énergie dissipée à la fermeture est égale à 176 μ J.

III.2.2 A l'ouverture de l'IGBT

Comme à la fermeture, il est intéressant d'observer l'évolution de la tension v_{ce} et du courant i_c . La tension v_{ce} admet un dépassement ou une surtension de 60% par rapport à sa valeur finale (figure 14).

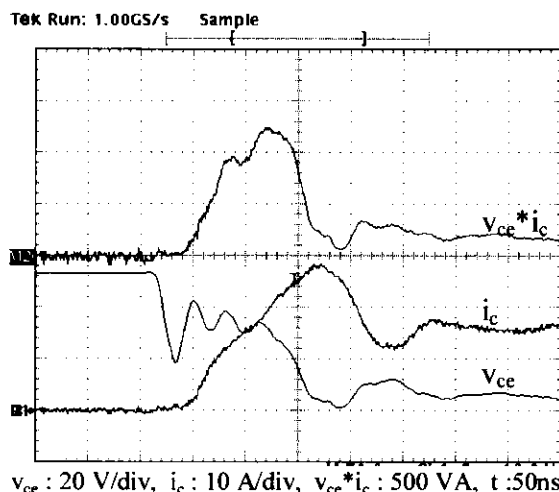


Figure 13

Etude de la commutation à la fermeture

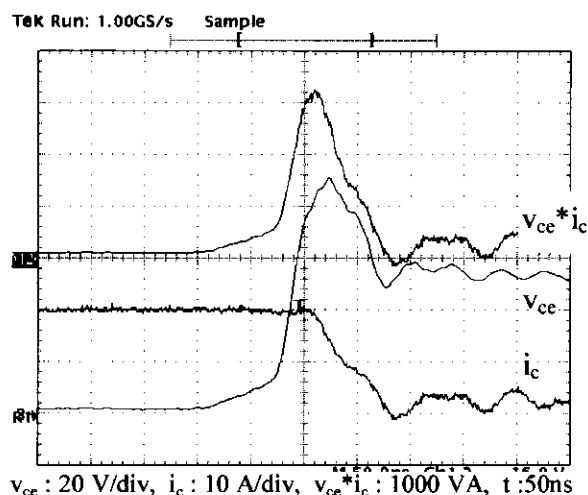


Figure 14

Etude de la commutation à l'ouverture

Les courbes v_{ce} et i_c des oscillogrammes des figures 11 et 13 permettent d'estimer l'inductance globale de la maille de commutation en mesurant la pente de la croissance du courant i_c et la chute de tension correspondante. On obtient une valeur voisine de 350 nH pour le jeu de barres classique et de 90 nH pour le bus bar. Ces valeurs sont plus élevées que celles données au paragraphe II car elles prennent en compte l'inductance parasite du condensateur d'entrée et celle du module IGBT. Ces mesures montrent que la somme de ces deux inductances parasites des composants du montage expérimental est voisine de 65 nH.

Avec le bus bar, l'inductance parasite d'un composant n'est plus négligeable devant celle des connexions et sa valeur devient un critère de choix important.

Cet essai montre que la tension v_{ce} admet une surtension de 60% par rapport à sa valeur finale. Cette surtension est largement inférieure à celle créée lors de l'utilisation de jeu de barres classique qui était de 200%. Etant donné que cette surtension est plus petite, l'énergie dissipée à l'ouverture est plus faible et égale à 340 μJ , contre 456 μJ pour le jeu de barres de cuivre.

Sur ce type de commutation, l'avantage du bus bar sur le jeu de barres en cuivre est très net, car l'énergie perdue en commutation est plus faible. Aussi l'utilisation d'un bus bar permet d'utiliser un composant possédant une contrainte en tension plus faible, ou à composant égal d'en optimiser son utilisation.

Pour réduire cette surtension, un snubber est couramment utilisé. L'avantage du bus bar est d'utiliser un snubber plus petit et de limiter les pertes à l'ouverture, permettant d'avoir un coût de revient de l'installation plus faible.

IV Conclusion

Une méthode répétitive et fiable a été définie pour mesurer l'inductance du bus bar dans son environnement de travail, c'est à dire lorsque la tension aux bornes du lien continu d'entrée du convertisseur est maintenue constante par un condensateur polypropylène à hautes performances. Ces mesures ont montré que l'inductance du bus bar est nettement plus faible que celle obtenue par un système classique de connexions. Cette inductance est d'autant plus faible que les plaques de cuivre sont proches. Les mesures montrent que, pour des isolants de 0,2 mm d'épaisseur utilisables jusqu'à 1000 V, l'inductance du bus bar est 28 fois plus faible que celle du système classique de même taille.

Des essais comparatifs de commutations, réalisés avec des connexions classiques puis avec un bus bar ont montré la supériorité de ce dernier en considérant l'énergie perdue et les surtensions naturellement obtenues lors de la commutation à l'ouverture.

De par la facilité de sa commande, de ses performances de tension de blocage et de courant commuté, l'IGBT de forte puissance est de plus en plus utilisé dans des applications ferroviaires et de variation de vitesse en moyenne tension (autour de 4.16 kV). A ce niveau de tension, l'inductance de câblage est un paramètre déterminant sur la fiabilité et la puissance massique de l'équipement. Pour ces applications de forte puissance, l'utilisation du bus bar est techniquement obligatoire.

VHDL, UN LANGAGE EVOLUE DE PROGRAMMATION POUR L'ELECTRONIQUE NUMERIQUE.

Pierre JOUBERT
ENS Cachan

Résumé.

L'utilisation, en électronique numérique, de nouveaux composants (EPLD, FPGA, ASIC...) nécessite des moyens de conception adaptés à la taille des projets qu'ils permettent d'entreprendre. C'est pour cela que se sont développés des langages de description matériel (HDL : hardware description languages). Une tentative de normalisation de ces langages a conduit à la naissance de VHDL qui se présente aujourd'hui comme un outil quasi incontournable. Les raisons du développement de VHDL ainsi que les bases de ce langage sont présentées ici. Quelques exemples d'applications simples sont également proposés afin de concrétiser les notions exposées plus haut.

1 - Les langages « HDL »

1.1 - Nécessité d'une nouvelle approche.

La complexité croissante des projets réalisables avec les éléments de l'électronique numérique impose une approche systématique fortement structurée des problèmes. On dispose pour cela d'une panoplie d'outils spécialisés adaptés au niveau d'abstraction souhaité.

Les six niveaux d'approche traditionnellement considérés sont rappelés figure 1. A chaque niveau d'approche est lié un outil conceptuel préféré appartenant soit au domaine comportemental (niveaux d'abstraction élevés) soit au domaine structurel (lorsqu'on s'approche de la réalisation matérielle).

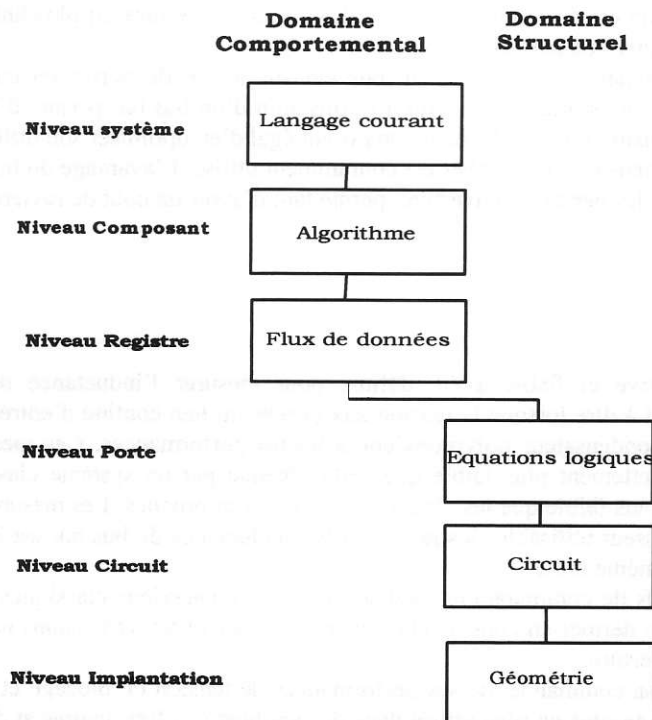


figure 1

Dans tous les cas les outils graphiques sont très utilisés même s'ils sont devenus notoirement insuffisants. La figure 2 permet de rappeler la nature de ces outils tout en précisant mieux à quoi correspondent les divers niveaux d'abstraction définis figure 1.

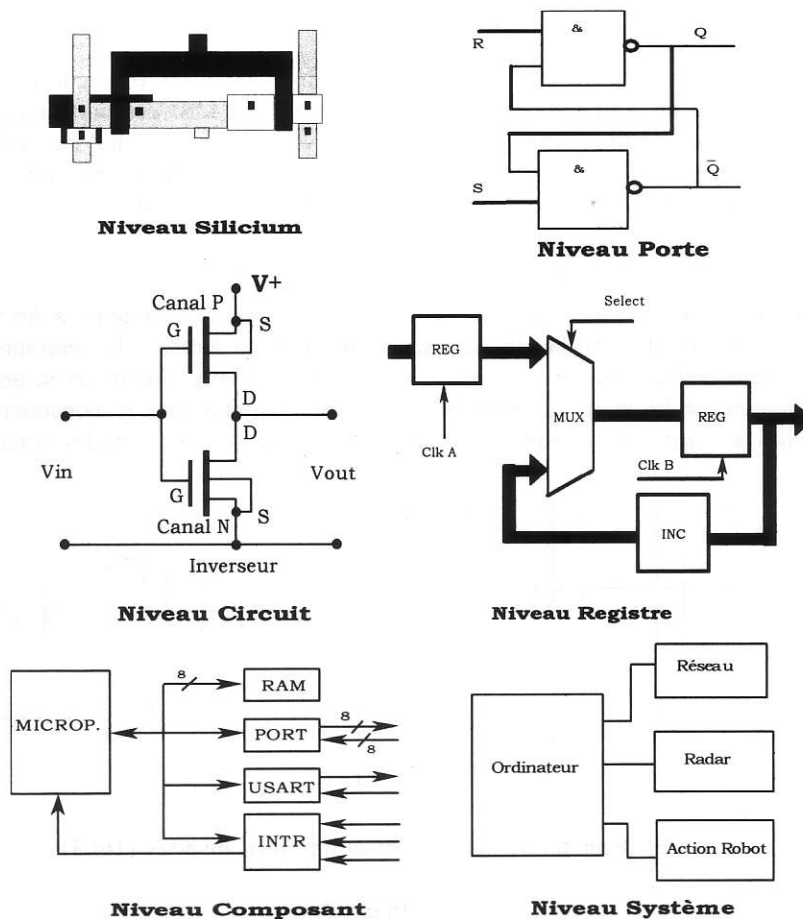


figure 2

L'observation de ces figures montre combien sont divers les points de vue sous lesquels on peut voir le contenu d'un même projet et combien peuvent être différents les moyens mis en œuvre pour les résoudre. On comprend mieux ainsi la nécessité de disposer d'un outil universel capable de décrire toutes les facettes d'un même projet et d'englober dans une même structure hiérarchisée toutes les informations contribuant à la description complète du projet.

1.2 - Une représentation unifiée universelle.

C'est ainsi que sont nés les H. D. L. (Hardware Description Language). Malheureusement les HDL ont d'abord été des langages « propriétaires » attachés à un constructeur et développés comme utilitaires nécessaires à la mise en œuvre de composants spécifiques (ASICS, PLD). Pour tenter de mettre de l'ordre dans la cacophonie qui en découlait le département de la défense des Etats-Unis a lancé dès 1983 un appel d'offres pour la définition d'un langage unique couvrant l'ensemble des besoins. Les premiers résultats utilisables industriellement ont vu le jour en 1985 et la première tentative de normalisation date de 1987. Ce n'est qu'à partir de 1991 que l'utilisation de l'outil ainsi conçu (normalisé sous l'étiquette IEEE1076) a pu sembler réaliste compte tenu de la progression des moyens de mise en œuvre disponibles et poussée par la multiplication des besoins.

VHDL¹ est un langage algorithmique de haut niveau fortement structuré et permettant une hiérarchisation des tâches suffisamment fine pour décrire complètement l'ensemble des divers niveaux de conception d'un projet. Il a été conçu dans le but de faciliter la communication inter-équipes lorsque la taille d'un projet impose la collaboration de nombreux acteurs répartis sur des sites géographiques éventuellement disjoints. Enfin, le langage étant indépendant des techniques de réalisation des projets et des constructeurs fournissant les éléments, il permet d'optimiser le choix des composants en fonction de critères aussi bien scientifiques qu'économiques.

De plus, il est indispensable de noter une possibilité fondamentale de cet outil dont l'importance est sans cesse croissante: l'inclusion des procédures de simulation et de tests dans la structure même de définition du projet. Cette caractéristique est l'une des idées fortes de VHDL car il est aujourd'hui impossible de dissocier les procédures de test de la conception même des circuits (JTAG : Joint Test Action Group).

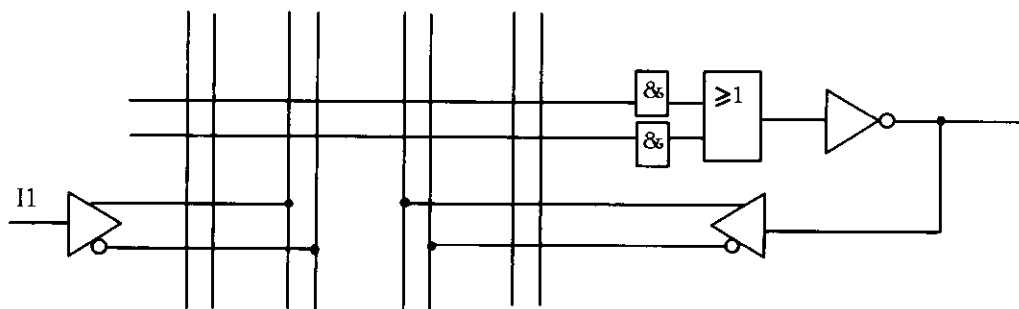
¹ VHDL est l'abréviation de « Very high speed integrated circuit Hardware Description Language »

2 - Les composants de l'électronique numérique

Il faut être bien conscient que l'électronique numérique n'est plus construite aujourd'hui à base d'éléments figés appartenant à une famille de composants SSI ou MSI comportant l'équivalent de quelques dizaines de portes de base. Il suffit d'examiner la carte mère d'un ordinateur ou d'un oscilloscope moderne pour s'en convaincre. S'il arrive de faire appel encore à un « 74HCxxx » cela ne doit plus être qu'exceptionnel. Après tout, les premiers PAL ont été commercialisés en 1979: faut-il encore en parler?

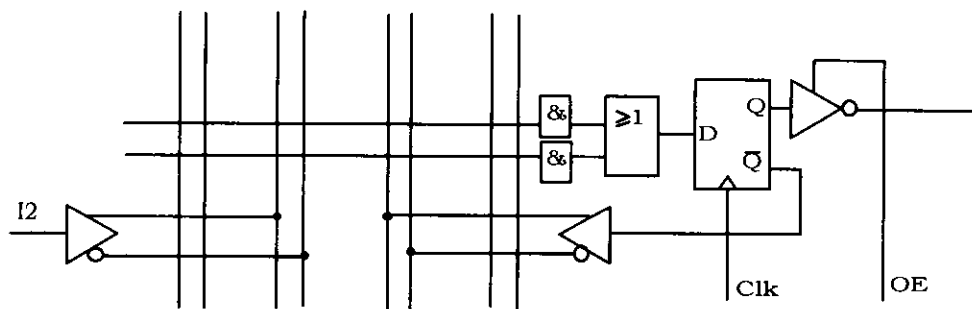
2.1 - Les circuits de la première génération (PAL).

Les PAL de la première génération utilisaient la technologie TTL associée à des réseaux de fusibles Ni-Cr. De ces circuits il reste aujourd'hui (hormis leur réputation de lenteur, de consommation excessive et de fiabilité précaire) leur architecture de base qui a servi de modèle aux circuits de la génération suivante. Les figures 3 et 4 représentent des modèles simplifiés des circuits combinatoires et séquentiels les plus typiques. On retrouve, multipliés à l'infini (ou presque !) ces deux structures typiques dans les circuits de conception plus récente.



Elément de structure combinatoire sortie inversée (16L8)

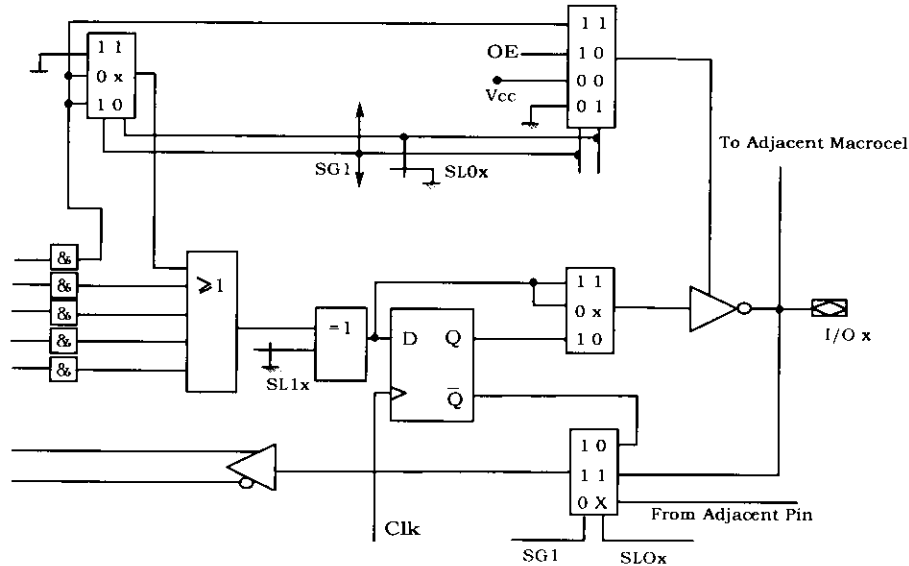
figure 3



Elément de structure à registre sortie inversée(16R8)

figure 4

Suite au développement des technologies CMOS d'une part et EEPROM d'autre part sont apparus les premiers circuits « génériques » (GAL) utilisant les technologies EPROM (effaçables aux ultraviolets) et EEPROM (effaçables électriquement). Les fusibles sont remplacés par des transistors MOS à porte isolée rendus conducteurs ou isolants par emprisonnement d'électrons dans l'épaisseur de la couche d'oxyde isolant la porte. La cellule de sortie est complexe car elle est conçue pour pouvoir émuler tous les types de PAL classiques. Cette cellule complexe (figure 5) s'appelle OLMC (Output Logic MacroCell).



Elément de structure d'un GAL 16V8: les bits de configuration SGx et SLx sont appliqués à 4 multiplexeurs.

figure 5

Le type le plus connu et le plus utilisé est le 22V10 dont la structure est voisine de celle du 16V8 . Il comporte 10 macrocellules et existe encore en boîtier dual in line facile à mettre en œuvre à petite échelle (T.P. élèves). Les GAL 16V8 et 22V10 nécessitent cependant un programmeur spécifique qui constitue un équipement supplémentaire pour le laboratoire

2.2 - Les « super PAL »: (PLD et EPLD).

La plupart des circuits programmables par l'utilisateur proposés aujourd'hui ont des structures élémentaires semblables à celles des PAL ou des GAL. Cependant les besoins sont devenus tels que le nombre de macro-cellules devient de plus en plus grand tandis que le nombre de broches d'entrée et sortie croît de la même façon.

Les circuits les plus classiques sont des superGAL programmables à l'aide d'un programmeur classique semblable à un programmeur d'EPROM . Les deux techniques d'effacement coexistent (dépendant du constructeur).

Parmi ces circuits une nouvelle génération se répand très vite. Ce sont les circuits programmables sur la carte. Cette technique permet d'éviter les manipulations des boîtiers à grands nombre de pattes et également le test direct de la carte une fois complète. Ils comportent en général une possibilité de lecture des registres internes afin de pouvoir faire un test complet même en cours d'utilisation. On peut donc programmer et relire le contenu d'un circuit directement sous 5V ou 3.3V sans disposer d'outil de programmation spécifique. On utilise directement le PC ayant servi à la conception muni d'un câble de connexion approprié.

- Exemples:**
- CYPRESS Ultra39512 EEPLD 512 macrocells boîtier 304 broches
f_{max} = 100 Mhz .
 - VANTIS(AMD) MACH5-512 512 macrocells, boîtier à billes
352 contacts. Circuit « in situ programmable ».
 - LATTICE ispLSI3256 12000 portes. 256 macrocells 512 bascules.

Tous les superGAL sont organisés en « banques » de macrocellules où sont groupées 4 à 8 cellules. Ces cellules sont reliées entre elles par un réseau complexe d'interconnexions croisées permettant un routage plus ou moins sophistiqué.

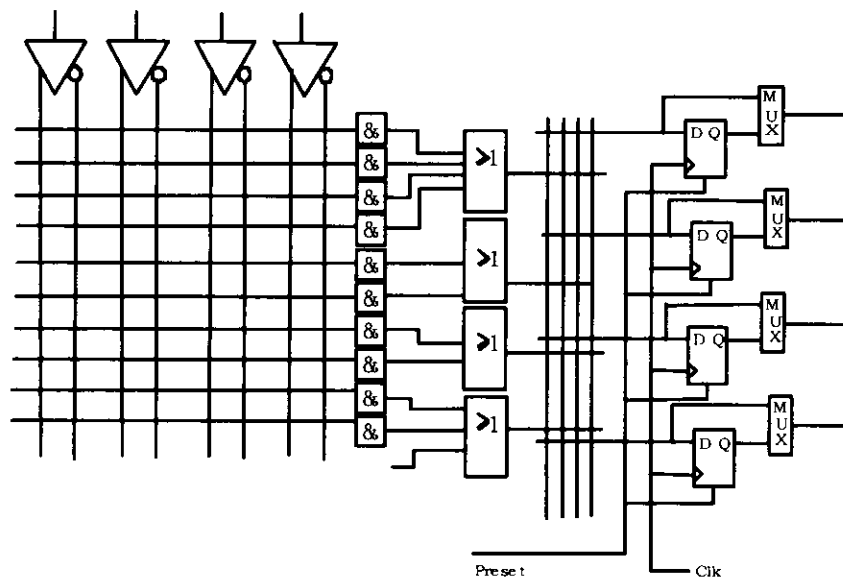
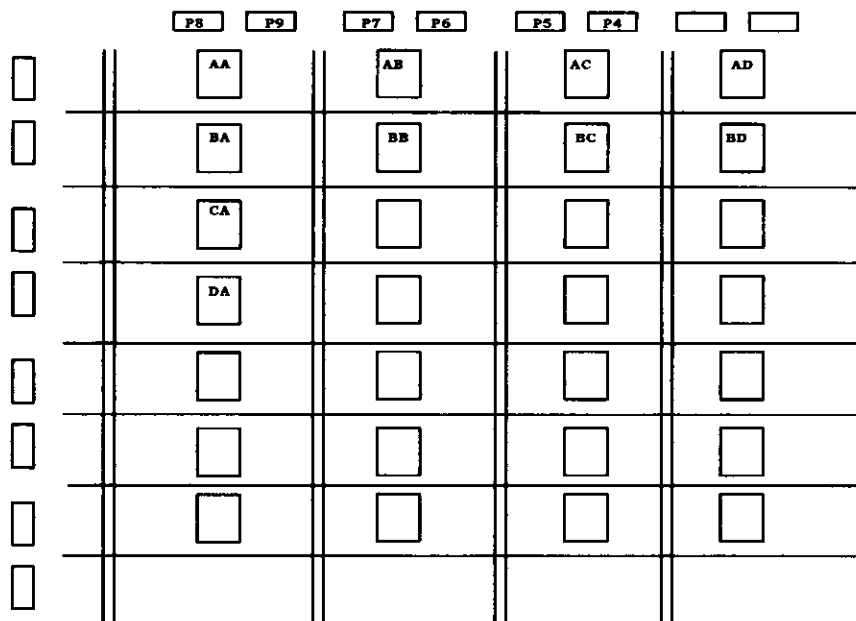


Schéma simplifié d'un GLB (Generic Logic Bloc) des « Isp » LATTICE
figure 6

2.3 - Les PGA et FPGA.

Les PGA ou FPGA sont aussi des circuits programmables par l'utilisateur mais ils sont construits sous forme de tableaux carrés de blocs logiques plus complexes que les macrocells des GAL. Les interconnexions ne sont plus groupées dans une matrice d'interconnexion globale mais sont distribuées sous forme de bus entre les blocs logiques.

Cette architecture convient mieux à la réalisation des fonctions comportant des opérations arithmétiques complexes. La structure super PAL étant mieux adaptée à la conception des machines à états. La différence essentielle, vue côté utilisateur est l'impossibilité de prévoir avec précision les temps de propagation à l'intérieur du boîtier car ces temps dépendent fortement du routage effectué.



Organisation générale d'un FPGA
figure 7

Une fois le routage effectué, le calcul peut être fait automatiquement par l'outil de conception. Ceci constitue cependant une difficulté supplémentaire que l'on peut éviter si on n'a pas besoin de la structure PGA. Les figures suivantes donnent une idée de l'organisation d'un FPGA (figure 7) ainsi que de l'allure du contenu d'un bloc logique (figure 8) et d'un bloc d'entrée-sortie (figure 9).

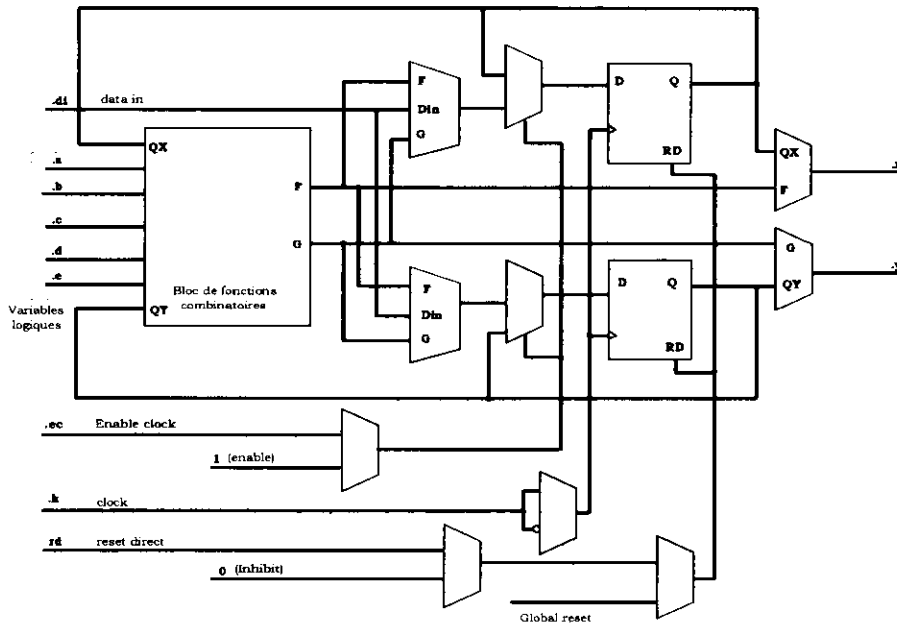


figure 8

Habituellement les interconnexions sont faites par des transistors actifs c'est à dire dont la polarisation est obtenue par une tension issue de l'alimentation. Il faut donc prévoir une autoconfiguration à chaque mise sous tension. Cette autoconfiguration peut-être faite à l'aide du contenu d'une petite ROM série associée au circuit à configurer.

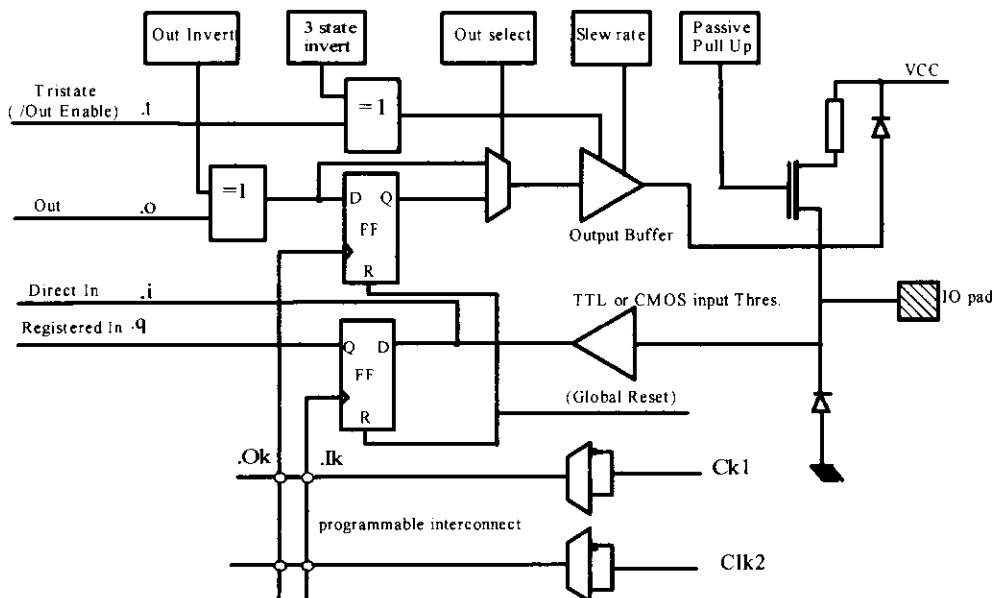


figure 9

3 - Les structures de base de VHDL

3.1 - Les entités (« design entity »).

En VHDL un circuit logique est représenté par une entité quelle que soit sa complexité (microprocesseur ou simple porte). Une entité comporte deux parties qui sont:

1 - la description de l'interface de l'entité avec le monde extérieur. C'est ce que l'on doit voir lorsqu'on regarde la boîte noire depuis l'extérieur.

```

Exemple:  entity DECOD_7 is
           port  ( D: in bit_vector(3 downto 0);
                 seg_A, seg_B, seg_C, seg_D, seg_E, seg_F, seg_G : out bit);
           end DECOD_7;
    
```

2 - la description du fonctionnement interne de la boîte. C'est l'architecture. Une entité peut comporter une ou plusieurs architectures. Les architectures peuvent avoir diverses formes. Comme toujours en informatique il n'existe pas un moyen unique de décrire une fonctionnalité.

3.2 - Les architectures (« architectural body »).

Les architectures décrivent le comportement interne des entités. Ces descriptions peuvent prendre plusieurs formes:

1 - Description structurelle: L'explication du fonctionnement d'un circuit complexe peut nécessiter la décomposition de sa description en plusieurs blocs de taille inférieure, eux-mêmes constitués de blocs de niveaux inférieurs. On réalise ainsi une sorte de description schématique utilisant des composants pouvant chacun être décrits par une entité et une (ou plusieurs) architecture(s) associée(s).

2 - Description comportementale: On décrira souvent le comportement d'un circuit par un algorithme dont la forme est indépendante du mode de réalisation du bloc considéré. C'est bien en effet le but d'un langage algorithmique comme VHDL que de décrire le fonctionnement des systèmes par des algorithmes. On peut être alors très éloigné des techniques mises en œuvre pour la réalisation ce qui ne nuit pas forcément à la précision de la description. Cette façon de faire laisse en effet toute la marge nécessaire au compilateur pour interpréter le cahier des charges en fonction des possibilités offertes par les composants choisis pour la réalisation.

3 - Description par flux de données: Le fonctionnement du circuit est décrit par les altérations successives que subissent les données dans leur progression depuis l'entrée vers la sortie. On peut comparer ce type de description à l'action d'une suite de couches de portes logiques (circuits combinatoires) disposées sur le chemin des données.

3.3 - Les blocs (« block ») et les processus (« process »).

Les blocs permettent de séparer des ensembles d'instructions dans lesquels l'exécution de certaines instructions est « gardée » par une condition qui n'en autorise l'exécution que si cette condition est remplie. L'existence de blocs n'est pas une condition fondamentale pour le bon codage de circuits simples.

Les processus par contre sont des éléments fondamentaux de la structure du langage. Ces sont les processus qui garantissent une authentique concurrence dans le déroulement d'un programme VHDL. Comme les blocs, les processus sont des ensembles d'instructions délimités. Ils sont constitués d'instructions écrites en séquence comme dans un langage algorithmique classique. La différence fondamentale vient du fait que le déclenchement de leur exécution est conditionnée

- soit par l'instruction **wait**

- soit par une **liste de sensibilité** dont les constituants sont des signaux variables au cours du temps et dont le changement de valeur lance l'exécution du processus.

3.4 - Les blocs d'entêtes (« package »).

Ce sont des ensembles de définitions de variables de fonctions ou de procédures conçus dans le style des « headers » du langage C. Leur inclusion à une entité se fait à l'aide de la directive de compilation **use**.

Exemple: Si **MY_PACK** est un « package ». L'utilisation de **MY_PACK** dans l'entité **UNE_ENTITE** peut être rendue possible par la ligne de programme:

```
use work.MY_PACK.all
```

3.5 - Les procédures, les fonctions, les bibliothèques.

Leur emploi n'est pas différent de ce que l'on connaît en C ou en Pascal. Les procédures et les fonctions doivent être déclarées avant de pouvoir être invoquées. Les variables d'entrée et de sortie doivent être intégralement définies et typées. Les variables internes ont une portée limitée. Le corps de la procédure est en général un algorithme qui se déroule sur des constantes et des variables. La grandeur physique temps n'évolue pas pendant le déroulement de la procédure.

Comme en C++ ou en Pascal objet on peut surcharger les opérateurs en étendant leur usage à des types d'objets pour lesquels ils n'ont pas été définis initialement.

Les procédures et les fonctions peuvent être groupées en bibliothèques (« Library ») tout comme en C ou en Pascal.

4 - Eléments de syntaxe de VHDL

4.1 - Les types de données (« data ») et les objets (« object class »):

Les types de données utilisés en VHDL sont essentiellement des nombres. Ces nombres peuvent être groupés en tableaux ou en ensembles ordonnés. Mis à part les caractères et les chaînes de caractères les principaux types restants sont:

types scalaires: ensembles (énumérés);
entiers (« integer ») en principe sur 32 bits (-/+2147483647);
réels;
booléens (true, false).
types composés: tableaux (« array »);
enregistrements (« record ») comme en Pascal;
fichiers formatés comme en Pascal ou de type text (Pascal).

Les objets VHDL:

VHDL possède 3 classes d'objets: les signaux, les variables, les constantes.

Les signaux: Ils représentent des données physiques échangées entre les blocs logiques d'un circuit. Sur un schéma, chacun d'eux peut être matérialisé par le nom d'une équipotentielle ou le contenu d'une cellule mémoire. Les « ports » d'entrée ou de sortie d'une entité sont des signaux. On les retrouve souvent comme arguments des procédures.

La déclaration d'un signal se trouve dans la partie déclarative d'une architecture. L'affectation d'une valeur à un signal se fait par le symbole `<=`. On retrouve ces affectations dans le corps d'une architecture ou d'un processus. **Attention:** à l'extérieur d'un processus toutes les affectations sont concurrentes. C'est donc une erreur d'affecter plusieurs fois une valeur à un même signal.

Exemple: un_signal <= une_valeur_compatible_avec_le_type_du_signal.

Les variables: Les variables servent à stocker des valeurs intermédiaires dans la construction d'un algorithme séquentiel. Elles ne peuvent donc être utilisées que dans les processus, les procédures ou les fonctions. La syntaxe d'affectation utilise le symbole Pascal `:=`. Par différence avec le Pascal le compilateur initialise toujours les variables en utilisant une valeur par défaut qui dépend du type.

Exemple: une_variable := expression_ou_valeur_compatible_avec_le_type.

Les constantes: Comme en Pascal. On peut écrire les nombres entiers dans une base différente de 2 ou de 10 (16#ABCD123#, 2#011001011#).

Les attributs des objets: Ce sont des qualificatifs que l'on peut associer à un objet pour lui conférer une propriété particulière. On note une propriété en faisant suivre de nom de l'objet d'une apostrophe puis du nom de la propriété. Voici quelques exemples:

clk'event : changement d'état du signal de nom clk.

bus'range: utilisé dans 'for i in bus'range loop...' pour préciser l'intervalle de variation de l'indice de boucle.

level'low: la plus petite valeur possible de level etc...,

Il existe des attributs système associés à des systèmes de développement particuliers qui permettent de préciser un brochage ou le type de composant choisi:

Exemple: ATTRIBUTE pin-numbers of compt_4: ENTITY is « clk:1 rst:2 »
& « s(0):12 s(1):13 s(2):14 s(3):15 » ;

4.2 - Les instructions du langage:

Sans vouloir tenter d'être exhaustif on peut rappeler que les instructions, comme dans tout langage structuré se composent des instructions d'affectation, des opérateurs élémentaires et des instructions de structuration.

Pour les **affectations** on a vu le double symbole `<=` (signaux) et `:=` (variable);

Pour les **opérateurs** élémentaires on utilise les opérateurs arithmétiques et booléens traditionnels; Le signe `&` pour les concaténations. Attention tous les opérateurs logiques ont la même priorité: parenthèses recommandées !

Pour les **instructions de séquençement** on rappelle:

→ if ... then ... else ... end if

- case when... when... end case
- <étiquette>: for <param> in <min> to <max> loop < séquence d'instructions> end loop <étiquette>
- <étiquette>: while <condition> loop < séquence d'instructions> end loop <étiquette>
- Sortie de boucle provoquée:
 - next <étiquette> when <condition>
 - exit <étiquette> when <condition>

4.3 - La concurrence en VHDL:

Rappelons que les affectations de signaux qui sont faites directement à l'intérieur d'une architecture sont concurrentes. L'ordre d'écriture des instructions n'intervient pas puisque toutes les affectations se produisent au même instant. La prise en compte du temps ne peut donc être faite que par l'intermédiaire de processus possédant une instruction wait ou une liste de sensibilité

5 - Techniques de mise en œuvre

5.1 - La prise en compte du temps :

Le temps est la seule quantité physique reconnue directement par VHDL. C'est une variable implicite qui s'exprime en ns, ms, secondes...directement. On a déjà parlé de l'affectation des variables (affectation séquentielle) et des signaux (affectation concurrente).

Pour en rappeler les résultats il suffit d'observer la séquence VHDL suivante:

```
entity STATEMENTS is
  port(X,Y,Z: in INTEGER ; BS: out INTEGER);
end STATEMENTS
-- entity ports are always signals
-- toute ligne commençant par un double tiret est un commentaire
architecture CONCURRENT of STATEMENTS is
  signal AS : INTEGER ;
begin
  AS <= X*Y;
  BS <= AS+Z;
end CONCURRENT;
architecture SEQUENTIAL of STATEMENT is
begin
  process(X,Y,Z)
  variable AV,BV : INTEGER;
  begin
    AV:= X*Y;
    BV:=AV+Z;
    BS <= BV ;
  end process;
end SEQUENTIAL;
```

Il est facile d'inclure un délai dans la prise en compte de la modification d'un signal.

Y <= X ;(1) remplacé par Y <= X after 10 ns ;

Par contre il existe un mécanisme de délai interne à VHDL qui introduit un délai infiniment petit appelé *delta time* appliqué après chaque affectation de signal. Ainsi, après l'affectation (1) le signal Y ne change pas de valeur immédiatement et une autre instruction concurrente écrite immédiatement derrière (1) réutiliserait l'ancienne valeur de Y.

5.2 - La propagation des signaux:

Il y a deux types de délai dans VHDL: les délais inertiels et les délais de transport. Le délai normal correspondant au temps de propagation d'une porte est le délai inertiel c'est toujours le délai par défaut. Pour que l'affectation soit prise en compte il faut que le signal servant à l'affectation soit resté stable pendant tout le temps de retard précisé.

Dans le cas du délai de transport la prise en compte s'effectue quels que soient les changements intervenus sur la variable d'affectation pendant le délai spécifié. Dans les deux cas la syntaxe est la suivante:

Z <= I after 10 ns ; -- *délai inertiel*

Z <= transport I after 10 ns ;

5.3 - Exemples de modèles élémentaires en VHDL;

Modèle combinatoire:

```
entity AND2 is
    generic(DEL:TIME);
    port(I1,I2: in bit; O :out bit);
end AND2;
architecture DF of AND2 is
    begin
        O <= I1 and I2 after DEL;
    end DF;
```

Commentaire: noter l'emploi du paramètre générique DEL dont on pourra fixer la valeur lors de l'instantiation de l'entité AND2. La syntaxe est alors la suivante:

```
architecture COMB1 of COMB is
    ET1 : AND2
    generic map (10 ns)
    port map(X1,X2,Z);
```

Modèle séquentiel:

```
entity JK is
    generic(SRDEL,CLKDEL: TIME);
    port(S,R,J,K,CLK : in BIT; Q,QN :
inout BIT);
end JK;
architecture ALG of JK is
    begin
        process(CLK,S,R);
            begin
                if S='1' and R='0' then
                    Q <= '1' after SRDEL;
                    QN <= '0' after SRDEL;
                elseif S='0' and R='1' then
                    Q <= '0' after SRDEL;
                    QN <= '1' after SRDEL;
                elseif CLK'EVENT and CLK = '1'
and s='0' and R = '0' then
                    if J='1' and K='0' then
                        Q <= '1' after CLKDEL;
                        QN <= '0' after CLKDEL;
                    elseif J='0' and K='1' then
                        Q <= '0' after CLKDEL;
                        QN <= '1' after CLKDEL;
                    elseif J='1' and K='1' then
                        Q <= not Q after CLKDEL;
                        QN <= not QN after CLKDEL;
                    endif; endif ;
                end process;
            end ALG;
```

6 - Exemples d'utilisation

6.1 - Exemple de description combinatoire:

Décodeur 7 segments

```
library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;

architecture comb1 of seg_7 is
    signal n_seg : std_logic_vector (6 downto 0);
    signal En :bit;
    begin
        with D select
            -----
            -- a b c d e f g ----- D --
            -----
            n_seg <= "0000001" when x"0", -- 0
                "0011111" when x"1", -- 1
                "0100100" when x"2", -- 2
                "0001100" when x"3", -- 3
                "0011010" when x"4", -- 4
                "1001000" when x"5", -- 5
                "1000000" when x"6", -- 6
                "0011101" when x"7", -- 7
                "0000000" when x"8", -- 8
```

6.2 - Exemple de description séquentielle: Compteur synchrone 4 bits

```
library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;
use work.std_arith.all ;

-- Le module "std_arith" surcharge l'opérateur "+"
pour
-- le rendre compatible avec le type std_logic_vector

entity compt_4 is
    port(clk, rst : in std_logic ;
        s :out std_logic_vector(3 downto 0));

ATTRIBUTE pin_numbers of compt_4: ENTITY is
    "clk:1 rst:2 "
    & "s(0):12 s(1):13 s(2):14 s(3):15 ";

-- Le brochage suggéré correspond à 'utilisation d'un
PALCE16V8
-- Cette syntaxe est celle du compilateur WARP
```

```

        "0001000" when x"9", -- 9
        "0010000" when x"A", -- A
        "1000010" when x"B", -- b
        "1100001" when x"C", -- C
        "0000011" when x"D", -- d
        "1100000" when x"E", -- E
        "1110000" when others; -- F

En <= not(n_En);

n_seg_A <= n_seg(6) when En = '1' ELSE 'Z';
n_seg_B <= n_seg(5) when En = '1' ELSE 'Z';
n_seg_C <= n_seg(4) when En = '1' ELSE 'Z';
n_seg_D <= n_seg(3) when En = '1' ELSE 'Z';
n_seg_E <= n_seg(2) when En = '1' ELSE 'Z';
n_seg_F <= n_seg(1) when En = '1' ELSE 'Z';
n_seg_G <= n_seg(0) when En = '1' ELSE 'Z';

END comb1;
end compt_4 ;

architecture compt of compt_4 is
    signal q:std_logic_vector(3 downto 0);
BEGIN
    s <= q;
    process(clk)
    begin
        if (clk = '1' and clk'event) then
            if rst = '1' then q <= "0000" ; else
                q <= q+1 ;
            end if ;
        end if;
    end process ;
END compt ;

```

6.3 - Exemple de machine à états: Commande de moteur pas à pas

```

library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;
use work.std_arith.all ;
entity pasapas is
    port(clk : in std_logic ;
          s :out std_logic_vector(0 to 3));
    ATTRIBUTE pin_numbers of pasapas: ENTITY is
        "clk:1 "
        & "s(0) :12 s(1) :13 s(2) :14 s(3) :15 ";
-- Utilisation d'un PALCE16V8
-- Syntaxe du compilateur WARP
end pasapas ;

architecture moore1 of pasapas is
    signal state: std_logic_vector(5 downto 0);
    constant s0: std_logic_vector(5 downto 0) := "1010" & "00";
    constant s1: std_logic_vector(5 downto 0) := "1001" & "01";
    constant s2: std_logic_vector(5 downto 0) := "0101" & "10";
    constant s3: std_logic_vector(5 downto 0) := "0110" & "11";
    BEGIN
        process
        begin
            wait until clk = '1' ;
            case state is
                when s0 => state <= s1 ;
                when s1 => state <= s2 ;
                when s2 => state <= s3 ;
                when s3 => state <= s0 ;
                when others => state <= s0 ;
            end case;
        end process ;
        s(0) <= state(2);
        s(1) <= state(3);
        s(2) <= state(4);
        s(3) <= state(5);
    END moore1 ;

```

7 – Quelques données pratiques

Bibliographie :

- - Circuits numériques et synthèse logique. Un outil VHDL.
J. Weber et M. Meaudre MASSON 1995

Cet ouvrage contient tout ce qu'il faut savoir en électronique numérique aujourd'hui. Les auteurs ont su se débarrasser des notions périmées que l'on trouve encore malheureusement dans de nombreux livres plus récents.

- VHDL Du langage au circuit et du circuit au langage
J. Weber et M. Meaudre MASSON 1997

Ce livre contient un CDROM comportant un compilateur VHDL et un simulateur permettant de vérifier la fonctionnalité d'un projet. Il ne comporte cependant pas de fitter qui permettrait d'implanter le projet sur un composant réel .

- VHDL for programmable logic
Kevin Skahill ADDISON WESLEY 1996

L'ouvrage est fourni avec le compilateur WARP2 de CYPRESS (CDROM inclus). Le compilateur WARP2 permet d'implanter un projet sur les composants CPLD de CYPRESS. Une partie du texte est cependant caduque car CYPRESS a abandonné depuis la production des FPGA..

- A guide to VHDL
S. Mazor et P. Langstratt KLUWER ACADEMIC PUBLISHER 1993/1995
- Structured logic design with VHDL
J. R. Armstrong et F. G. Gray PRENTICE HALL 1993

Les compilateurs :

Des compilateurs VHDL sont inclus avec tous les grands outils de CAO électronique (CADENCE, ORCAD, ...). Les fitters permettant d'implanter les projets sur des composants réels ne sont cependant pas toujours inclus et doivent être achetés en plus ce qui peut rendre prohibitif le prix de TP que l'on pourrait envisager.

Les outils de développement spécifiques des fournisseurs de FPGA ou d'EPLD comportent parfois un compilateur VHDL. C'est le cas de XILINX notamment.

Il existe chez CYPRESS un compilateur très bon marché (\$100) permettant la réalisation complète de projets à base d'EEPLD. Ce compilateur est WARP2. Il n'implémente pas toutes les possibilités de VHDL car certaines fonctions connues de VHDL ne sont pas réalisables à l'aide d'EEPLD. La prise en compte du temps fait partie des instructions manquantes. Il n'en reste pas moins que WARP est un outil très utile et parfaitement adapté à des travaux pratiques ou des projets. C'est un outil très convivial qui comporte le compilateur, le simulateur temporel et un outil graphique de description de machines à états. WARP délivre un fichier rapport très complet comportant notamment les équations établies par le compilateur à partir du langage

ECLAIRAGE ET ELECTRONIQUE DE PUISSANCE

Patrick SOUILLAC

Lycée technique Pierre Mendès France
88000 Epinal

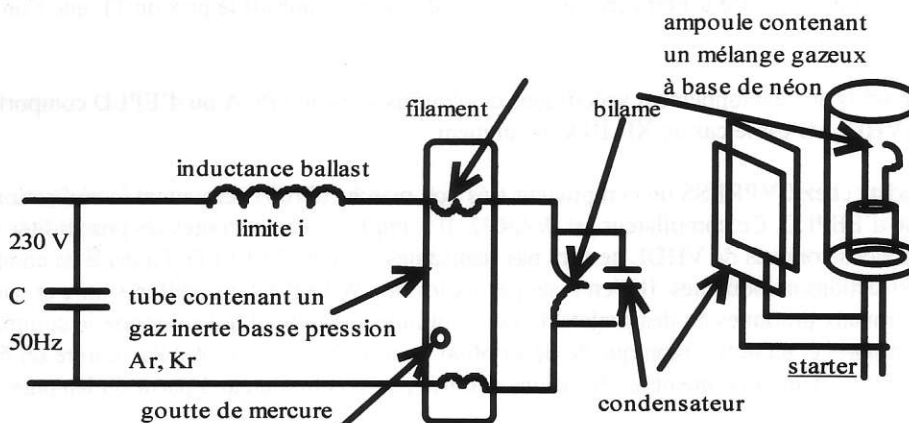
Résumé :

Dans de nombreux domaines où l'électronique de puissance a permis des progrès significatifs il en est un dont l'environnement nous est familier : il s'agit de l'éclairage. Sans être exhaustif et à partir de quelques exemples (tubes fluorescents et lampes à vapeur de sodium) ces quelques lignes ont pour but de montrer l'évolution des systèmes d'éclairage et peut-être de donner quelques idées de T.P.

1. L'éclairage fluorescent

1.1 Principe de fonctionnement des tubes fluorescents.

1.1.1 Montage utilisé :



1.1.2 Fonctionnement :

A la mise sous tension, le tube présente une impédance élevée entre ses électrodes. La tension se trouve donc appliquée aux bornes du starter. Celui-ci joue un rôle essentiel dans l'amorçage du tube.

Il est constitué d'un bilame enfermé à l'intérieur d'une ampoule contenant un mélange gazeux à base de néon. Le bilame est ouvert. La tension appliquée au starter est suffisante pour ioniser le néon. La chaleur du mélange gazeux entraîne la fermeture du contact. Le courant qui circule dans le circuit permet l'échauffement des filaments du tube (émission thermoélectronique). Le gaz du starter se désionise et le bilame se rouvre en coupant le circuit de préchauffage. L'ouverture du circuit inductif (loi de Lenz) crée alors une surtension aux bornes du tube qui peut être suffisante pour amorcer le tube (décharge). Ce phénomène est aléatoire, si au moment de l'ouverture du bilame la tension secteur est peu élevée (voire nulle) la surtension peut être insuffisante pour amorcer le tube. Ce processus d'ouverture et de fermeture du bilame peut se produire plusieurs fois (cliquetis).

Le rayonnement ultra violet engendré par les atomes de mercure excités en touchant le revêtement de phosphore produit la fluorescence.

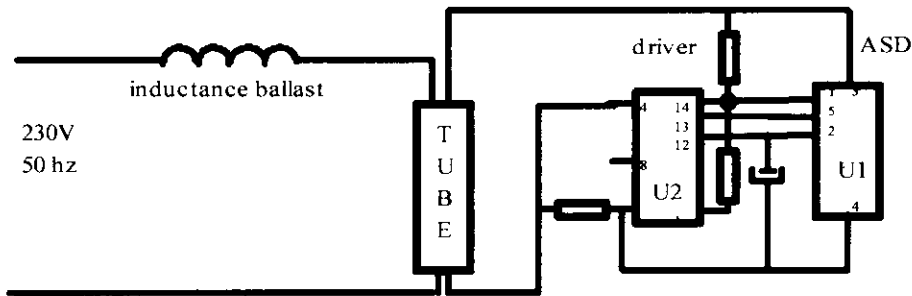
En régime permanent le circuit du starter n'est plus utile. Il faut aussi noter que le tube s'éteint à chaque passage par zéro du courant ce qui est à l'origine du clignotement (scintillement) des tubes fluorescents.

Ce point peut être la cause de fatigue visuelle voire d'effets stroboscopiques.

2. Amélioration de l'amorçage : utilisation d'un starter électronique.

Kit Starlight EFS de SGS Thomson

2.1 Constitution :



Il fait partie des circuits ASD (application specific discretés) développé par SGS Thomson.

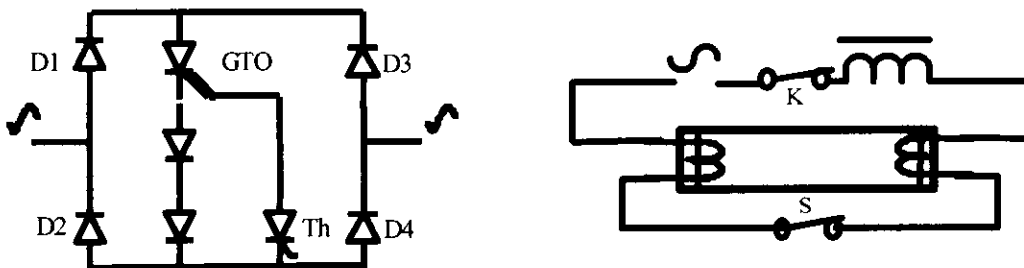
Il comporte :

- Un interrupteur de puissance bidirectionnel EFS 21 boîtier pentawatt HV (U1)
- Un circuit de commande EFS 2A boîtier SO14 (U2)
- Quatre composants passifs (3 résistances, 1 condensateur)

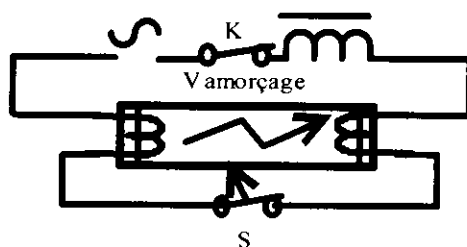
Le tout tient sur un circuit imprimé de 2x3 cm qui prend place dans un boîtier de starter classique (même aspect extérieur).

2.2 Eléments de fonctionnement .

Le starter est un interrupteur électronique bidirectionnel qui assure deux fonctions :



- Le préchauffage du tube : le starter fermé court circuit le tube qui ne peut s'allumer. Le courant parcourt les "électrodes" (filaments du tube), leur température augmente (émission de e-).
- L'amorçage du tube : il y a assez d'électrons dans le gaz pour que la lampe s'amorce, le courant atteint la valeur de 350 mA, le préchauffage s'arrête (circuit ASD). Dans le même temps la tension aux bornes du tube augmente jusqu'à atteindre la valeur d'amorçage (limitation à 1350 V par le circuit ASD) et permet au tube de s'allumer.



Remarque :

Un algorithme est implanté dans le circuit de commande, il permet de détecter l'état du tube : allumé ou éteint.

S'il reste éteint, un nouveau cycle de préchauffage est lancé (un peu plus court que le premier). Un nouvel essai d'amorçage se produit. Si au bout de 8 tentatives, le tube n'est pas allumé, le système cesse de fonctionner (mode stand by) et reste en attente.

Si le tube s'est amorcé, le circuit ASD applique une courte impulsion haute tension au début de chaque alternance positive. Dans le cadre de fonctionnement permanent cette impulsion n'est pas "visible", elle permet en cas de micro coupures du secteur de maintenir le tube allumé sans relancer une séquence de préchauffage.

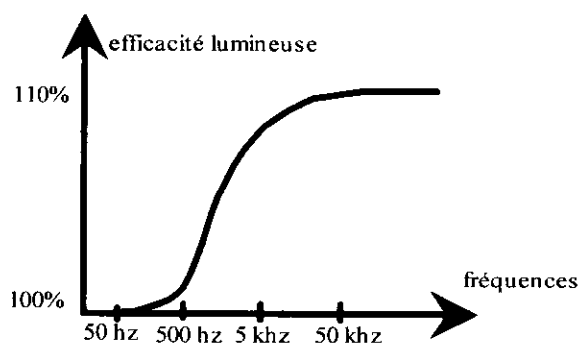
2.3 Avantages du starter électronique :

- Durée de vie du starter accrue plus de 500000 allumages
- Durée de vie accrue du tube (de 2 à 3 fois) plus de 120000 amorçages par tube
- Adapté aux tubes de 18 W à 125 W dans une gamme de température de - 40°C à +85°C.
- Amorçage dès la première impulsion
- Diminution du phénomène de scintillement (clignotement dû au fait que la lampe s'éteint lors de chaque passage du courant par zéro).

3. Ballast électronique :

3.1 Comportement des tubes fluorescents en hautes fréquences

L'accroissement de la fréquence de fonctionnement au delà du seuil audible de 20 Khz permet de produire 10% de lumière en plus pour la même puissance.



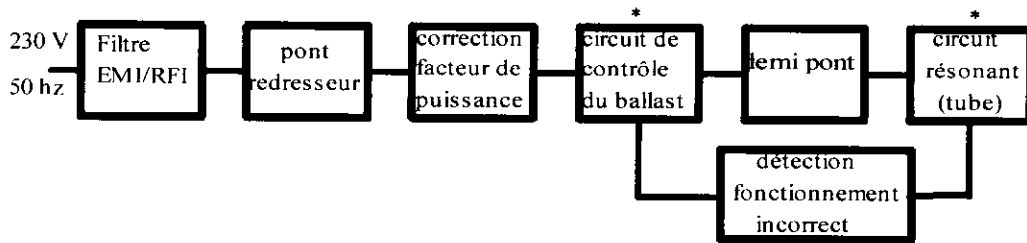
Le fonctionnement à fréquence élevée élimine le phénomène de scintillement, le tube n'a plus le temps de s'éteindre.

Le bruit qui peut se produire avec le ballast magnétique disparaît aussi.

La puissance consommée est aussi plus faible (de 20% à 25% en moins pour l'ensemble tube + ballast).

La durée de vie du tube est accrue.

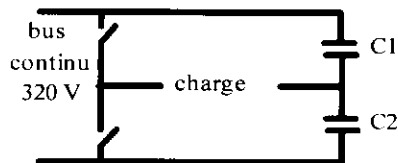
On peut prévoir un variateur de lumière, un contrôle de l'état du tube et de son fonctionnement, une régulation pour maintenir constant le niveau d'éclairage.



3.2 Organisation fonctionnelle d'un ballast électronique industriel (configuration maximum).

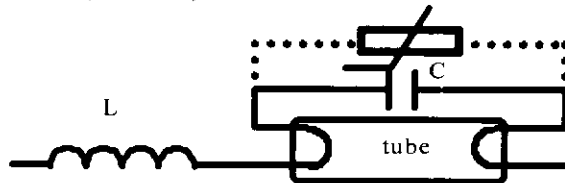
- Sur une lampe fluo compacte seules figurent les parties affectées d'un astérisque ($P < 25 \text{ W}$).
- Sur un montage industriel il peut y avoir deux tubes : montage en duo.

3.3 Structure des ballasts électroniques.



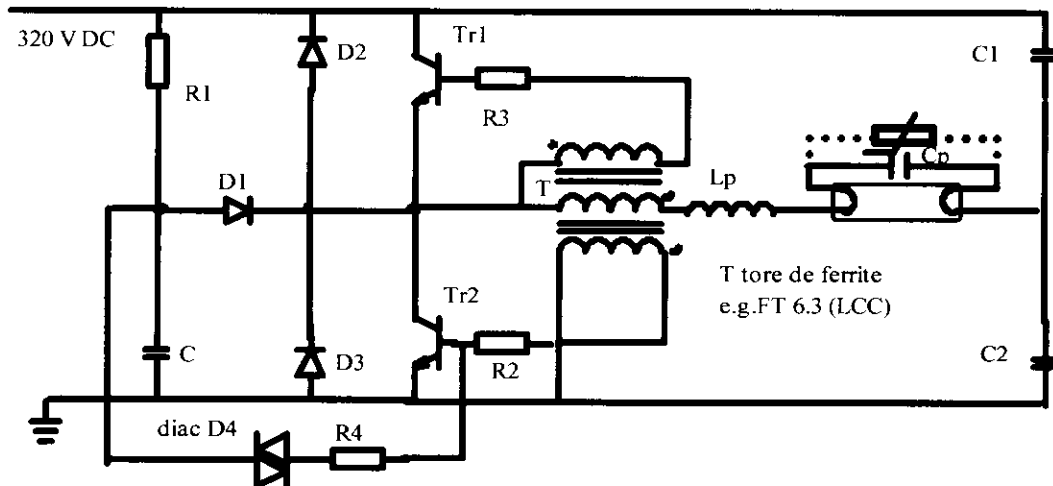
De nombreuses topologies sont possibles (fly back, push pull, $\frac{1}{2}$ pont ...). Il semble que la structure la plus courante en Europe soit celle en $\frac{1}{2}$ pont.

Les interrupteurs du bras actif peuvent être soit des transistors haute tension avec diode de récupération, intégrée ou discrète, soit des Mosfet ou des IGBT : par exemple BULD 50 (TI), BUL44D2 (Motorola), IRF720 (IR), MTP8N50E (Motorola).



La charge est du type RLC série qui fonctionnera près de la résonance. Une CTP peut être présente en parallèle sur C.

3.4 Circuit résonant auto oscillant



- Eléments de fonctionnement :

à la mise sous tension le condensateur C se charge à travers R1, quand sa tension dépasse celle du diac, celui ci devient passant. Le condensateur C se décharge dans la base du transistor Tr2 et le rend conducteur. Les oscillations du circuit commencent alors.

Un courant circule dans le collecteur de Tr2 et dans le primaire du transformateur de commande T. Une tension apparaît sur chaque secondaire de T. Compte tenu des bornes homologues la tension de base de Tr1 est négative et celle de Tr2 positive. Le courant Ic2 croît jusqu'à saturation de T, alors Tr2 va se bloquer. La variation négative du courant va entraîner une polarisation inverse des enroulements de T, Tr2 va devenir passant.

La conduction alternative se déroule au rythme de la fréquence de résonance. La diode D1 décharge par la suite C chaque fois que Tr2 conduit inhibant le diac D4.

Ce montage peut être réalisé avec des Mosfets, il faudra limiter la tension de grille par une diode zéner et placer une résistance de grille pour limiter les surtensions dues aux inductances de fuite.

3.5 Utilisation d'un circuit de commande spécialisé : MPIC 2151 ou IRF 2151/52/55

On retrouve ici des circuits déjà présentés dans la revue (C.I haute tension) : avec les valeurs numériques suivantes $R_0 = 47 \text{ k}\Omega$, 1W ; $C_0 = 47\mu\text{F} / 16 \text{ V}$; D1 diode ultra rapide 1A / 400V MUR 160 ; $C_3 = 100\text{nF} / 63\text{V}$; Tr1 = Tr2 MTP 2N50E / IRF 720 ; $C_1 = C_2 = 100\text{nF} / 400\text{V}$.

Le circuit est alimenté directement à partir du 320 V continu à travers la résistance R0, une diode zéner interne régule la tension d'alimentation à 15.6 V.

La commande des Mosfets est inhibée si V^+ est inférieur à 9V.

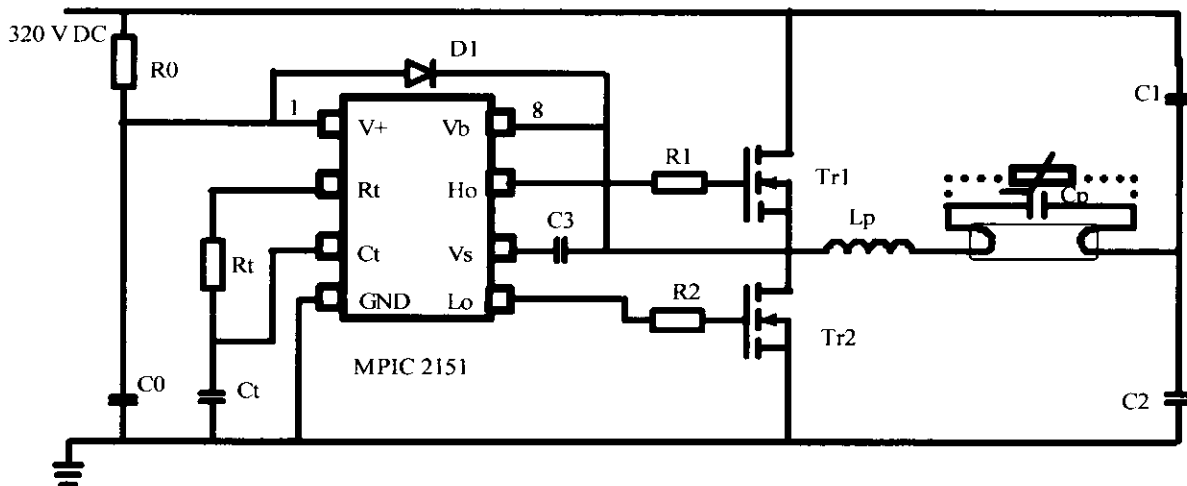
Le circuit MPIC 2151 commande alternativement Tr1 et Tr2 générant une onde carrée alternative de 160V.

La fréquence de fonctionnement est donnée par $f_{osc} = 1/(1.4.R_t.C_t)$.

Le circuit génère un temps mort de 1.2 μs pour empêcher la conduction simultanée des deux Mosfets.

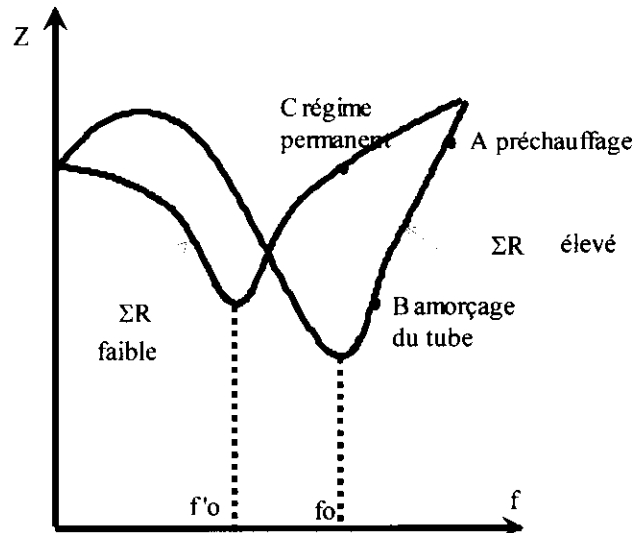
L_p et C_p définissent la fréquence de résonance du circuit (tube ou lampe). On choisit en général R_t et C_t pour que la fréquence d'oscillation soit légèrement supérieure ou inférieure à la fréquence de résonance $f_r = 1/2\pi\sqrt{LC}$.

Comme toujours le circuit imprimé doit être soigné afin de limiter les inductances de fuite qui pourraient perturber le fonctionnement du montage. Le condensateur de bootstrap C3 doit être monté près du C.I.



On peut décomposer le fonctionnement de la lampe (ou du tube) en trois phases :

- phase 1 : préchauffage des filaments, on améliore ainsi l'efficacité du démarrage et on augmente la durée de vie du tube, le point de fonctionnement se situe sur la courbe au point A. La résistance R du circuit dépend principalement de la résistance des filaments. Pour une lampe fluo compacte la résistance d'un filament à froid vaut environ 12 Ω , à chaud elle passe à environ 46 Ω (lampe 15 W).



- phase 2 : amorçage de la lampe, la fréquence est proche de la fréquence f_0 de résonance – point B, le courant croît, la tension aux bornes de C atteint son maximum $V_c = Q \cdot (320 \text{ V})$ avec $Q = L\omega/R$ et la décharge se produit dans la lampe.
- Phase 3 : Régime permanent, la capacité C est court circuitée par la faible impédance de la lampe (ou du tube). On n'a plus à proprement parler un circuit RLC résonant série. La fréquence de travail est éloignée de la fréquence de résonance $f'o$ du circuit RLC – point C.

La tension d'amorçage des tubes fluorescents augmente avec l'âge, particulièrement aux faibles températures ambiantes. C'est pour cette raison que l'on utilise des circuits résonants. On aura toujours une tension suffisante aux bornes de C pour amorcer le tube.

Rôle de la thermistance : à froid sa résistance est faible, elle va évoluer vers une valeur élevée grâce au passage du courant. Ceci permet le préchauffage des filaments. La tension aux bornes du tube croît plus lentement avant que la décharge ne se produise. On réduit ainsi l'usure des électrodes (filaments), on assure une mise en route en douceur et on augmente la durée de vie du tube. La thermistance CTP est généralement omise sur les lampes fluo compactes ou sur les montages où les tubes éclairent de façon continue.

3.6 Amélioration et évolution.

- International Rectifier a intégré les deux Mosfets du demi pont avec la commande : ce qui donne le circuit IR 51 H 420 (self oscillating half bridge) boîtier SIP 9 broches.
- Motorola vient de mettre au point un circuit intégré MC 33157 qui gère les fonctions essentielles de l'allumage du tube fluorescent, à savoir :
 - contrôle du préchauffage des filaments
 - contrôle de la séquence d'amorçage du tube (possibilité de réglage de la fréquence)
 - réglage du temps mort
 - surveillance de l'état du tube
 - oscillateur contrôlé en courant : on peut prévoir un variateur de lumière
- Siemens (infiniéon) propose un circuit intégré TDA 16888 qui contrôle à la fois la correction du facteur de puissance et la commande du demi pont.

UN CIRCUIT SPECIALISE POUR LA COMMANDE DES ONDULEURS TRIPHASES : LE SA828

Philippe MISSIRLIU
LPR Newton ENREA
1 Pl. Jules Verne 92110 Clichy
tel 01 41 06 78 78 poste 352
philippe.missirliu@wanadoo.fr

Présentation

Dans le cadre des projets en STS Electrotechnique nous réalisons régulièrement des commandes de machine asynchrone. La commande scalaire étant seule à la portée de nos étudiants, nous sommes conduits à réaliser la commande à V/F constant d'un onduleur triphasé. Pour ceci nous utilisons depuis deux ans un nouveau circuit spécialisé, le SA828 de MITEL (ex GEC Plessey) qui nous paraît intéressant. Le but de cet article est de présenter ce circuit. Nous prendrons comme exemple le projet réalisé au lycée mais on notera que le SA828 peut également être utilisé pour un onduleur à tension de sortie fixe.

Les solutions envisageables

Pour réaliser la commande à V/F constant d'un onduleur triphasé il existe aujourd'hui trois solutions éprouvées :

- La version traditionnelle à base de circuits intégrés : compteurs, mémoires, ampli-op etc... La mise en œuvre est délicate, la fiabilité incertaine.

- Un circuit spécialisé : le HEF 4752. De conception ancienne, il est maintenant très difficile à trouver et son principe de fonctionnement est complexe.

- L'utilisation d'un microcontrôleur ou d'un DSP. Ce choix conduit à un matériel très simple mais à un logiciel très complexe. Or la spécialité de nos étudiants n'est pas l'informatique industrielle.

Présentation du SA828

Le SA828 est un circuit intégré bon marché, simple d'emploi, qui, associé à un microcontrôleur 8 bits permet de réaliser la commande d'un onduleur triphasé. Nous utilisons ce circuit pour l'alimentation à V/F constant d'une MAS triphasée. Le synoptique du système est le suivant :

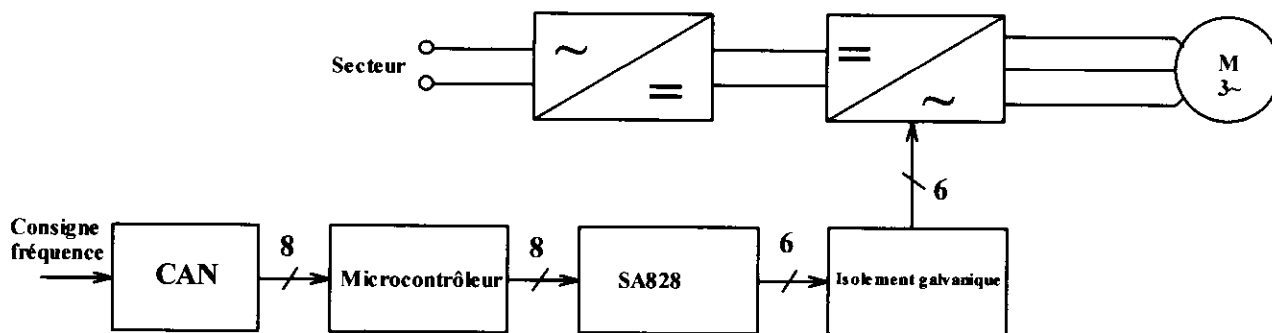


Figure 1 : Synoptique du système

Le SA828 fournit les signaux de commande pour les six interrupteurs de l'onduleur triphasé. Le circuit réalise une MLI triphasée sinus-triangle : une référence sinusoïdale de fréquence et d'amplitude variable est comparée à une porteuse triangulaire de fréquence et d'amplitude fixe (cf. Séguier tome 4 chap. 3.3). Toutes les caractéristiques de l'onduleur : fréquence de la porteuse, amplitude de la référence, fréquence de la référence, ordre des phases, durée du temps-mort entre les deux interrupteurs d'un même bras sont déterminées en écrivant les valeurs convenables

dans les 6 registres 8 bits du SA828. Ces registres sont accessibles à travers une interface compatible avec la plupart des microcontrôleurs. La liaison microcontrôleur-SA828 s'effectue avec un bus données-adresses multiplexé de 8 bits et un bus de commande de 4 bits.

Mise en œuvre matérielle

Nous donnons à titre d'exemple le schéma de la carte que nous avons réalisée :

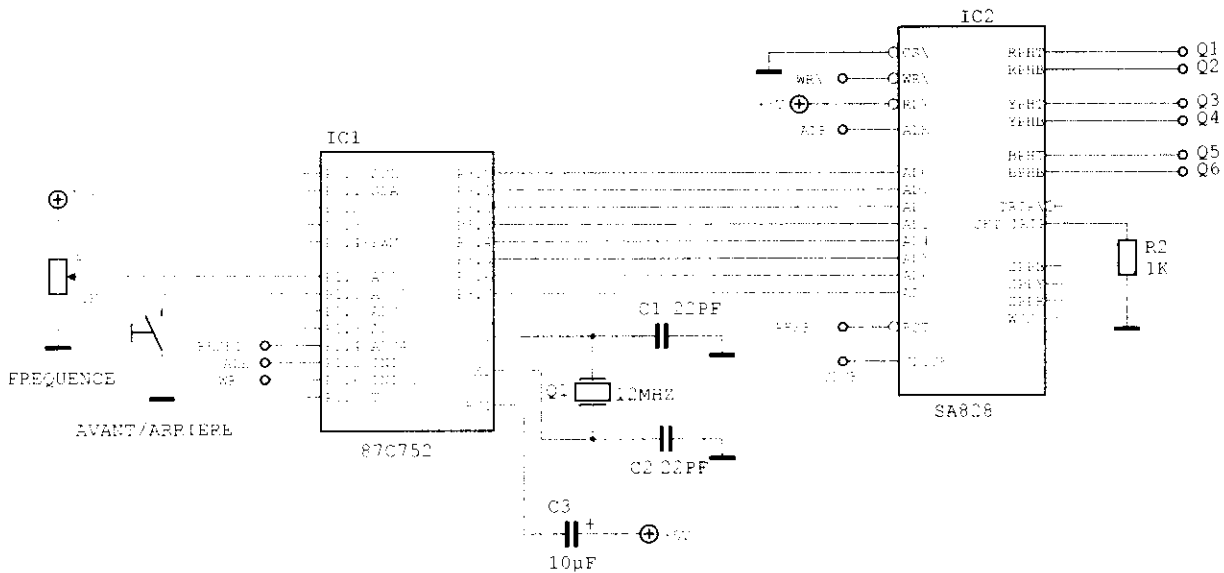


Figure 2 : Schéma de la carte

On voit que deux circuits intégrés suffisent : le SA828 et le microcontrôleur qui lui est associé (dans notre cas un 87C752 avec CAN intégré). L'interface entre le SA828 et le microcontrôleur utilise le bus 8 bit multiplexé et trois bits de commande soit, du point de vue du microcontrôleur, 11 entrées-sorties. Le fabricant fournit une note d'application qui permet d'adapter cette interface à tous les microcontrôleurs des familles Intel, Motorola, PIC ou ST.

Mise en œuvre logicielle

Le microcontrôleur doit simplement écrire dans les registres internes du SA828 les données qui correspondent au fonctionnement souhaité de

l'onduleur. Ces registres se répartissent en deux groupes :

- Les registres d'initialisation qui contiennent les données relatives à ce qui ne varie normalement pas en cours de fonctionnement : fréquence de la porteuse, durée des temps morts.
- Les registres de commande qui contiennent les données relatives à ce qui peut changer en cours de fonctionnement : fréquence et amplitude de la référence, ordre des phases.

Un sous-programme de quelques instructions permet d'écrire une donnée dans un des registres du SA828. Dans notre application, la structure du programme est la suivante :

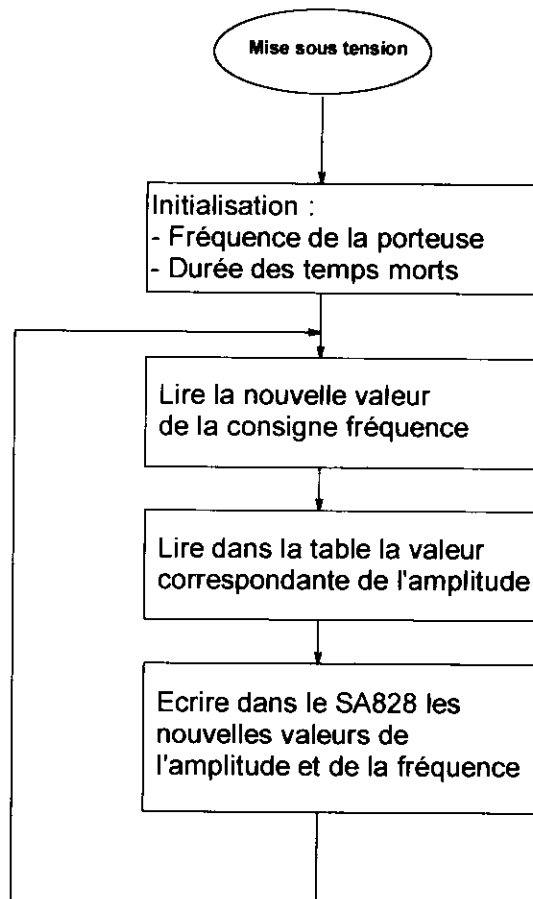


Figure 3 : Organigramme

Une table de 256 octets en mémoire morte contient la relation $V=f(F)$. Ceci permet d'obtenir très

facilement n'importe quelle forme. Pour notre part nous utilisons la caractéristique suivante :

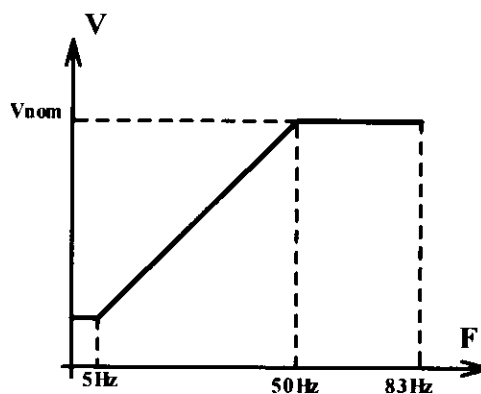


Figure 4 : Caractéristique $V=f(F)$

Les aspects les plus complexes de la commande sont réalisés de façon transparente par le SA828. Le programme du microcontrôleur est donc très simple (80 instructions dans notre cas). Ceci permet éventuellement de confier d'autres tâches au microcontrôleur : compensation de glissement, affichage de la vitesse etc..

Simulation

Le SA828 met en œuvre un principe de MLI classique et relativement facile à expliquer. Ceci est un avantage en STS. On peut en particulier le simuler à l'aide de la version d'évaluation de Pspice. Voici à titre d'illustration le schéma et les courbes obtenues.

PARAMETERS
 FREF = 50 Hz
 FMOD = 1 kHz

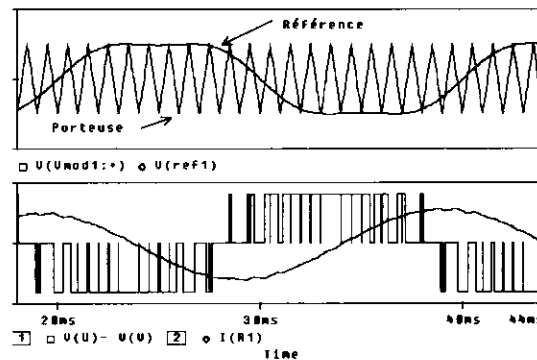
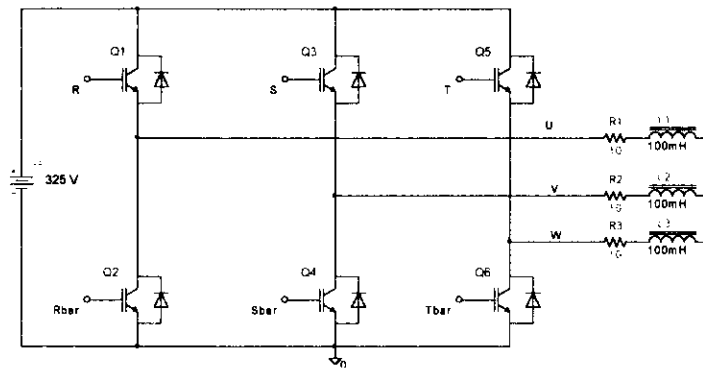


Figure 5 : Simulation sous Pspice

On remarquera que de l'harmonique 3 est ajouté à la référence de façon à augmenter la valeur efficace du fondamental.

Ressources

Le fabricant a publié un ensemble de notices et de notes d'applications très complet qui nous ont permis à la fois d'utiliser le circuit et de comprendre son fonctionnement. Pour les rendre accessibles à nos étudiants nous en avons traduit une bonne partie.

On trouvera tout ceci sur le site web de la section ainsi que le rapport de projet correspondant (format pdf) et les programmes (en assembleur et en C).

Disponibilité

En juin 1999 la version SA8281/IG/DP1S était disponible chez EURODIS en faible quantité (5 ex) au prix de 41,30 FHT.

Conclusion

Le SA828 nous paraît posséder les qualités suivantes :

- Sa mise en œuvre, tant matérielle que logique, est simple.
- Il s'associe à n'importe quel microcontrôleur.
- Il utilise une MLI sinus-triangle très classique.
- C'est un circuit bon marché et disponible en faible quantité.

EURODIS :

3 av de l'Epi d'or 92807 Villejuif
 tel : 01 41 80 35 80
 fax : 01 41 80 35 57

Site de la STS Electrotechnique du lycée Newton

ENREA de Clichy :
<http://membres.tripod.fr/tsetclichy/>

MICHEL FARADAY ET LE DEVELOPPEMENT DE L'ELECTRICITE

Première partie

Jean-Claude BOUDENOT

THOMSON-CSF COMMUNICATIONS

Directeur Technique, Responsable du CET Durcissement,

Membre du Collège Scientifique et Technique,

Unité Durcissement, Instrumentation et Sureté des Systèmes.

I. LE DEVELOPPEMENT DE L'ELECTRICITE : DES ORIGINES A FARADAY.

1. Les origines de l'électricité

On fait habituellement remonter l'histoire de l'électricité à Thalès de Milet (640-548 av. J. C.), qui — avec ses contemporains — remarque que l'ambre jaune frotté à sec acquiert la propriété d'attirer les corps légers. L'ambre jaune se disant en grec *elektron*, le phénomène associé sera baptisé plus tard, par William Gilbert, du même nom.

William Gilbert (1544-1603) naît à Colchester (Angleterre) en 1544. Après des études à Oxford et Cambridge, il s'établit en 1573, comme médecin à Londres. Il acquiert rapidement une telle renommée que la Reine Elisabeth 1^{ère} le nomme médecin à la cour. Gilbert joue dans l'histoire du magnétisme un rôle semblable à celui joué par Galilée (dont il est contemporain) en mécanique.

Il réalise des expériences systématiques dont le but est de différencier les deux types de force : électrique et magnétique. Il compare l'aimant à l'ambre et montre que le premier n'attire que le fer ou d'autres aimants, tandis que le second — après frottement — attire tous les corps légers. Il publie ses travaux dans un ouvrage remarquable «*De magnete*» (1600) (De l'aimant). On

doit à Gilbert la découverte du magnétisme terrestre et il assimile la Terre à un grand aimant.

Plus tard, *Otto von Guericke* (1602-1686), fameux bourgmestre de Magdebourg, essaie de montrer que la gravité résulte du frottement de l'air sur la terre laquelle, pense-t-il, est essentiellement constituée de «particules sulfureuses». Pour le montrer, il frotte avec sa main une boule de soufre qu'il fait tourner. Il invente ainsi fortuitement la première machine électrostatique. Le procédé est repris et amélioré par *Francis Hauksbee* (1666-1713) qui réalise en 1706 un générateur électrostatique dans lequel la boule de soufre est remplacée par un globe de verre frotté avec la main ou avec une étoffe de laine. Petit à petit le globe de verre frotté à la main est remplacé par un disque de verre frotté par un patin en cuir, l'électricité étant alors recueillie par un tube de cuivre. De telles machines électrostatiques sont commercialisées vers la fin des années 1740.

Stephen Gray (1666-1736) fait en 1729 la distinction entre conducteurs et isolants. Cette découverte est une fois de plus fortuite. Gray suspend une corde de chanvre au plafond à l'aide de fils de soie. L'une des extrémités de la corde de chanvre est reliée à un générateur électrostatique, l'autre extrémité est alors capable d'attirer des corps légers. Mais les fils de soie

cassent. Il les remplace alors par un fil métallique plus solide... alors le phénomène disparaît : «quand les effluves arrivent aux fils métalliques qui supportent la corde, ils passent par ceux-ci jusqu'au plafond où ils sont fixés et ne progressent plus le long de la corde».

Poursuivant ses essais Gray, aidé de Wheeler, constate que le verre, la résine, le diamant, les huiles, les oxydes métalliques... sont — comme la soie — des isolants, tandis que les métaux, les solutions acides ou alcalines, l'eau, le corps des animaux... sont des conducteurs. Peu après Charles du Fay (1698-1739) reprenant ces expériences (1733) montre qu'il existe deux sortes d'électricité l'une «vitrée», l'autre «résineuse» ; «Le caractère distinctif de ces deux électricités est de se repousser elles-mêmes et de s'attirer l'une et l'autre».

Le 20 avril 1746, Petrus Van Musschenbroek (1692-1761), professeur à Leyde, fait part à son ami Réaumur de l'une de ses expériences «frappantes» : «Tout à coup ma main droite fut frappée avec tant de violence, que j'eus tout le corps ébranlé comme d'un coup de foudre. La main n'est point déplacée par cette commotion, mais le bras et tout le corps sont affectés d'une manière terrible que je ne puis exprimer. En un mot, je croyais que c'était fait de moi». L'abbé Nollet (1700-1770), ancien assistant de Du Fay et alors assistant de Réaumur, reproduit l'expérience, baptise «bouteille de Leyde» le dispositif de Van Musschenbroek, et avec ses talents d'expérimentateur et de vulgarisateur la fait connaître au tout Paris et jusqu'à Versailles devant le roi et la cour

La «bouteille de Leyde» est un récipient en verre fermé par un bouchon de liège et rempli à moitié d'eau. Une tige métallique traverse le bouchon, l'une de ses extrémités baigne dans l'eau, l'autre est reliée à une machine électrostatique. Il s'agit donc d'un condensateur qui se décharge quand l'expérimentateur touche la tige et la paroi de verre.

Tandis que l'abbé Nollet publie en 1745 les «Conjectures sur les causes de l'électricité des corps», un homme d'affaires bien établi de Philadelphie, journaliste et éditeur à succès, élabore une théorie en opposition avec celle de Nollet. Cet homme c'est Benjamin Franklin (1706-1790). Pour lui le fluide électrique apparaît sous deux états, notés + et - et ainsi la décharge d'une bouteille de Leyde est liée à une remise à l'équilibre des deux excès d'électricité existant dans la bouteille. Il développe cette notion à partir de 1750, énonce le principe de conservation de la charge électrique, et interprète l'attraction exercée par un corps électrisé sur un corps léger par un principe d'action à distance. A la même époque (1752), Benjamin Franklin invente le paratonnerre pour «protéger les maisons, églises, navires et autres de la foudre», ce qui lui vaut, 20 ans plus tard d'entrer à l'Académie des Sciences de Paris. Homme politique et diplomate, Franklin

participe en 1776 à la rédaction de la Déclaration d'Indépendance, et en 1787 à celle de la Constitution Fédérale.

Ainsi en 1770, quatre notions fondamentales sont acquises ; l'existence de deux types de charges, positive et négative, la notion de conservation de la charge électrique, la mise en évidence de deux types de force, l'une attractive, l'autre répulsive, ainsi que de deux types de matériaux : les isolants et les conducteurs. Il manque toutefois une loi fondamentale pour couronner l'électrostatique, c'est à Charles Coulomb que reviendra l'honneur de combler cette lacune.

2. Coulomb et sa loi en $1/d^2$

Charles Coulomb et ses travaux sur le pendule de torsion

Charles Augustin Coulomb (1736-1806) naît à Angoulême le 14 juin 1736, mais fait ses premières études à Paris où son père Henry Coulomb est nommé inspecteur des domaines du Roi. Il poursuit ses études au sein de la très réputée *École du Génie de Mézières* qu'il intègre en 1760. Ingénieur militaire, il dirige l'édification du fort Bourbon en Martinique jusqu'en 1772. Il élabore en parallèle ses premières théories scientifiques (ayant trait à la statique) ce qui lui vaut d'être nommé membre correspondant de l'Académie des Sciences en 1774. En 1779, il rédige un mémoire, sur la meilleure manière de fabriquer les aiguilles aimantées, qui est récompensé par l'Académie. Il y introduit, pour la première fois, la notion de moment magnétique, et il fait l'étude du mouvement d'un aimant suspendu dans un champ magnétique, ce qui le conduit à examiner de près la torsion des fils.

En 1784, Coulomb détermine «d'après l'expérience les lois de la force de torsion d'un fil de métal, et [il trouve] que cette force est en raison composée de l'angle de torsion $\{\theta\}$, de la quatrième puissance du diamètre $[d]$ du fil de suspension et de l'inverse de la longueur $[l]$, en multipliant le tout par un coefficient constant qui dépend de la nature du métal $[\mu]$ et qui est facile à déterminer par l'expérience». La connaissance

de cette loi $\left(M = \mu \frac{\theta d^4}{l} \right)$ lui permet de mesurer des

forces très faibles (poids d'une masse d'un millionième de gramme). Ses travaux sur la torsion s'inscrivent dans le prolongement de sa théorie du frottement (1781) qu'il découvre suite à un concours de l'Académie des Sciences qui voulait connaître les «lois du frottement pour qu'ainsi, on puisse contrôler le glissement d'une coque en bois sur un matériau quelconque».

La loi de Coulomb

Muni de sa balance de torsion, Coulomb peut maintenant s'attaquer à la «détermination expérimentale de la loi suivant laquelle les éléments des corps électrisés du même genre d'électricité se repoussent mutuellement». Il lit son mémoire à l'Académie en 1785, mais il n'est publié qu'en 1788. Il y formule la fameuse *loi de Coulomb* : «La force répulsive de deux petits globes électrisés de la même nature d'électricité est en raison inverse du carré de la distance du centre des deux globes».

Coulomb est le premier à faire une démonstration expérimentale directe de la loi en $1/d^2$ grâce à sa balance à la fois très précise et entièrement nouvelle. Mais cette loi est dans «l'air du temps».

Déjà Von Waitz en 1744, puis Joseph Priestley (1733-1804) en 1766 ont émis l'hypothèse que la force électrique pourrait suivre une loi similaire à celle de Newton. Cette loi est vérifiée de manière indirecte par Henry Cavendish en 1771, mais ce dernier ne publie pas ses travaux (Un siècle plus tard (1879), c'est Maxwell, alors directeur du laboratoire Cavendish, qui le fera). Lord Mahon, en 1778, fait la démonstration par une autre méthode indirecte, tandis que Robinson fait une détermination directe de la loi en $1/d^2$ à l'aide d'un ingénieux électromètre (mais ses travaux, effectués à une date non connue, ne seront publiés que 10 ans après ceux de Coulomb).

Il faut signaler l'extraordinaire difficulté qu'il y a à faire l'expérience de Coulomb. Malgré cela et malgré l'absence de répétition de l'expérience, la loi en $1/d^2$ fut immédiatement acceptée par l'Académie. Cela s'explique d'une part par la grande autorité de Coulomb, et d'autre part par la forte plausibilité d'une forme de loi newtonienne. En 1812, six ans après la mort de Coulomb, Poisson étudie la répartition des charges électriques à la surface d'un conducteur, et grand admirateur de Coulomb, souligne que «les résultats du calcul se sont trouvés parfaitement d'accord avec les nombreuses expériences de Coulomb». De son côté Jean Baptiste Biot écrit en 1816 que la «théorie de Coulomb... est l'une des mieux établies de la physique et elle donne à l'existence réelle des deux fluides électriques le plus haut degré de probabilité, pour ne pas dire une certitude entière».

3. Galvani, Volta et les débuts de l'électrocinétique

L'électricité animale de Galvani

Les années 1790 marquent une transition dans l'histoire de l'électricité. D'une part Coulomb vient de publier sa loi, d'autre part *Luigi Galvani* (1737-1798), professeur d'anatomie à l'Université de Bologne, constate que la cuisse de grenouille qu'il vient de disséquer se contracte à chaque fois que le nerf et le muscle sont reliés par un arc formé de deux métaux différents. Galvani attribue

ce phénomène à une «électricité animale», et entre en controverse avec Alexandro Volta (1745-1827) qui pense qu'il n'y a qu'une seule sorte d'électricité.

La découverte de Galvani est un bon exemple de découverte fortuite. Poggendorff en indique ainsi les circonstances : « Sa femme [Madame Galvani] souffrait d'une maladie de poitrine et les médecins lui avaient ordonné du bouillon de cuisses de grenouilles. Galvani avait coutume, par un sentiment de délicate sollicitude pour sa femme, et à cause de son habileté comme anatomiste, de les dépouiller lui-même. Un jour, que des grenouilles préparées se trouvaient sur la table, le hasard voulu que son aide appuyât la pointe d'un scalpel sur leurs nerfs cruraux, en même temps qu'une autre personne tournait, sans intention particulière, une machine électrique qui se trouvait dans la chambre et en tirait des étincelles. Immédiatement les grenouilles furent animées de convulsions violentes. Galvani venait précisément de quitter la chambre, mais sa femme s'y trouvait encore ; et ce fut elle qui fit la remarque que les grenouilles avaient des mouvements convulsifs, toutes les fois que l'on tirait une étincelle du conducteur. Elle fit part à son mari de son étrange observation. Galvani revint, se convainquit de l'exactitude du fait, et s'appliqua avec d'autant plus d'ardeur à l'étude de ces phénomènes qu'il crut y voir la confirmation d'une de ses hypothèses favorites, celle d'une électricité spéciale aux animaux ».

La pile de Volta

Volta se consacre alors à plein temps à la démonstration de son hypothèse ce qui le conduit à la découverte de la pile. Cette découverte, il la fait à la fin de 1799, il a alors 55 ans. Voici comment il décrit son invention à *Sir Joseph Banks* (1743-1820), président de la Royal Society : «... l'appareil... n'est que l'assemblage d'un nombre de bons conducteurs de différentes espèces, arrangés d'une certaine manière, 30, 40, 60 pièces ou davantage, de cuivre ou mieux d'argent, appliquées chacune à une pièce d'étain ou ce qui est beaucoup mieux, de zinc, et un nombre égal de couches d'eau ou de quelque autre humeur qui soit meilleur conducteur que l'eau simple, comme l'eau salée, la lessive, etc. ou des morceaux de carton, de peau, etc. bien imbibés de ces humeurs ; de telles couches interposées à chaque couple ou combinaison des deux métaux différents, une telle suite alternative, et toujours dans le même ordre, de ces trois espèces de conducteurs, voilà tout ce qui constitue mon nouvel instrument... ».

L'invention de la pile ouvre une nouvelle ère, celle de l'électrocinétique. La pile permet en effet d'obtenir un courant électrique *continu*. François Arago (1786-1853) traduit bien en 1831 l'admiration qu'elle suscite : « Cette pile de tant de couples dissemblables,

séparés par un peu de liquide, est, quant à la singularité des effets, le plus merveilleux instrument que les hommes aient jamais inventé... ».



Giuseppe Garavaglia del. et sculp.

ALEXANDER . VOLTA .
IN . RE . ELECTRICA . PRINCEPS .
VIM . RAIAR . TORPEDINIS . MEDITATVS .
NATVRAE . INTERPRES . ET . AEMVLVS

From Volta, "l'Identità del Fluida Electricita", 1814

En 1801 Volta fait une démonstration de ses expériences à l'Académie des Sciences devant Bonaparte. Celui-ci ordonne la construction en 1813 d'une grande batterie, de 600 unités, dans les sous-sols de l'École Polytechnique. De son côté, Humphry Davy dispose à la Royal Society, dès 1807, d'une batterie de 3000 unités grâce à laquelle il découvrira, par électrolyse, le sodium et le potassium. Le rôle joué à cette époque par les piles et les batteries de piles est un peu comparable à celui que joueront les accélérateurs de particules à partir des années 1930. Un moyen d'essais de forte puissance donne à ses propriétaires un avantage considérable dans l'exploration d'un nouveau domaine, alors totalement en friche. Les grandes batteries délivrent de forts courants continus (~ 10 A) et fournissent une puissance d'une dizaine de kilowatt. La chimie en est la principale bénéficiaire, elle dispose

ainsi, par le biais des électrolyses, d'un moyen inégalé pour la recherche de nouveaux éléments.

4. Ampère ou l'heure de la formalisation

La découverte d'Oersted

C'est encore la pile, mais cette fois de taille modeste, qui permet au danois *Hans Christian Oersted* (1777-1851) de faire une avancée remarquable. Celui-ci découvre en 1819, en préparant un montage destiné à l'un de ses cours, qu'une aiguille aimantée est déviée au voisinage d'un courant («conflit») électrique. Il se rend immédiatement compte de la portée de sa découverte, rédige un mémoire «*Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticum*» et l'adresse à toutes les sociétés savantes d'Europe. Le 4 septembre 1820, Arago rend compte de cette expérience à l'Académie des Sciences, le 11 septembre il y répète les expériences d'Oersted et lit son mémoire.

Ampère crée l'électrodynamique

Alors que ni Oersted, ni personne d'autre n'avait osé conclure de son expérience que l'électricité et le magnétisme étaient deux formes d'un même phénomène susceptible d'agir l'un sur l'autre, *André-Marie Ampère* (1775-1836), une semaine seulement plus tard, le 18 septembre, en donne une interprétation.

Dans un effort prodigieux, dont il rend compte pendant sept semaines consécutives à l'Académie, il crée l'électrodynamique. Le premier, il introduit la notion de courant électrique (et c'est avec une reconnaissance naturelle que l'unité associée porte son nom), et lui attribue une direction et un sens (par la fameuse règle du «bonhomme d'Ampère»). Ampère donne une forme mathématique à cette nouvelle science, ce qui lui permet en retour d'en prévoir et d'en calculer les effets. Ampère consigne ses principes fondamentaux de l'électrodynamique dans deux mémoires.

Le premier s'intitule «De l'action exercée sur le courant électrique par un autre courant, le globe terrestre ou un aimant». Il y décrit l'action mutuelle de deux courants électriques (ce qui lui permet de définir l'«ampère»), puis met en évidence l'action de la Terre (qu'il assimile à un grand aimant) sur un courant, et enfin interprète l'«action mutuelle entre un conducteur électrique et un aimant». Pour cela, il réalise en particulier des courants de forme circulaire (spires), puis des courants de forme hélicoïdale qu'il baptise «solénoïde». Il montre l'équivalence entre un aimant cylindrique et un solénoïde et interprète le magnétisme par l'introduction de «courants ampériens».

Le deuxième mémoire d'Ampère est consacré à «La détermination de la formule qui représente l'action mutuelle de deux portions infiniment petites de conducteurs voltaïques», il y introduit la «formule de

Laplace » ($d\vec{f} = id\vec{l} \wedge \vec{B}$) et admet que la force exercée entre deux éléments de courant varie en raison inverse du carré de la distance.

Paul Janet, dans une belle conférence donnée à la Société française des électriciens le 19 janvier 1933, souligne fort bien le travail réalisé par Ampère en 1820, travail qui lui vaudra d'être surnommé par Maxwell «le Newton de l'électricité». «Ses découvertes physiques réalisées en 1820, dit Paul Janet, quelques importantes qu'elles soient, ne sont qu'une faible partie de l'œuvre d'Ampère... Son plus beau titre de gloire ce n'est pas une invention mais une idée ; le magnétisme ramené à l'électricité. Voilà la grande et profonde pensée d'Ampère. Il fallait renoncer à expliquer l'électromagnétisme par le magnétisme qui pouvait bien produire des attractions ou des répulsions mais ne pouvait expliquer des rotations comme dans l'expérience d'Oersted. Par une intuition admirable, Ampère prévoyant que les solénoïdes se comporteraient comme des aimants, dès lors les aimants seraient eux aussi de simples solénoïdes et par conséquent, deux courants doivent agir l'un sur l'autre, fait nouveau que personne n'avait soupçonné jusque là». «Une prodigieuse intelligence, un cœur simple et bon qui connut les plus profondes amertumes : tel fut Ampère, l'une des figures les plus attachantes de notre histoire» disait L. de Launay.

André Marie Ampère : une vie

André Marie Ampère naît à Lyon le 20 janvier 1775, il ne fréquente pas l'école, son père le laissant pousser à sa guise «il n'a jamais eu d'autres maîtres que lui-même» dira-t-il. André Marie se montre précoce, étudiant tour à tour l'histoire naturelle de Buffon, Racine et Voltaire, l'Algèbre de Clairaut, les œuvres du marquis de l'Hôpital etc.. A 13 ans, il écrit un traité sur les sections coniques, et à 14 ans il lit et étudie les 22 volumes de l'Encyclopédie de d'Alembert et Diderot. Mais c'est finalement son mémoire de 1802 «Considérations sur la théorie mathématique du jeu» qui va décider de sa carrière de mathématicien. Delambre et Lagrange le font nommer répétiteur à Polytechnique en 1804. Il devient inspecteur général de l'université à 33 ans et professeur «d'analyse mathématique et de mécanique» à Polytechnique l'année suivante. En 1814, à 39 ans, il est élu à l'Académie des Sciences dans la section de géométrie. Ce n'est qu'en 1820 qu'il se tourne vers la physique pour y élaborer, comme on l'a vu, l'électrodynamique. En 1824, il devient professeur de physique au Collège de France. Toute sa vie il se passionne de toute idée nouvelle, se préoccupant tour à tour de philosophie, de chimie («loi d'Avogadro-Ampère», 1811), de mathématiques, de physique, de botanique ; «il sait tout, il comprend tout, il pénètre au-delà de tout» dit-on de lui. En électromagnétisme il est, avec

Michael Faraday, le précurseur de Maxwell. Il écrit : «je pense que tout ce qui s'est fait en physique depuis le travail du docteur Young sur la lumière, et la découverte de Monsieur Oersted, prépare une ère nouvelle pour cette science».

La vie réserve à Ampère les plus rudes épreuves. Il a 18 ans lorsque son père, monarchiste très libéral, est exécuté, le 24 novembre 1793 pour s'être opposé aux excès des révolutionnaires. Sa femme est terrassée par la maladie quatre ans après leur mariage, et son second mariage ne lui apporte que les pires déceptions. Modeste, mélancolique, timide, fort distrait, d'une parfaite probité, ignorant la jalousie et la susceptibilité, Ampère meurt le 10 juin 1836 à Marseille, à l'âge de 61 ans, au cours d'une tournée d'inspection.



ANDRÉ MARIE AMPIÈRE
(Mathématicien et Physicien),
Membre de l'Académie des Sciences,
Professeur au Collège royal de France et à
l'École polytechnique, des sociétés d'Edimbourg,
de Cambridge, de Genève, Helvétique, etc.
Né à Lyon (Dép. du Rhône) le 20 Janvier 1775.

ANDRÉ-MARIE AMPÈRE, un sacré bonhomme ! (Lyon 1775 - Marseille 1836)

Né à Lyon le 20 janvier 1775, **André-Marie Ampère** vécut son enfance dans la propriété familiale de Poleymieux-au-Mont-d'Or, localité située à vingt kilomètres au nord de la grande ville et surplombant la vallée de la Saône. Le jeune garçon *n'alla jamais à l'école* ; son père, fervent disciple de Rousseau, l'instruisit sans contrainte. Il apprit à lire dans l'*Histoire naturelle* de **Buffon**, s'initia au latin, à la poésie et manifestait à tout propos sa soif d'apprendre et d'inventer. Sa passion pour les mathématiques l'a conduit à rédiger un traité sur les sections coniques, il n'avait pas encore 14 ans. Il dévora littéralement la *Grande Encyclopédie* de **d'Alembert** et de **Diderot** ; doué d'une mémoire étonnante, il était capable à la fin de sa vie d'en réciter des articles entiers.

Hélas, les jours tranquilles, passés dans une ambiance studieuse, généreuse et apaisante, furent brutalement interrompus par l'exécution de son père le 23 novembre 1793 sous le couperet de la guillotine. Après un an de prostration, il reprenait goût à la vie, se mit à herboriser et se laissa envahir par une véritable frénésie de travail. Il fit la connaissance de **Julie Carron** qu'il épousa le 2 août 1799 ; de cette union naquit un fils Jean-Jacques Antoine. Obligé de gagner l'argent du ménage, il accepta un poste de professeur à l'École centrale de Bourg-en-Bresse puis au lycée de Lyon. Le bonheur conjugal ne dura pas longtemps puisque Julie décédait de la tuberculose le 13 juillet 1803. Devant cette disparition douloureuse, il quittait Lyon pour un poste de répétiteur à l'École Polytechnique ; il se consacrait désormais à la Science, apportant une large contribution dans des domaines aussi différents que les mathématiques, la mécanique, la chimie, l'électricité et même la philosophie.

Ses qualités sont reconnues ; après sa titularisation à l'Inspection Générale de l'Université en 1809, il entre à l'Académie des Sciences en 1814 dans la section Géométrie. Le plus bel hommage au grand homme a peut-être été rendu par **Paul Janet** (directeur de l'École Supélec de 1895 à 1936) qui a dit : « *Ampère fut homme tout simplement, avec ses amours et ses douleurs, ses alternatives de doute religieux et de foi profonde, son ardeur au travail et ses découragements, et avant tout sa*

recherche passionnée du vrai qui se résume dans le cri désespéré qu'il adressa à son ami Bredin : je ne trouve que des vérités, enseigne-moi la Vérité »

Le père de l'Électrodynamique



André-Marie Ampère (1775 - 1836)

L'Électricité moderne, et plus particulièrement l'Électrotechnique, ont pour origine les découvertes successives d'**Oersted**, **Ampère**, **Arago**, **Faraday**.

C'est par une lettre en date du 21 juillet 1820 : « *Expériences touchant l'effet du conflit électrique sur l'aiguille aimantée* », adressée aux électriciens notoires de

l'époque, que le physicien danois **Oersted** les informait du résultat de ses expériences concernant le mouvement d'une aiguille aimantée à l'approche d'un fil *voltaisé*. La nouvelle fut accueillie avec l'habituel septicisme par les membres de l'Académie des Sciences ; seuls, ou à peu près seuls, le suisse **Gaspard de la Rive** et les français **Arago** et **Ampère** furent passionnés par la nouvelle.

Ampère multiplia alors les expériences, accumulant découvertes sur découvertes et, du 18 septembre au 4 décembre 1820, ses communications à l'Académie des Sciences se succédèrent à une cadence effrénée. Un jour, il montrait qu'un « *solénoïde* », nom créé par lui pour désigner un enroulement *galvanique en hélice*, *voltaisé* et libre de mouvement, se comportait comme une aiguille aimantée. Une autre fois, il observait qu'un courant passant dans un fil peut en produire un autre dans un fil voisin et que deux courants parallèles s'attirent s'ils sont de même sens tandis qu'ils se repoussent s'ils sont de sens opposé (cette dernière propriété a été utilisée pour la définition de l'ampère, légale depuis le 1^{er} janvier 1948). Il exposa en particulier le résultat d'une expérience suggérée par Laplace sur le déplacement d'une aiguille aimantée au moyen d'un courant produit à grande distance par une pile ; il conclut par le projet d'un télégraphe électromagnétique comportant autant de fils conducteurs et d'aiguilles qu'il y a de lettres dans l'alphabet.

L'observation d'**Oersted** le conduisit également à définir un sens pour le courant : « *Si l'on se place par la pensée dans la direction du courant, de manière qu'il soit dirigé des pieds à la tête de l'observateur et que celui-ci ait la face tournée vers l'aiguille, c'est constamment à sa gauche que l'action du courant écartera de sa position ordinaire celle de ses extrémités qui se dirige vers le nord, dénommée pôle austral de l'aiguille aimantée parce que c'est l'homologue du pôle austral de la terre* ». Ajoutons qu'en cette fin d'année 1820, ses expériences menées alors en commun avec **Arago** débouchent sur la conception des électro-aimants et la théorie des aimants particuliers.

L'unité de mesure

C'est en 1881, lors des travaux du Congrès International des Électriciens que le nom d'**Ampère** fût choisi pour désigner l'unité d'intensité du courant électrique ; on l'avait appelée le weber et sa valeur dépendait des références métrique et massique, ainsi en Angleterre le weber était dix fois plus fort qu'en Allemagne. « *On a donc jugé préférable, expliquait Helmholtz, de supprimer ce nom (de weber) et de mettre à la place pour la nouvelle unité le nom d'Ampère, et ce choix est amplement justifié par les travaux du grand savant ; il a en outre l'avantage de joindre le nom d'un français à ceux des illustrations allemandes, anglaises et italiennes qui ont déjà servi de parrains aux autres unités* ». Quant au weber, ce nom ne tomba pas dans l'oubli puisqu'en 1890 il devint celui de l'unité du flux d'induction magnétique.

La maison d'Ampère à Poleymieux - Le musée de l'Électricité 69250 Poleymieux-au-Mont-d'Or.

Ouvert tous les jours sauf le mardi, de 9h à 12h - de 14h à 18h. (Tel : 04 78 91 90 77)

Régulièrement à court d'argent, **Ampère** vendit les terres du domaine familial et finalement la demeure de Poleymieux pour acheter dans la capitale, en 1818, une maison avec jardinnet au n°19 de la rue des Fossés Saint-Victor qui allait devenir célèbre par son laboratoire.

En 1928, sur les conseils de **Paul Janet**, deux généreux industriels américains achetèrent le domaine qui venait d'être mis en vente. Ils en firent don à la Société française des électriciens (l'actuelle S.E.E) qui le confia deux ans plus tard à la **Société des amis d'André-Marie Ampère** nouvellement créée avec la mission d'installer dans la maison un musée destiné à perpétuer la mémoire de l'illustre lyonnais.

Ce musée, limité tout d'abord aux pièces de la maison du maître où avait habité la famille **Ampère**, a été inauguré en 1931 puis étendu progressivement à la totalité des bâtiments constituant la **Maison d'Ampère**.

Au rez-de-chaussée du premier bâtiment se trouve la *salle à recevoir* qui contient encore des meubles de la famille du savant et dans l'une des salles du premier étage, dite des « **3 Ampère** » sont présentés des documents sur la vie d'**Ampère** (journal intime, mémoires), de son père et de son fils Jean-Jacques Antoine qui fût un homme de lettres, historien et grand ami de **Madame Récamier**. Deux salles de cet étage sont réservées à 18 expériences d'électromagnétisme conçues et réalisées par **Ampère** ainsi qu'à 5 autres élaborées par des physiciens de son époque ; les visiteurs peuvent les mettre en action. Dans les autres salles du bâtiment sont exposés des appareils anciens d'électrostatique (XVIII^e siècle) ainsi qu'une collection de piles et accumulateurs.

Dans la grange aménagée, le visiteur sera intéressé par les nombreuses machines électriques qui y sont regroupées ; de la machine de **Pixii** (1832) construite sur les indications d'**Ampère** à la dynamo homopolaire **Poirson** (1930) conçue pour fournir 3000 ampères sous 25 volts pour l'électrolyse, c'est un merveilleux parcours initiatique que l'on peut suivre. On découvrira également de très beaux appareils de mesure : des galvanomètres et électrodynamomètres, des télégraphes, des lampes d'éclairage, etc..

Références bibliographiques

Le Grand Ampère (*) de Louis de Launay, Librairie académique Perrin (1925), réédition pour la Société des amis d'André-Marie Ampère (1983).

Le Guide de la visite (*) par Robert Moise, réédition 1996 ; description minutieuse des salles et du matériel exposé.

Zigzag parmi les personnages de la Fée Électricité, 1983, (œuvre peinte de Raoul Dufy pour l'exposition universelle de 1937) par André Berne Joffroy ; publication du musée d'Art Moderne de la Ville de Paris.

(*) disponible au Musée Ampère.

Autres éléments bibliographiques

Théorie mathématique des phénomènes électrodynamiques uniquement déduite de l'expérience par A. M. Ampère, (Mémoires communiqués à l'Académie Royale des Sciences de 1820 à 1825). Réimpression par les Éditions Jacques Gabay 1990.

Le génial bonhomme Ampère, roman biographique de Pierre Marion (sortie en décembre 1999, prix public : 149 ff) - Éditions Mémoire des Arts, BP 4553, 69244 Lyon Cedex 04.

Jean-Pierre CARON,
L2EP-Groupe Ensam, 8, Bd Louis XIV - 59046 Lille Cedex

« Un écueil de l'enseignement consiste à n'offrir à celui dont on veut former l'entendement que les rapports les plus faciles à saisir en rétablissant entre le principe et la conséquence toutes les vérités intermédiaires. S'il n'était question que d'arriver à cette conséquence, ce serait la marche la plus facile ; mais il ne s'agit pas tant de faire adopter les déductions déjà faites que de rendre l'esprit capable d'en faire de nouvelles... Si le propre du génie est de franchir à cet égard d'immenses intervalles, n'est-ce pas l'étouffer que de ne lui permettre de passer jamais d'une idée qu'à l'idée la plus voisine ?... »

André-Marie Ampère (1775-1836)

(*"Le Grand Ampère"* par Louis de Launay,
Librairie académique Perrin, 1925)

Vente des publications du cercle 13-01

Année 1994-95

N°1 La machine asynchrone
N°2 Association machine asynchrone et convertisseur statique
N°3 La machine synchrone

Prix au numéro 71 F TTC frais d'envoi compris.

Prix des trois numéros 175 F TTC frais d'envoi compris.

Pays hors CEE

Prix au numéro 85 F TTC frais d'envoi compris.

Prix des trois numéros 210 F TTC frais d'envoi compris.

Année 1995-96

N°4 Influence des convertisseurs statiques sur les réseaux
N°5 L'électrothermie
N°6 Première approche sur les réseaux

Prix au numéro 71 F TTC frais d'envoi compris.

Prix des trois numéros 175 F TTC frais d'envoi compris.

Pays hors CEE

Prix au numéro 85 F TTC frais d'envoi compris.

Prix des trois numéros 210 F TTC frais d'envoi compris.

Année 1996-97

N°7 La machine à courant continu
N°8 La conversion d'énergie
N°9 Les composants inductifs et capacitifs en électronique de puissance
N10 Pratiques pédagogiques et réalités industrielles.

Prix au numéro 71 F TTC frais d'envoi compris.

Prix des quatre numéros 235 F TTC frais d'envoi compris.

Pays hors CEE

Prix au numéro 85 F TTC frais d'envoi compris.

Prix des trois numéros 280 F TTC frais d'envoi compris.

Année 97-98

N°11 Le transformateur
N°12 Les capteurs
N°13 Le génie électrique dans l'armement
N°14 Pratiques pédagogiques et réalités industrielles.

Prix au numéro 71 F TTC frais d'envoi compris.

Prix des quatre numéros 235 F TTC frais d'envoi compris.

Pays hors CEE

Prix au numéro 85 F TTC frais d'envoi compris.

Prix des quatre numéros 280 F TTC frais d'envoi compris.

Année 1998-99

N°15 Les aimants et électroaimants
N°16 L'automatique en électrotechnique.
N°17 L'appareillage basse-tension
N°18 Pratiques pédagogiques et réalités industrielles.

Ces derniers numéros ne peuvent être vendus séparément.

Prix des quatre numéros 180 F TTC frais d'envoi compris

Pays hors CEE

Prix des quatre numéros 240 F TTC frais d'envoi compris.

Recueil des journées 3EI 99

Contrôle et commande des systèmes électrotechniques

195 F TTC frais d'envois compris (230 F pays hors CEE°)

Thème : la traction électrique ferroviaire

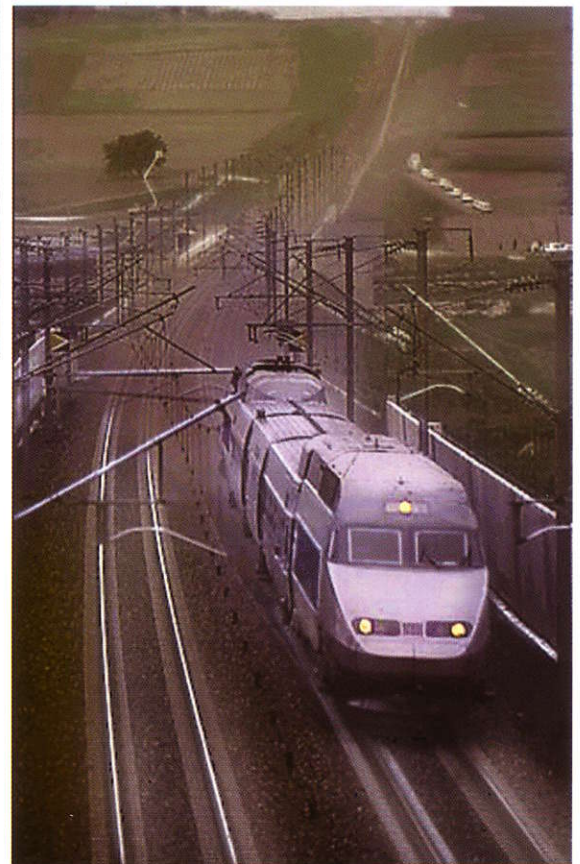
Photos :
Direction du matériel de la SNCF



TER 2N



Rame TGV Duplex



Rame TGV record du monde



C.E.M. et électronique de puissance

Pour mieux comprendre les implications de la compatibilité électromagnétique en électronique et électrotechnique. J.-L. Cocquerelle. *Broché*, 240 p. € 33,54 / 220 FF

La commande par ordinateur. Application aux procédés industriels. 100 exercices et problèmes résolus

Une approche essentiellement pratique des problèmes de commande numérique. P. Borne, M. Ksouri. *Broché*, 288 p. € 35,06 / 230 FF

Modélisation et commande de la machine asynchrone

Clair et rigoureux, l'ouvrage prend en compte les évolutions considérables de l'électrotechnique et permet d'appréhender les fondements du contrôle vectoriel. J.-P. Caron, J.-P. Hautier. *Relié*, 304 p. € 51,83 / 340 FF

Introduction à l'analyse structurée. Programmation en Pascal et C

Des outils simples et efficaces pour le programmeur débutant. J.-P. Brassart. *Broché*, 120 p. € 25,92 / 170 FF

Dictionnaire d'automatique, de génie électrique et de productique Anglais-Français/Français-Anglais

Un dictionnaire original qui associe la rigueur des termes et expressions scientifiques à la richesse du jargon professionnel. P. Borne, N. Quayle, O. Borne, M. G. Singh. *Relié*, 530 p. € 129,58 / 850 FF

Le radio-amateur. Préparation à l'examen technique. Manuel de référence

Cette nouvelle édition entièrement révisée d'un ouvrage à succès présente, entre autres, 600 exercices avec solutions. Elle met l'essentiel de la technique radio-amateur à la portée de tous. O. Pilloud. *Broché*, 544 p. € 41,16 / 270 F

Introduction à la commande floue

La logique floue au service de la commande des processus : théorie et exercices. P. Borne, J. Rozinoer, J.-Y. Dieulot, L. Dubois. *Broché*, 110 p. € 24,39 / 160 FF



Chers Collègues

Nous souhaitons que vous participiez à la rédaction de cette revue en nous adressant des articles sur les thèmes proposés, mais aussi sur d'autres thèmes d'études que vous avez menés.

Adressez votre proposition sur disquette au format word 95 ou 97, accompagnée d'une copie papier.

Un résumé de quelques lignes doit permettre de présenter le sujet.

Adresse : SEE La Revue 3EI
48 rue de la Procession 75 724 Paris CEDEX 15