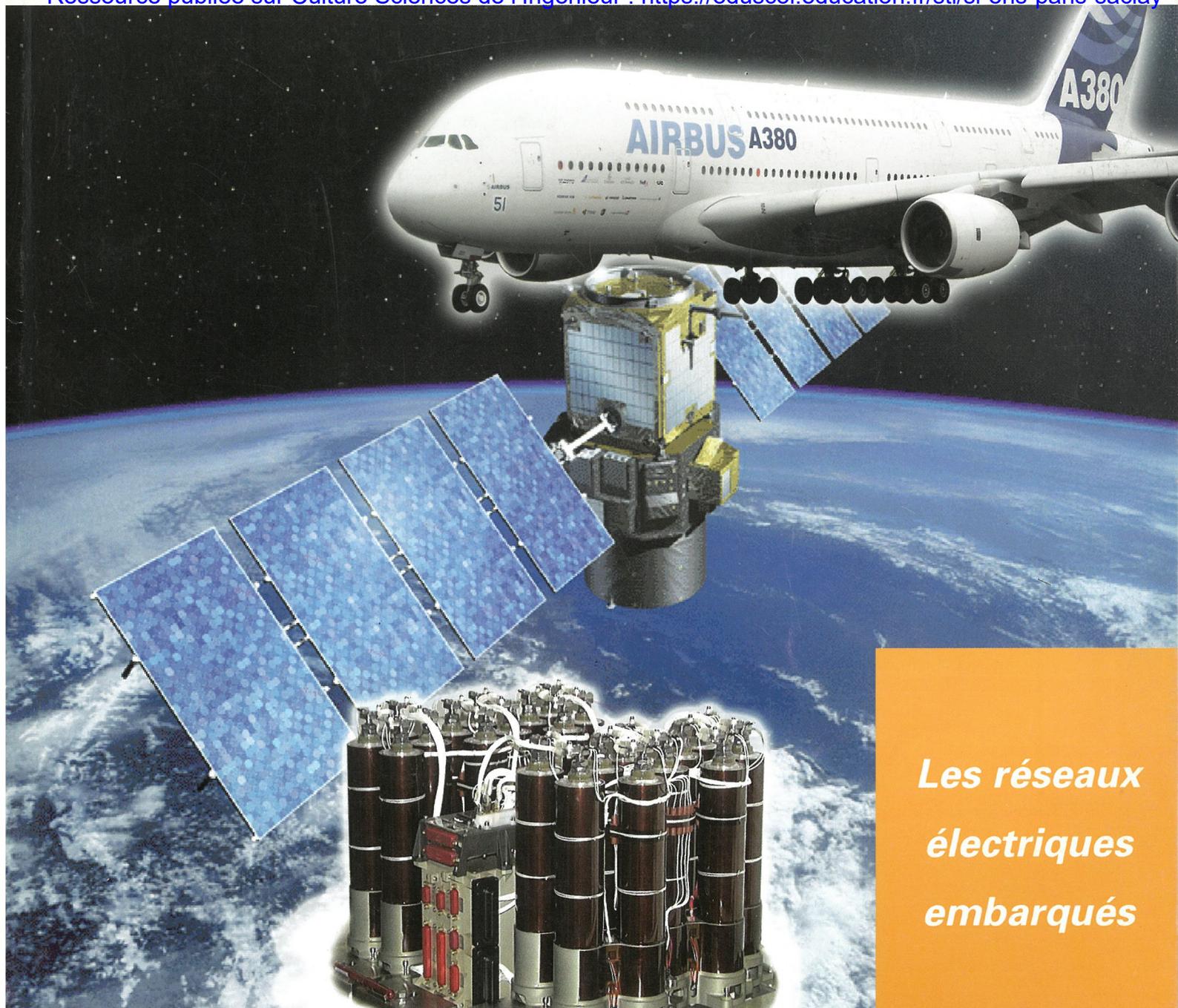


12^e année

La Revue **SEE.I**



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



*Les réseaux
électriques
embarqués*

Montage réalisé d'après : A380 en présentation au salon du Bourget (photo Ov. Sala - Juin 2005) - Batterie Lithium-ion (photo SAFT) - Satellite Calipso 04 (photo CNES).

Publication trimestrielle du Cercle Thématique 13.01 de la SEE

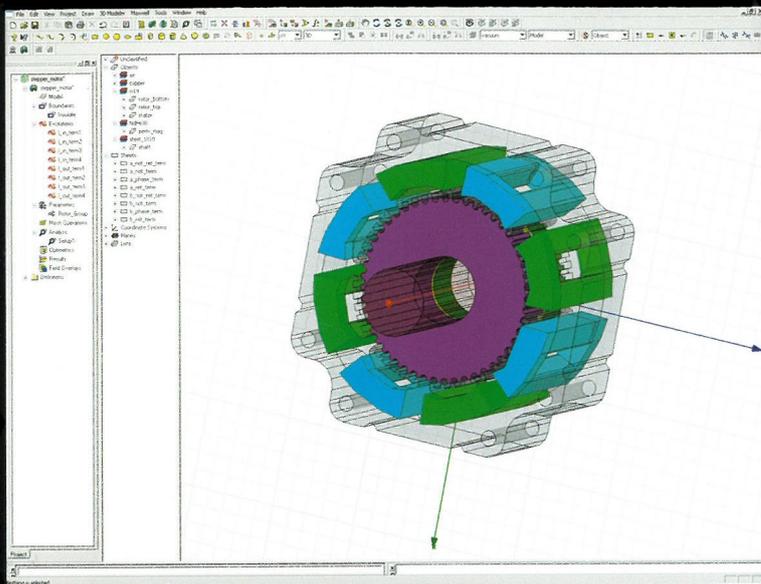
ENSEIGNER L'ELECTROTECHNIQUE ET L'ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE



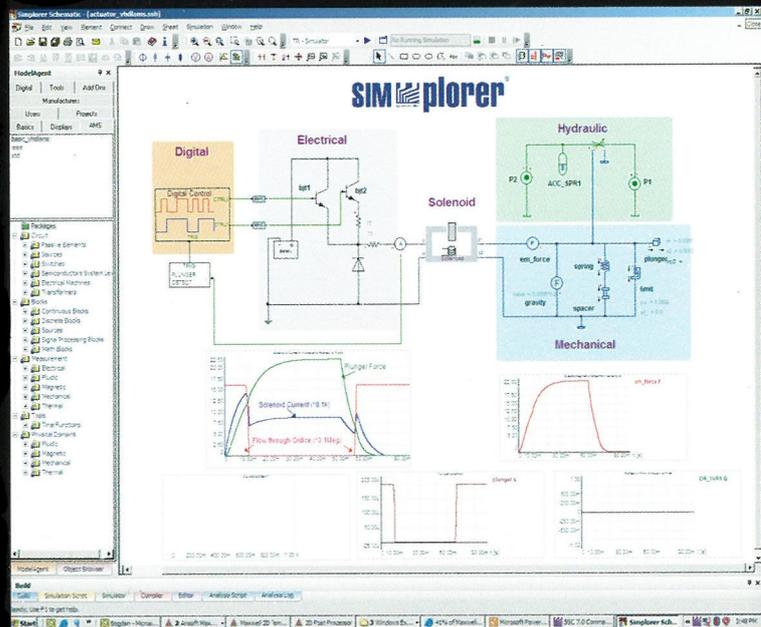
*Société de l'Electricité, de l'Electronique
et des Technologies de l'Information
et de la Communication*

N° 43 - Décembre 2005

Du composant...



...au système



Maxwell®

Nouvelle interface Windows

Importation de géométries
(CATIA, PROE/.iges, Step, .SAT...)

Script multiparamétrique,
Primitives utilisatrices pour génération de modèles

Mouvement de rotation, translation,
pivot et rotation de pièce non cylindrique

Support des systèmes 64 bits;
OS: Solaris 7+ / Windows 32 bits et 64 bits / Linux

SIMPLORER®

System simulation

Simulation circuit, controle et machine d'états

Couplage avec Maxwell pour création de modèles
physiques

Importation modèles Spice

Analyses avancées (Monte Carlo, Optimisations,...)

Couplage Matlab/Simulink/MathCAD/LabView

Modélisation VHDL-AMS (IEEE Std.1076.1)

Recevez gratuitement votre version d'évaluation
et ses modèles en vous inscrivant sur:

www.ansoft.com/3E109



ANSOFT France SAS - 153 rue Fourny, BP 513- 78535 BUC Cedex
Tel: +33 1 39 56 67 99 - Fax: +33 1 39 56 64 14



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

17, rue Hamelin, PARIS 75 783 CEDEX 16
Tel : 01 56 90 37 00 Fax : 01 56 90 37 19
site web : www.see.asso.fr

La Revue 3EI
publication trimestrielle
du **Cercle Thématique 13-01**
de la SEE

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

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

<p>La Revue 3EI, Édition SEE, 17 rue Hamelin 75 783 PARIS CEDEX 16</p> <p>Directeur de la publication Jean-Gabriel REMY Président de la SEE</p> <p>Rédacteur en Chef François BOUCHER</p> <p>Adresser les propositions d'article à F. Boucher : revue3ei.art@voila.fr</p> <p>Communication Micheline BERTAUX communication@see.asso.fr</p> <p>Publicité en Régie TRENDICE CONSEIL</p> <p>Philippe MINGORI 01 45 74 96 47</p> <p>Martine FERRON 01 45 74 96 48</p> <p>Abonnement (4 numéros par an) déc. 2005, mars, juin, sept. 2006. tarifs TTC : <u>Individuel</u> : France et CEE.....35 € Pays hors CEE.....45 € <u>Collectivités</u> France et CEE.....50 € Pays hors CEE.....63 €</p> <p>Réalisation et impression Repro-Systemes 23, rue de Verdun 77 181 Le Pin</p> <p>Routage et Expédition Départ Presse ZI les Richardets 93 966 Noisy le Grand</p> <p>Dépôt Légal : décembre 2005</p> <p>Commission Paritaire 1207 G 78028 ISSN 1252-770X</p>	<p style="text-align: right;">Sommaire du n°43</p> <p style="text-align: center;">Thème : réseaux embarqués .</p> <p>p. 2 <i>Éditorial,</i> p. 3 <i>Publications, Informations, Journées d'études, conférences</i></p> <hr/> <p>p. 6 <i>Alimentation électrique des engins spatiaux</i> Jean Pierre CATANI CNES</p> <p>p. 13 <i>L'avion plus électrique : nouvelle génération de réseaux de bord</i> Olivier LANGLOIS Etienne FOCH Xavier ROBOAM Hubert PIQUET Airbus France EESD , INPT-ENSEEIH / CNRS TOULOUSE</p> <p>p. 19 <i>Comparaison des réseaux alternatifs et continus du point de vue de leur stabilisation</i> Régimes transitoires pollution harmonique Jacques COURAULT AREVA T & D</p> <p>p. 35 <i>Etude d'un réseau de bord</i> Marc ODONT IUT GRENOBLE</p> <p style="text-align: center;">Applications Industrielles, Recherche et développement</p> <p>p. 43 <i>Prévision de l'énergie éolienne pour son intégration au dispatching tunisien</i> Souad CHEBBI Chokri BOUCHOUCHA Salem LEFI Mohamed ANNABI ESTT Tunis</p> <p>p. 50 <i>Chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque</i> Commande MPPT Jérôme FADAT ESIEE AMIENS</p> <p>p. 63 <i>Ecoconception de produits électriques et électroniques enjeux outils exemples</i> Linda LESCUYER Marc JANIN Pôle d'expertise en écoconception CODDE</p> <p style="text-align: center;">Histoire des sciences et des techniques.</p> <p>p. 69 <i>L'évolution de l'électronique de puissance en traction ferroviaire suite 4^{me} partie</i> Les GTO règnent sur les matériels français pendant une dizaine d'années Christian LECLERC, Ingénieur Honoraire de la SNCF</p>
--	---

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

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

Le thème des réseaux embarqués nous emmène dans l'espace et sur l'eau avec des articles qui traitent des réseaux de bord d'avions, de satellites ou de navires. Il nous manque le secteur de l'automobile mais les professionnels de ce secteur penchés sur le berceau de voitures innovantes n'ont pas pu nous fournir d'articles pour la parution de ce numéro : ces articles seront publiés dans de prochains numéros.

Bilan des abonnements : le nombre d'abonnés est en légère baisse cette année. Il s'élève à 780 alors que l'année dernière nous dépassions les 800. Sans doute la concurrence des revues en ligne ou bien la légère augmentation des abonnements collectifs a provoqué cette diminution. Nous voudrions que vous soyez conscients que nous avons besoin de votre soutien pour que la revue continue à vivre. Pour cela

ABONNEZ-VOUS !!!! et FAITES CONNAITRE LA REVUE !!!

Comité de publication : Gérard Delavier a souhaité se consacrer à d'autres activités. Il a fourni un travail considérable au sein de notre équipe et bien que ne faisant plus partie du comité de publication il continue à participer à la vie de la revue. Souhaitons-nous de savoir conserver l'esprit qu'il a insufflé à la revue ainsi que son niveau d'exigence. Bernard Multon dirige maintenant chez HERMES la mise en place d'une collection d'ouvrages en Génie Electrique intitulée « Sciences et Technologies de l'Energie Electrique ». Il est à la recherche d'auteurs d'ouvrages afin d'atteindre l'objectif ambitieux de créer une série d'ouvrages pédagogiques contribuant à redorer le Génie Electrique. Il est remplacé au sein du comité de publication par Hamid Ben Ahmed.

Numéro de Septembre : A l'initiative de Hamid Ben Ahmed, le numéro de Septembre consacré aux applications pédagogiques et aux réalités industrielles sera pris en charge par un groupe d'enseignants de l'académie de Rennes . Le défi est lancé et qui le relèvera en Septembre 2007 ? Lille, Toulouse, Bordeaux... ? Nous attendons vos candidatures ! Ce numéro pris en charge par les équipes pédagogiques dans une académie serait l'occasion de révéler la richesse de la communauté éducative dans notre domaine et de valoriser le travail des enseignants. Nous soutenons très vivement cette initiative qui permettra à la revue de remplir son rôle de support d'échanges des enseignants et du lien entre les enseignants et les professionnels de l'industrie.

Nous serons heureux de recevoir vos articles que vous aurez déposé dans la boîte aux lettres dont l'adresse e-mail est revue3ei.art@voila.fr

Nous envisageons l'édition d'un CDROM réunissant les articles déjà parus dans la revue. Pouvez-vous nous donner votre avis à ce sujet en utilisant la boîte aux lettres dans laquelle on dépose les articles ?

Bonne lecture.

Le Comité de Publication de la Revue3EI

La Revue 3EI
Comité de publication

Patrick BASTARD
Hamid BEN AHMED
Jean BONAL
François BOUCHER
Jean-Claude BOUDENOT
Lucien DESCHAMPS
Jean FAUCHER
Gilles FELD
François FOREST
Jean-Philippe ILARY
Chérif LAROUCI
Marie Michèle LE BIHAN
Franck LE GALL
Sylvaine LELEU
Pascal LOOS
Claude OBERLIN
Oviglio SALA
Jean-François SERGENT
Jean-Claude VANNIER
Pierre VIDAL

Pour vos insertions
publicitaires, contacter :
TRENDICE CONSEIL

Philippe MINGORI
01 45 74 96 47
Martine FERRON
01 45 74 96 48

Abonnement à la Revue 3EI, année 2005-2006 :
Numéros : 43 (décembre 2005), 44 (mars), 45 (juin) et 46 (septembre 2006).

<u>Abonnement individuel :</u>	<u>Abonnement collectif souscrit par bon de commande (bibliothèque, CDI, laboratoire, entreprise, etc.)</u>
France et Pays de la CEE : 35 €, TTC	France et Pays de la CEE : 50 €, TTC
Pays hors CEE : 45 €, TTC	Pays hors CEE : 63 €, TTC

Une seule adresse :

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

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

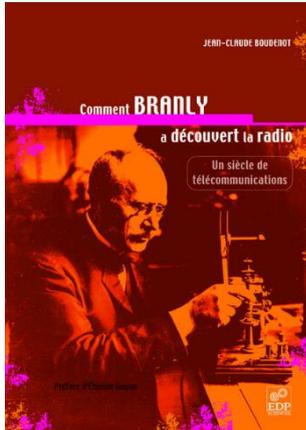


Comment Branly a découvert la radio

Un siècle de télécommunications

Jean-Claude BOUDENOT, Préface d'Etienne Guyon

Édition EDP Sciences, ISBN 2-86883-839-1, format 17 X 24, 200 pages



Après le succès de l'ouvrage « Comment Einstein a changé le monde », EDP Sciences est heureuse de vous annoncer la dernière parution de Jean-Claude BOUDENOT, « **Comment Branly a découvert la radio** ».

« En 1890, un savant solitaire découvrait un phénomène qui allait révolutionner les moyens de communications... » « Comment Branly a découvert la radio » retrace l'aventure qui va mener sur un rythme fulgurant, de la découverte de la radioconduction à la révolution technologique et culturelle que nous connaissons.

Au tournant du XX^e siècle, les avancées en physique révéleront l'importance de la découverte de Branly. Après les premières tentatives de transmission sans fil, une quinzaine d'années seulement séparera ces premiers essais sur quelques mètres (1890) à la première liaison TSF à travers l'Atlantique (1901). Cet essor extraordinaire sauvera la Tour Eiffel de la destruction et sera immortalisé par le nom donné au quai qui la jouxte, le fameux quai Branly. Aujourd'hui, les télécommunications utilisent l'ensemble du spectre offert par les ondes électromagnétiques : un monde d'une puissance impressionnante, qui est loin d'avoir révélé tous ses effets et ses applications.

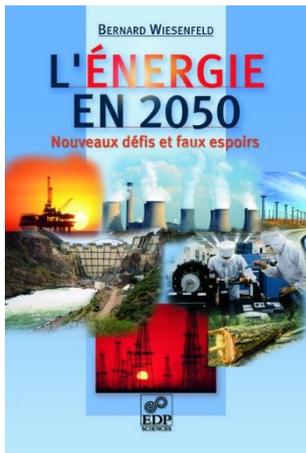
Le livre présente la vie de cet homme extraordinaire au milieu de la science du XIX^e siècle, le roman de sa découverte et du développement de la TSF. Une dernière partie présente l'application de cette découverte aux XX^e et XXI^e siècles, avec son cortège d'ondes électromagnétiques.

L'énergie en 2050

Nouveaux défis et faux espoirs

Bernard WIESENFELD

Édition EDP Sciences, ISBN 2-86883-818-9, format 15.5 X 24, 238 pages



EDP Sciences est heureuse de vous annoncer la parution d'un ouvrage clé sur l'énergie et l'environnement à l'horizon 2050.

Pénurie, réchauffement climatique, niveau de vie, développement... Ces notions percutent aujourd'hui les modes historiques de production et de consommation de l'énergie. À l'avant-garde de cette révolution se posent des questions technologiques de premier plan, telles que la science n'a pu encore y apporter des réponses : le problème du réchauffement climatique, les questions de niveau de vie ensuite, de développement, et pour finir, de modèle de société...

L'énergie en 2050 s'emploie à traiter ces questions avec calme et rigueur. Sont abordées ainsi :

- les différentes énergies et modes de production industrielle : origine physique de chaque énergie, qu'elle soit renouvelable ou non, quels sont les problèmes liés à chaque type de production industrielle ?
- les relations entre énergie et société : notion de développement durable, de réchauffement climatique ; quels sont les risques que nous encourons ?

L'ouvrage se termine sur les besoins en énergie en 2050 et décrit l'évolution des politiques énergétiques dans le monde.

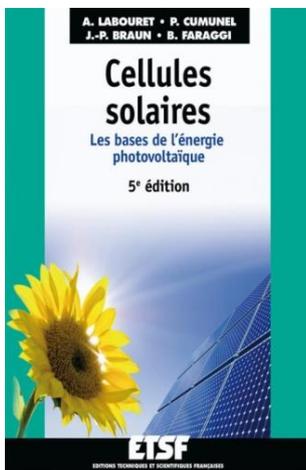
Cet ouvrage rigoureux apporte des réponses scientifiques à des questions qui concernent tous les citoyens : il se veut informatif et didactique.

Cellules solaires : Les bases de l'énergie photovoltaïque

LABOURET, P. CUMUNEL, J-P. BRAUN, B. FARAGGI

Éditions Techniques et Scientifiques Françaises

ISBN 2 10 049613 1, format 15.5 X 24, 118 pages



Que la lumière soit... pleine d'énergie !

Alors même que l'apport énergétique du soleil est quasi illimité, moins de 1 % de la consommation énergétique mondiale est issue de l'énergie solaire. On réalise le chemin qu'il nous reste à parcourir pour exploiter pleinement tout le potentiel de cette énergie renouvelable et écologique. Cet ouvrage vous convie à découvrir l'énergie solaire photovoltaïque, électricité produite à partir d'une source de lumière naturelle ou artificielle, grâce à des cellules ou panneaux solaires. Conçu par une équipe d'ingénieurs et de formateurs spécialistes du domaine, il présente de façon théorique et pratique tous les aspects de cette technologie :

- l'ensoleillement et la lumière ;
- les cellules solaires, le stockage de l'énergie
- les usages de l'énergie photovoltaïque ;
- des montages simples à réaliser à base de photopiles et de panneaux solaires.

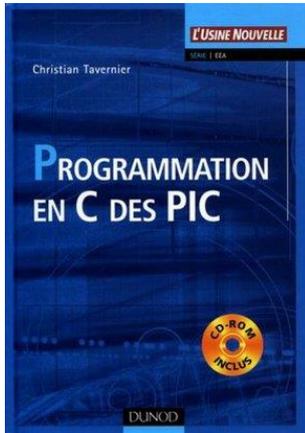


Programmation en C des PIC (CD-ROM inclus)

Christian TAVERNIER

Édition Dunod, technique et Ingénierie, série EEA

ISBN 2 10 048894 5, format 17 x 24, 250 pages



Les microcontrôleurs PIC connaissent, depuis une dizaine d'années, un succès mondial fulgurant. Ils offrent, aujourd'hui, de très nombreuses possibilités en applications industrielles (capteurs, automates, etc.). Leur programmation en C, langage très répandu et plus intuitif que les langages « natifs » du PIC, renforce encore davantage leur simplicité d'utilisation et leur champ d'applications.

Cet ouvrage guide le lecteur dans l'apprentissage et la mise en oeuvre de la programmation en C des microcontrôleurs PIC. Le cédérom fournit, en outre, les listings des programmes de l'ouvrage ainsi qu'un certain nombre de versions d'évaluation de compilateurs C, permettant aux lecteurs de mettre immédiatement en pratique ce qu'ils ont appris.

Au sommaire de ce livre:

- Les différentes familles de PIC ;
- Les compilateurs C pour PIC;
- Le langage C des compilateurs pour PIC ;
- Utilisation de l'environnement de programmation et de développement;
- Programmeur en circuit et bootloader ;
- Kits et cartes de développement;
- Schématisation d'interfaces et programmes associés ; - Annexes.

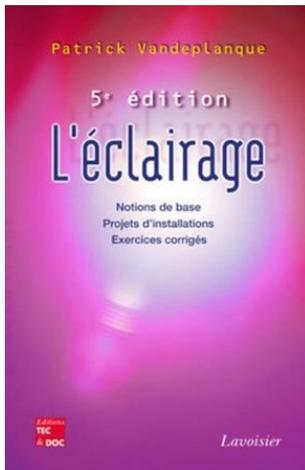
Cet ouvrage s'adresse aux ingénieurs et techniciens en électronique ainsi qu'aux enseignants et aux étudiants en électronique.

L'éclairage

Notions de base - Projets d'installations - Exercices corrigés 5^e édition

Patrick VANDEPLANQUE

Édition Tech & Doc – Lavoisier, ISBN 2-7430-0799-9, format 15.5 X 24, 280 pages



L'éclairage constitue l'outil indispensable pour concevoir, mettre en oeuvre ou étudier des installations d'éclairage courantes, intérieures ou extérieures.

Cette 5^e édition complète et actualise les thèmes principaux des éditions précédentes : photométrie ; appareillage ; éclairages intérieur et extérieur ; extensions.

Le chapitre des extensions s'enrichit notamment de compléments théoriques qui permettent à l'ingénieur ou au technicien de développer ses propres outils de calcul ; il lui propose les bases indispensables pour comprendre la littérature technique spécialisée et aborder des problèmes de recherche. Autre nouveauté, la dernière partie rassemble 47 **sujets d'examens, de niveau licence** et maîtrise. Ces exercices sont suivis de corrigés qui décrivent les étapes essentielles du raisonnement et fournissent à l'auteur occasion d'introduire de nouvelles notions.

Cette 5^e édition s'enrichit ainsi d'une dimension pédagogique et Adresse aux étudiants et aux enseignants, de l'IUT au maîtrise 2. Il passionnera également tout autodidacte soucieux d'élargir ses connaissances et d'acquérir une meilleure maîtrise des calculs.

Patrick VANDEPLANQUE est ingénieur de l'Institut industriel du Nord (École centrale de Lille), docteur ingénieur, agrégé de physique appliquée et maître de conférences à l'université d'Artois.

Lire la revue 3EI c'est bien et même très bien,

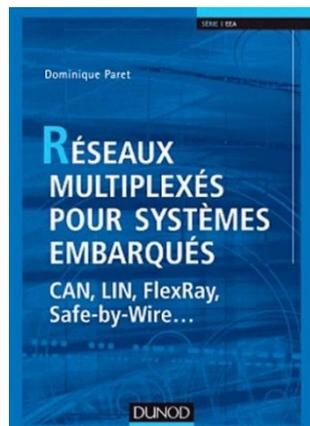
Lire la revue 3EI en étant abonné c'est encore mieux !!!!



Réseaux multiplexés pour systèmes embarqués CAN, LIN, FlexRay, Safe-by-Wire...

Dominique PARET

Édition Dunod, technique et Ingénierie, série EEA,
ISBN 2 10 005267 5, format 17 x 24, 430 pages



Cet ouvrage décrit les différents types de réseaux multiplexés, aujourd'hui présents dans de multiples domaines industriels (commande de machine-outils, de ligne de production, automobile, avionique, etc.). Il se compose de deux parties :

- La première traite du bus CAN, des possibles subdivisions de ses couches physiques, des problèmes de conformité, de ses couches applicatives (CAL, CAN Open, OSEK...), des outils hardware et software nécessaires au développement, à la production, à la maintenance... Ses limites fonctionnelles et applicatives sont également abordées, de même que les principes et les contenus des protocoles TTCAN et FlexRay.

- La seconde décrit en détail le bus LIN, un nouveau venu. Elle expose ses fondements, ses particularités, ses problèmes de mise en oeuvre et la manière de les résoudre. Les différentes contraintes et possibilités de passerelles entre bus sont aussi présentées, ainsi que la conception des fail safe - System Basis Chip (SBQ) et des passerelles gateway, et les applications de type X-by-Wire. Le Safe-by-Wire est traité dans le cadre de son application dans les systèmes de communication des commandes d'airbag.

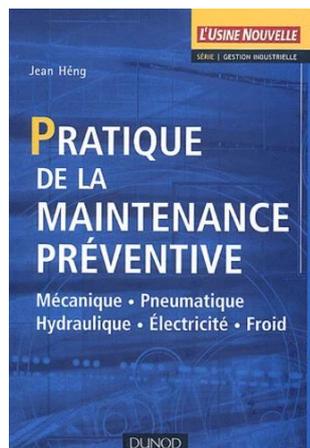
À titre d'application, l'ouvrage se termine par une description des très nombreux bus et liaisons séries filaires et non filaires, internes (12C, IEEE 1394...) ou externes (GSM, Bluetooth...), que les industriels emploient aujourd'hui dans l'industrie automobile.

Pratique de la maintenance préventive

Mécanique • Pneumatique Hydraulique • Électricité • Froid

Jean HÉNG

Édition Dunod, technique et Ingénierie, série Gestion Industrielle
ISBN 2 10 049247 0, format 17 x 24, 388 pages



La maintenance préventive consiste à vérifier l'état de fonctionnement et d'usure des matériels, de façon régulière et planifiée, afin de suivre leur dégradation et de prévenir les pannes.

Cet ouvrage constitue un véritable guide pratique pour la mise en oeuvre d'une politique de maintenance préventive dans l'entreprise:

- la première partie expose les méthodes permettant de mettre en place un plan de maintenance préventive ;

- la deuxième partie propose une centaine de fiches pratiques décrivant les actions de maintenance préventive à entreprendre, pour chaque type de matériel (contrôles non destructifs, mécanique, pneumatique, hydraulique, électricité, automatisme, froid).

Ce livre constitue un support de réflexion et de travail indispensable aux responsables, ingénieurs et techniciens de maintenance soucieux de mettre en place, au sein de leur entreprise, une maintenance fiable adaptée aux enjeux économiques actuels.

Journées EEA (section Électrotechnique)

15 et 16 mars 2006, Supélec Gif-sur-Yvette

« Ouverture des marchés de l'électricité »

Depuis quelques années, la production d'énergie électrique s'ouvre peu à peu à la concurrence dans tous les pays de la communauté européenne. Concernant d'abord les clients industriels, cette évolution s'est étendue depuis juillet 2004 à tous les clients commerciaux pour concerner, dès juillet 2007, l'ensemble des clients domestiques français. A ces bouleversements organisationnels viennent se superposer des évolutions, en partie liées à des objectifs environnementaux européens très forts, favorisant l'émergence des énergies renouvelables.

Ce thème d'actualité ne peut plus être ignoré. Les spécialistes mettront à votre portée les notions indispensables.

Renseignements et inscription : www.supelec.fr/ecole/eei/eea2006

Alimentation électrique des engins spatiaux

Jean-Pierre CATANI

Centre national d'études spatiales

18, Avenue Edouard-Belin, 31401 Toulouse Cedex 9

Résumé : Pour son fonctionnement, l'engin spatial est tributaire de l'énergie électrique. Parce qu'il est mobile et autonome, il doit produire à bord son électricité. Hormis le cas exceptionnel des véhicules habités, il n'est jamais prévu de rechargement en combustible, l'autonomie doit donc être prévue pour toute la durée de la mission, de quelques minutes pour un lanceur de satellites à plus de quinze ans pour les satellites géostationnaires ou les sondes d'exploration planétaire. Pour cette même raison on ne peut compter sur la possibilité d'entretien ou de réparation, la durée de vie des équipements soumis à usure et leur fiabilité doivent répondre au même objectif. On expose la configuration des systèmes d'alimentation électrique des engins spatiaux, on décrit les solutions choisies pour les sources et réseaux de distribution qui ne peuvent être simplement dérivées des produits terrestres ou aéronautiques.

1. Les engins spatiaux et leurs contraintes

La dénomination « engin spatial » désigne tout véhicule se déplaçant au-dessus de 80 km d'altitude, là où la portance de l'air n'est plus suffisante pour le maintien des aéronefs, avions, hélicoptères ou ballons ; là aussi où la pression atmosphérique est assez faible pour ne pas engendrer de flux thermique prohibitif sur un véhicule se déplaçant à plusieurs kilomètres par seconde. Elle convient aux satellites ou sondes planétaires, mais aussi aux lanceurs de satellites, éventuellement aux fusées-sondes n'ayant qu'une trajectoire suborbitale. A cette variété des engins spatiaux correspond une grande diversité sur la durée de la mission, de quelques dizaines de minutes à plusieurs dizaines d'années, mais aussi des conditions ambiantes, pression, température, radiations, contraintes mécaniques, statiques et dynamiques. Ils ont néanmoins un point commun, contrairement aux véhicules terrestres ou aériens, la panne totale d'alimentation électrique est toujours catastrophique.

Les contraintes et exigences auxquelles sont soumis les engins spatiaux interdisent le plus souvent l'emploi d'équipements développés pour un usage terrestre ou aéronautique.

Les spécificités à prendre en compte sont :

- la gravité zéro : favorable au développement de structures légères de grande dimension (générateur solaire) mais un problème pour la gestion des liquides (certains générateurs électrochimiques),
- le vide : nécessite une parfaite étanchéité des réservoirs contenant des gaz ou des liquides (concerne les générateurs électrochimiques),

- le vide partiel qui induit un risque de claquage électrique des alimentations haute tension, pendant la dépressurisation au lancement mais aussi en orbite en cas de remontée de pression accidentelle sur fuite de réservoir,
- le vide ou l'apesanteur rend difficile le refroidissement des équipements électroniques par l'absence de convection,
- les variations rapides et profondes de température aux entrées et sorties d'éclipse qui affectent surtout le générateur solaire par des excursions de température entre -100 et +70°C à chaque révolution,
- l'accélération statique, les vibrations au lancement (entre 5 et 10g) et les chocs qui exposent les composants à des contraintes mécaniques sévères,
- le bruit acoustique au lancement qui peut casser les photopiles de générateur solaire,
- les radiations par des protons, électrons et autres rayons cosmiques qui dégradent ces mêmes photopiles ou induisent des défauts transitoires, particulièrement sur les transistors de puissance et les amplis analogiques,
- l'impossibilité d'accès pour réparation ou maintenance.

D'autres contraintes, telles que le confinement dans un espace étroit de perturbateurs électromagnétiques et de circuits sensibles, la recherche de la minimisation de la masse pour profiter au mieux de la capacité de lancement, la nécessité de minimiser les coûts ne sont pas citées davantage car elles se posent avec la même acuité pour tous les systèmes embarqués.

2. Les fonctions du sous-système d'alimentation.

Le sous-système d'alimentation électrique d'un engin spatial regroupe trois fonctions :

- la production d'énergie électrique,
- la gestion à l'équilibre des sources d'énergie et des consommateurs, en énergie et puissance,
- le réseau de distribution d'électricité aux équipements incluant les protections et conversions de tension.

Pour une plus grande robustesse du système complet, l'alimentation doit être aussi peu dépendante que possible des autres sous-systèmes ou des contrôles au sol. Elle doit continuer à fournir l'énergie électrique à la qualité spécifiée même en cas de défaut d'un autre sous-système (transmissions ou pilotage), d'une panne d'un de ses constituants, et sans intervention immédiate des contrôleurs au sol. Le système est conçu pour éviter la propagation de panne qui rendrait une reconfiguration impossible dans un délai raisonnable.

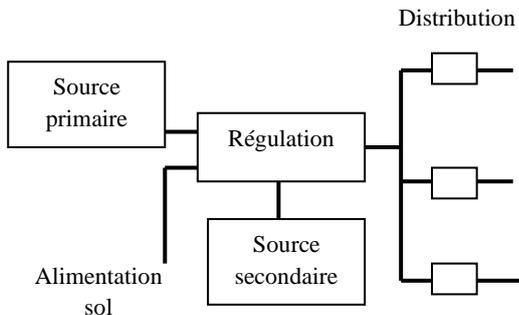


Figure 1 : Configuration générale typique du sous-système d'alimentation d'un satellite.

On a représenté, figure 1, la configuration générale que l'on trouve sur la quasi-totalité des engins spatiaux. Cette structure, simple dans son principe, est déclinée de multiples façons selon que l'on cherche à optimiser la masse, la versatilité, la fiabilité ou les coûts.

L'alimentation électrique des lanceurs est simplifiée en ce qu'elle ne comporte que des sources primaires. Elles sont spécialisées afin d'assurer la ségrégation des fonctions de pilotage et de neutralisation (pour éviter qu'une panne d'un équipement de pilotage n'interdise la commande de destruction en vol) ainsi que la séparation complète des chaînes nominales et redondantes.

A l'opposé sur une échelle de complexité, on trouve la Navette Spatiale de la NASA dont la conception du réseau électrique est plus proche de celle d'un avion.

Sur un satellite, le sous-système d'alimentation électrique occupe de 25 à 30% de la masse du satellite avant remplissage des réservoirs d'ergols utilisés pour la mise et le maintien en orbite et le contrôle d'attitude. La masse restante est utilisée pour la charge utile (répéteurs et antennes de télécommunications, télescopes pour

l'observation de la Terre ou du Ciel), pour la structure et les autres équipements de service. A titre d'exemple, le satellite scientifique Jason dédié à la recherche géodésique par altimétrie, d'une masse de 472 kg pour une puissance fournie de 500 W emporte 126 kg pour la seule alimentation électrique. Autres exemples, l'alimentation d'un satellite de télécommunications lancé en 1991 d'une masse de 1100 kg pour une puissance de 3 kW pèse 296 kg, l'alimentation d'un satellite de télécommunications lancé en 2001 d'une masse de 2000 kg pour une puissance de 10 kW pèse 570 kg (figure 2).

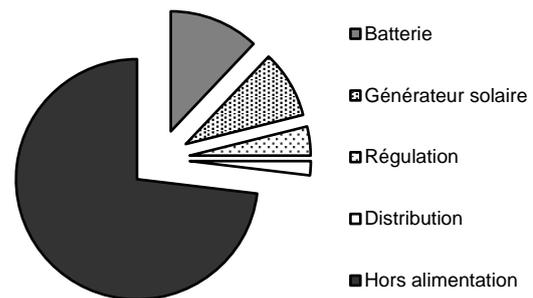


Figure 2 : Répartition des masses des constituants d'un satellite de télécommunications.

Ce ratio très élevé pour l'alimentation est autant de masse non utilisable pour la charge utile, on comprend alors les efforts pour la réduire avec ce que cela implique d'évolution technologique et de développements nouveaux. La masse du sous-système d'alimentation est due majoritairement aux sources (primaire et secondaire), pour une même génération technologique, elle est à peu près proportionnelle à la puissance électrique mise en jeu.

3. Les composantes du sous-système

3.1 Les sources primaires

La production d'énergie électrique est accomplie par la source primaire. C'est toujours une fonction de conversion d'énergie à partir d'une source thermique ou électrochimique.

En raison de leur capacité limitée à quelques dizaines d'ampères-heures, les piles électrochimiques ne sont guère utilisées que pour des missions à durée courte, notamment sur les lanceurs. Les préférences vont, pour les lanceurs, à la pile argent-zinc capable de délivrer de fortes puissances instantanées et, pour les sondes planétaires, aux piles au lithium (200 Wh/kg) pour leur aptitude à conserver la charge et d'être mise en service plusieurs années après le lancement pour effectuer une mission ponctuelle à l'arrivée sur l'objectif. Les piles à combustible à hydrogène-oxygène ne sont utilisées que sur la Navette Spatiale pour la production combinée d'électricité et d'eau.

Deux options s'offrent pour la source thermique : interne ou externe.

La source interne est emportée au lancement de l'engin spatial. Son emploi se justifie lorsque la densité de puissance solaire qui décroît comme le carré du rayon de l'orbite planétaire devient trop faible. La technologie actuelle des générateurs solaires place la frontière au niveau de l'orbite de Jupiter, à 5,2 U.A. (1 U.A., unité astronomique, distance de la Terre au Soleil).

Pour assurer une mission de longue durée, c'est nécessairement une source nucléaire. Le générateur est un convertisseur thermoélectrique à effet Seebeck, (rendement 5 à 10%) utilisant comme source chaude la désintégration naturelle de l'isotope 238 du plutonium. La chaleur dissipée par ce nucléide est de 570 W/kg, la période (temps nécessaire à la désintégration de la moitié des atomes) de 87,7 ans. Le plutonium 238 est obtenu par irradiation du neptunium 237 qui est un déchet des centrales nucléaires. La production puis le conditionnement sous une forme utilisable demande des investissements importants, le fait qu'il n'ait pas d'autre usage que dans l'espace a fait renoncer toutes les puissances spatiales hormis les USA et la Russie qui ont leur propre programme planétaire.



Figure 3 : Vue d'artiste du satellite TDF1 en orbite, le générateur solaire déployé, (document CNES).

Néanmoins, la source thermique utilisée dans la quasi-totalité des cas est le Soleil dont l'éclairement est converti en électricité par des piles photovoltaïques.

L'énergie solaire est proche du rayonnement d'un corps noir à 5 500K, dont la densité de puissance reçue au niveau de la Terre est en moyenne de 1 368 W/m². La conversion photovoltaïque fait des progrès constants depuis le début de l'ère spatiale, elle est passée de quelques pourcents à près de 36% aujourd'hui au laboratoire.

Un générateur solaire est l'assemblage en série et en parallèle de milliers de cellules élémentaires, chacune mesurant quelques dizaines de centimètres carrés. Le marché se partage entre deux technologies, la cellule monocristalline au silicium (meilleur rendement de

cellules commerciales : 18%) et la cellule à jonctions superposées (phosphore d'indium sur arséniure de gallium sur germanium) dont le rendement de cellules commerciales atteint 28%. La cellule multijonction utilise mieux l'étendue du spectre solaire mais son coût plus élevé et sa fragilité lui ôte un avantage décisif à l'utilisation systématique et généralisée. En outre, on a encore peu de retour d'expérience sur son vieillissement en orbite sur plusieurs années.

Le courant fourni par la cellule solaire étant proportionnel au flux lumineux, une idée est de concentrer la lumière par des miroirs latéraux inclinés à 60° (facteur de concentration de 2 sur la plateforme BOEING BSS702) ou par des lentilles de Fresnel (facteur de concentration de 8 sur la sonde Deep Space One de la NASA). Pour une puissance requise spécifiée, la surface totale du générateur est inchangée mais le nombre de cellules peut être réduit dans le rapport de concentration. Il en résulte une diminution appréciable du coût du générateur.

La mission de la plupart des satellites demande une orientation de la charge utile (antenne de télécommunication ou télescope d'observation) vers la Terre. L'attitude du satellite par rapport au Soleil varie en permanence. Pour diminuer le nombre de cellules solaires, la solution idéale est de les disposer sur un plan perpendiculaire à la direction du Soleil. Sur un satellite de télécommunications géostationnaire situé sur une orbite équatoriale à 36 000 km d'altitude, une configuration approchée est facile à mettre en oeuvre.

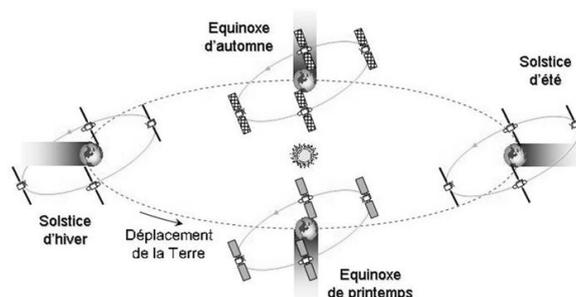


Figure 4 : Positions d'un satellite géostationnaire aux équinoxes et aux solstices à différentes heures.

On dispose le générateur sur un axe Nord-Sud, parallèle à l'axe de rotation de la Terre (figure 3). Alors que le corps du satellite est fixe dans un référentiel terrestre, le générateur solaire accomplissant un tour complet en 24h dans les axes du satellite reste pointé sur le Soleil. Cependant il n'est pas rigoureusement normal à la direction du soleil en raison de l'inclinaison de 23°27' du plan équatorial sur le plan de l'écliptique (figure 4). Au solstice il en résulte un coefficient réducteur d'éclairement égal au cosinus de l'inclinaison (0.92).

Pour les satellites situés sur une orbite inclinée sur l'équateur, la configuration est moins favorable, la disposition du générateur est optimisée selon les spécificités de la mission (figure 5).

Les constructeurs fournissent une valeur de rendement mesuré au laboratoire à une température de référence, par exemple 28°C, sur une cellule neuve. Pour déterminer la puissance électrique fournie par le générateur solaire dans le pire cas des conditions en orbite, il intervient d'autres facteurs de réduction de la puissance disponible :

- variation de la distance au Soleil : au solstice d'été la distance est maximale, diminution de flux de 3%,
- température des photopiles : sur la caractéristique courant tension, (figure 6), recul de tension de 2mV par degré pour une cellule au silicium et de 6mV par degré pour une cellule multijonction, en vol la température maximum est généralement dans la plage de 50°C à 70°C,
- dégradation de la conversion photovoltaïque due aux irradiations par les électrons et protons piégés de la magnétosphère ou des éruptions de protons solaires,
- noircissement par les photons UV solaires
- érosion de la surface par les débris et micrométéorites.



Figure 5 : Vue d'artiste du satellite SPOT-5
(document CNES)

Les postes d'usure contribuent pour 15 à 20% de perte selon l'orbite ou la durée de mission. On doit également prendre en compte des marges couvrant la dispersion des performances des cellules câblées en série et l'incertitude de calibration.

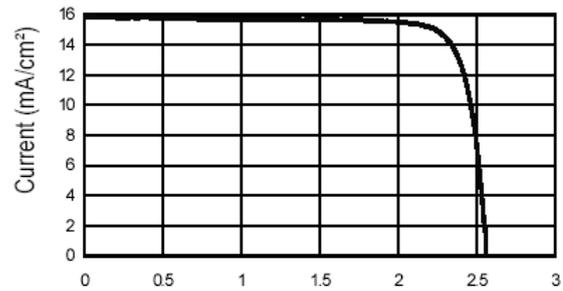


Figure 6 : Caractéristique courant-tension d'une cellule multijonction (document Spectrolab)

Enfin les cellules solaires n'occupent que 80 à 95% de la surface du panneau. Il en résulte que la puissance surfacique opérationnelle du générateur assemblé est à peu près 50 à 60% de la puissance surfacique d'une cellule telle qu'elle est indiquée au catalogue du constructeur. On peut ainsi compter sur 130 W/m² pour un générateur au silicium et 210 W/m² pour un générateur équipé de cellules multijonction.

3.2 Les sources secondaires

Le satellite n'est pas éclairé en permanence. Régulièrement il passe dans l'ombre de la Terre. La situation est très différente selon l'altitude du satellite. En orbite basse (altitude inférieure à 1 000 km), le satellite effectue chaque jour 14 révolutions de 100 minutes environ. Il passe 35 minutes en éclipse. A l'opposé un satellite géostationnaire n'est dans l'ombre de la Terre qu'une fois par jour dans une période de 45 jours encadrant l'équinoxe de printemps ou d'automne (figure 4). Chaque éclipse dure au maximum 72 minutes.

Il est nécessaire de disposer d'une source secondaire pour assurer l'alimentation du satellite en éclipse. Cette source a également pour rôle de maintenir l'alimentation en cas de pointe de consommation ou en cas de panne rendant indisponible la puissance en sortie du générateur solaire (dépointage ou court-circuit).

Dans la quasi-totalité des cas, le stockage d'énergie électrique est électrochimique (l'alternative est le stockage cinétique par roue d'inertie). Les technologies en concurrence sont les accumulateurs au nickel-cadmium, au nickel-hydrogène à haute pression (à hydrogène libre) et l'accumulateur lithium-ion. Outre les contraintes générales énoncées en introduction, les facteurs déterminants pour le choix d'une technologie sont la robustesse en cyclage et l'énergie massique. On demande 1 400 cycles aux accumulateurs des satellites géostationnaires pour un objectif de quinze ans d'opération, 25 000 cycles aux accumulateurs des satellites d'observation pour une durée de mission nominale de cinq ans. Il est possible d'allonger la mission en diminuant la profondeur de décharge

(pourcentage de la quantité d'électricité déchargée par rapport à la capacité nominale), cependant c'est au détriment de l'énergie massique effective. De nombreux essais de laboratoire s'étendant sur plusieurs années dans des conditions représentatives du service en vol ont permis, pour chaque technologie, d'optimiser la profondeur de décharge (et la température de fonctionnement) pour un nombre de cycles donné. En orbite basse, il apparaît une contrainte supplémentaire limitant la profondeur de décharge : le temps disponible pour la recharge, inférieur à une heure. Pour éviter un courant de recharge trop élevé préjudiciable à la durée de vie de la batterie, on n'envisage pas de profondeur de décharge supérieure à 35%.

Le couple nickel-cadmium en version étanche convient bien aux orbites basses et aux satellites de petite puissance lorsque la masse n'est pas un facteur prépondérant. Robuste et de faible coût, il a équipé tous les satellites en orbite basse jusqu'à une époque récente. Il est maintenant supplanté par le lithium-ion dont les essais ont pu montrer, que, convenablement géré, il était aussi robuste, voire plus, pour une masse trois fois inférieure. L'accumulateur nickel-cadmium n'est plus guère utilisé que sur des modèles récurrents de projets au développement achevé.

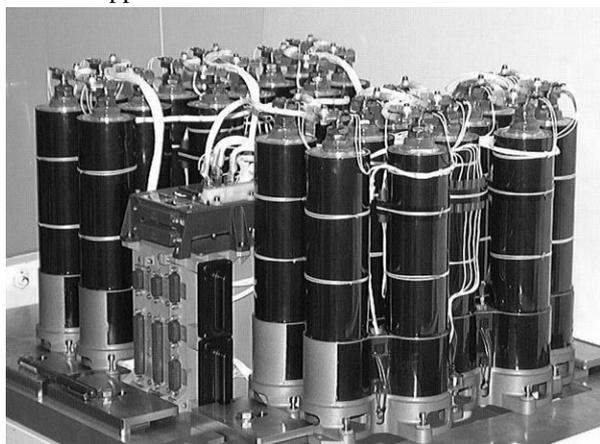


Figure 7 : Batterie lithium-ion (photo SAFT)

Le couple nickel-hydrogène est employé sur les satellites géostationnaires depuis le début des années 80. Par rapport au nickel-cadmium, l'énergie spécifique nominale est supérieure de 50% et atteint 60 Wh/kg, comme on dispose de plus de vingt heures pour la recharge, il n'y a pas d'inconvénient à l'utiliser à une profondeur de décharge de l'ordre de 70%. La plus grande part du marché est celle des satellites de télécommunications géostationnaires où l'emploi du nickel-hydrogène s'est généralisé malgré un coût élevé lié à l'emploi d'un réservoir haute pression (80 bars) pour contenir l'hydrogène à l'état gazeux. Le nickel-hydrogène à basse pression (NiMH, nickel métal hydrure) n'a pas été retenu car il n'offre pas d'avantage significatif en masse par rapport au nickel-cadmium.

L'accumulateur lithium-ion tend à se généraliser dans le domaine spatial. Utilisé depuis quelque temps sur les satellites dédiés à la recherche scientifique, il commence à être embarqué sur des satellites commerciaux. L'énergie massique est particulièrement attractive, 120 Wh/kg, des progrès sont en cours permettant d'espérer près de 150 Wh/kg, ce qui le place très au-dessus de ses concurrents passés.

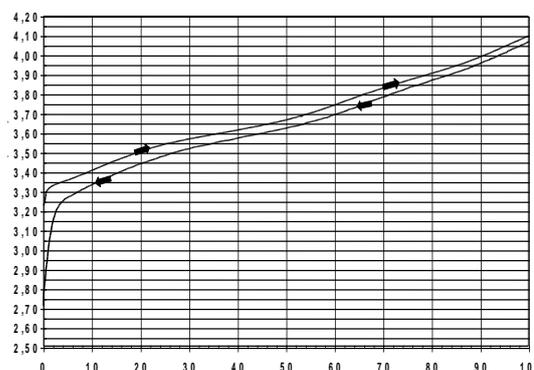


Figure 8 : Accumulateur lithium-ion, tension en fonction de l'état de charge en pourcentage de la capacité nominale (document SAFT)

Bien qu'il soit connu depuis le début des années 90 conditionné en capacités de quelques ampères-heures à l'usage des équipements portables, ce n'est que récemment qu'on a pu prouver, à l'issue de plusieurs années d'essais, qu'une bonne définition d'accumulateur lithium-ion avait la même aptitude au cyclage que les accumulateurs au nickel-hydrogène. La contrainte est une grande précision dans le contrôle des tensions individuelles de chaque cellule de la batterie en charge et une grande rigueur interdisant toute faute de surcharge ou de décharge excessive. On ne peut se contenter de surveiller la charge par la tension de la batterie. La figure 7 représente la batterie au lithium-ion développée par la compagnie SAFT à l'usage des satellites géostationnaires. On distingue au milieu de la batterie le module d'électronique pour la gestion individuelle des accus.

Un atout de l'accumulateur lithium-ion est une tension qui est une image de l'état de charge, figure 8. Outre que cela facilite la gestion, cette particularité autorise la mise en parallèle directe des accus ou de chaîne d'accus pour augmenter la capacité sans risque de déséquilibre.

3.3 Les équipements de régulation

On ne peut pas connecter directement les sources primaire et secondaire aux consommateurs sans qu'un certain nombre de fonctions ne soit réalisées.

1. assurer que la batterie n'est jamais en état de surcharge,
2. veiller à ce qu'elle revienne et reste à l'état chargé,
3. surveiller qu'elle ne se trouve pas en état de décharge profonde,
4. maintenir la tension du réseau électrique entre les valeurs minimum et maximum spécifiées aux équipements dans un certain gabarit temporel.

Le générateur solaire étant un générateur de courant, la batterie un générateur de tension, il n'y a pas d'interdiction à les connecter directement, figure 9, les fonctions 2 et 4 se trouvent réalisées de manière naturelle sans équipement électronique. Il suffit de spécifier que les équipements verront les tensions de charge et de décharge de la batterie.

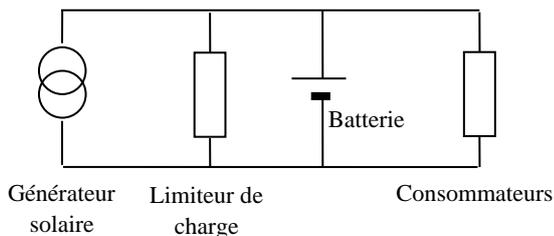


Figure 9 : Architecture de barre non régulée

En sortie d'éclipse, la batterie est déchargée et sa tension est faible. Tout le courant du générateur solaire non consommé par les équipements est aiguillé vers la batterie. La batterie se charge et sa tension augmente jusqu'à un seuil de régulation. A partir de ce niveau de tension, le limiteur de charge dérive une partie du courant du générateur solaire pour maintenir la tension batterie constante. La charge se poursuit à tension constante, le courant décroissant, jusqu'à la charge complète. En éclipse toute l'énergie utilisée par les équipements est fournie par la batterie. La tension délivrée sur le réseau est celle de la batterie qui diminue constamment jusqu'à la fin de l'éclipse.

L'architecture d'une telle barre est particulièrement simple. Elle permet en outre une charge batterie importante sans l'apport d'éléments complémentaires. En contre partie, les échanges d'énergie entre générateur solaire, batterie et barre ne sont pas optimaux compte tenu des variations de tension que doit subir le générateur solaire.

Le cycle d'un satellite en orbite basse se compose de 65% de jour et de 35% de nuit. Ce cycle implique une durée de fonctionnement sur batterie importante et un courant de charge non négligeable par rapport au courant

de la charge utile. On évite la mise en œuvre d'équipements électroniques de charge aptes à délivrer des courants importants. C'est pourquoi l'architecture de barre non régulée est particulièrement adaptée aux orbites basses.

Sur les satellites géostationnaires, la batterie n'est utilisée qu'aux périodes d'équinoxe, 72 minutes au maximum, on optimise la fourniture d'énergie aux consommateurs en régulant la tension du générateur solaire. On découple la batterie en insérant un chargeur utilisé en phase éclairée et une diode en éclipse (figure 10). Cette architecture de barre régulée en phase ensoleillée, non régulée en éclipse est appelée semi-régulée.

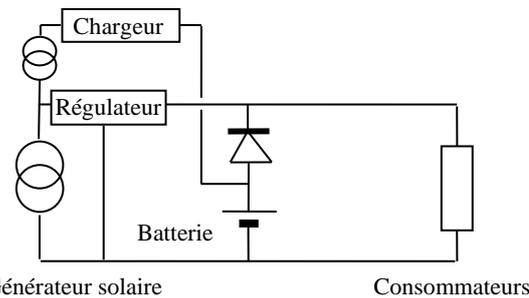


Figure 10 : Barre régulée en jour, non régulée en éclipse

En période de jour la tension délivrée au réseau est fixée par le régulateur du générateur solaire. Un réseau solaire, composé de quelques cellules associées à une électronique de charge, permet la charge de la batterie. Dans certains systèmes semi-régulés, la charge est assurée par l'intermédiaire du régulateur du générateur solaire grâce à la possibilité de commuter une section aussi bien vers la barre que vers la batterie.

En éclipse le fonctionnement est identique à celui d'une barre non régulée ; la tension barre est fixée par la batterie et diminue progressivement jusqu'à la fin de l'éclipse.

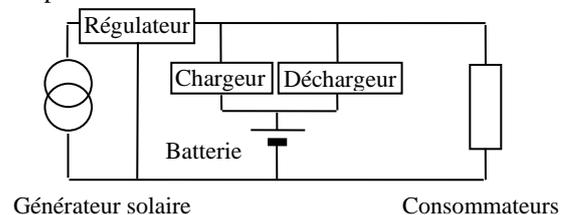


Figure 11 : Barre régulée

Un inconvénient est d'imposer aux équipements de la charge utile de pouvoir fonctionner à tension basse uniquement pour une centaine d'heures par an. Sur les satellites de forte puissance, le courant de décharge est de plusieurs centaines d'ampères, le câblage et la diode doivent être dimensionnés en conséquence.

Une troisième architecture est la barre régulée qui met en œuvre un déchargeur à la place de la diode

(figure 11). La tension de barre est régulée en permanence. La valeur de la tension de la batterie peut être choisie supérieure ou inférieure à la tension délivrée par le réseau grâce au déchargeur de batterie compte tenu de la souplesse des conditionneurs électroniques.

En phase jour la tension barre est fixée par le régulateur du générateur solaire. La charge d'entretien, les recharges sont assurées par une électronique de charge.

La barre régulée présente de nombreux avantages parmi lesquels on peut citer :

- liberté de choix de la capacité nominale des accumulateurs et de leur arrangement en série et parallèle pour constituer la ou les batteries.
- utilisation de plusieurs batteries sur le réseau sans contrainte d'appairage,
- diminution de la masse du câblage et de la taille des filtres des convertisseurs d'équipement (le niveau de tension est toujours maximal),
- meilleure utilisation des protections : le surdimensionnement des protections liées aux tensions basses de la batterie n'est plus nécessaire,
- échanges énergétiques optimaux entre générateur solaire, batterie et consommateurs.

Par ses avantages l'architecture à barre régulée est maintenant utilisée sur toutes les plates-formes de télécommunications. Des satellites en orbite basse mettent également en œuvre cette architecture.

Le principe de régulation de la puissance du générateur solaire consiste à dériver vers la masse le courant superflu.

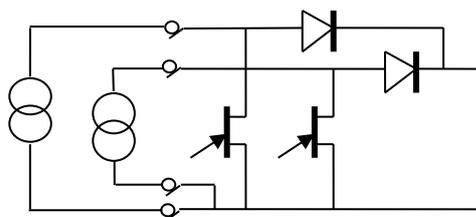


Figure 12 : Principe du régulateur de courant du générateur.

Sont représentés : deux sections de générateur solaire, les contacts tournants intégrés au mécanisme de rotation du générateur solaire, deux commutateurs de régulation et leurs diodes de séparation du réseau primaire.

Le réseau du générateur solaire est scindé en un certain nombre de sections, chacune fournissant un courant de l'ordre de 5 à 10 A, assez élevé pour minimiser le nombre de lignes en provenance du générateur solaire,

mais compatible avec les transistors de commutation et les contacts tournants de la liaison entre chaque aile de générateur solaire et le corps du satellite. Pour ajuster la puissance fournie à la puissance demandée chaque section peut être connectée en permanence, déconnectée en permanence ou connectée par commutation tout ou rien modulée en largeur. La commande est réalisée par un asservissement de type PID régulant la tension de barre.

3.4 Les équipements de distribution

Le réseau primaire est constitué d'une ou, parfois, deux barres d'alimentation. Les tensions de barre régulées sont généralement à 50 ou 100V, tandis que les barres non régulées évoluent dans une plage de 26 à 37V. Les barres sont distribuées dans le satellite en prévoyant la ségrégation des consommateurs afin d'éviter qu'une panne d'un équipement ne se propage à tout le système. Les composants de protection sont des fusibles, des disjoncteurs électroniques ou des limiteurs de courant. Deux options sont envisageables : ou les équipements ont chacun leur dispositif de sécurité en amont de leur convertisseur de tension ou on centralise les protections en distribuant des lignes protégées.

4. Perspectives

Dans son principe le sous-système d'alimentation d'un satellite reste inchangé. Il est toujours constitué, sauf exception, d'un générateur solaire, d'une batterie et d'un régulateur électronique. Le progrès est caché dans les technologies employées, et essentiellement orienté vers le gain de masse et l'augmentation de durée de vie. Si on utilisait les technologies des premiers satellites de télécommunications, la masse de l'alimentation d'un satellite de 10 kW serait de 1 200 kg, au lieu de 400 kg avec la technologie disponible aujourd'hui pour une masse sèche du satellite de 2 000 kg (environ 4 000 kg au lancement). Dans la même période, la durée de vie est passée d'un objectif de trois ans à quinze ans.

Les technologies qui entrent maintenant en exploitation doivent être évaluées au sol une dizaine d'années et il faut encore attendre quelques années d'exploitation en vol pour connaître leur efficacité et leur robustesse. Ce cycle de vie particulièrement long est une difficulté supplémentaire rencontrée dans le domaine spatial.

Référence : Spacecraft Techniques and Technology, Ouvrage collectif CNES, Cepadues Editions, Toulouse.

L'avion plus électrique : vers une nouvelle génération de réseaux de bord

Olivier LANGLOIS*, Etienne FOCH*, Xavier ROBOAM**, Hubert PIQUET**

* Airbus France, Engineering Electrical Systems Department
316, route de Bayonne - PO BOX M0131/5 - 31060 TOULOUSE Cedex 03 - France

** Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique industrielle
Unité mixte de Recherche INPT-ENSEEIH / CNRS
BP 7122 - 2, rue Camichel - 31071 TOULOUSE Cedex 7 - France

Résumé : Depuis les débuts de l'aéronautique, l'énergie électrique prend une place de plus en plus importante à bord des avions. Autrefois utilisée uniquement pour l'instrumentation de bord, elle s'est progressivement imposée pour le confort et le divertissement des passagers, tels que l'éclairage, la cuisine et les appareils vidéo. L'électricité a également pris une part importante avec l'augmentation des équipements électroniques utilisés pour le fonctionnement même de l'avion. C'est le cas des commandes de vol gérées et commandées électriquement, introduites dans les années 1980 sur l'Airbus A320.

De nos jours, l'électricité occupe toujours une part importante des recherches en aéronautique. Après la récente introduction d'actionneurs de commandes de vol électriques sur l'Airbus A380, de nombreux systèmes pourraient devenir « électriques » dans les prochaines années. Les fonctions particulièrement touchées sont le démarrage des moteurs, le dégivrage, le freinage des roues, ou encore le conditionnement d'air. L'électrification de ces fonctions n'est pas sans bouleverser le comportement global de l'avion du fait de la forte interaction entre chacune d'elles.

Ce besoin croissant en énergie électrique a fait évoluer les standards de tension utilisés pour les réseaux avion. De la tension continue 28 V, la tension alternative 115 V / 400 Hz est apparue au milieu du siècle dernier. Aujourd'hui, de nouveaux niveaux de tension vont apparaître afin de convenir aux puissances élevées mises en jeu sur les réseaux.

Les programmes de recherche actuels mettent en évidence les avantages apportés par l'usage de l'énergie électrique par rapport aux énergies pneumatiques et hydrauliques qu'elle remplace. Le concept d'avion plus électrique améliorera la conception des systèmes d'énergie embarqués par la rationalisation des sources de puissance et par la flexibilité d'utilisation de l'électricité. Néanmoins, les choix concernant les architectures du réseau de bord, les niveaux de tension employés, ou encore l'électrification de certains systèmes à énergies conventionnelles, restent à effectuer.

Mots clés : Avion plus électrique, réseaux de bord, systèmes avion, vision prospective

1. Introduction

Dans un avion, les équipements requièrent une énergie significative. En effet, outre la propulsion de l'avion, il est nécessaire d'apporter de l'énergie à l'instrumentation de bord, aux systèmes de contrôle et aux autres équipements permettant une bonne manœuvrabilité de l'avion en toute sécurité. Pour les avions de grande taille, une énergie conséquente est indispensable pour déplacer les gouvernes de commande de vol et ainsi diriger l'avion. De plus, pour les avions de transports civils ou militaires, le conditionnement d'air de la cabine demande une énergie très importante. Les appareils de divertissement des passagers, et surtout les cuisines, consomment également beaucoup d'énergie.

Sur les avions actuels, quatre formes d'énergies sont utilisées : mécanique, pneumatique, hydraulique et électrique. Ces énergies sont principalement obtenues à

partir des moteurs de propulsion. Les énergies mécanique, hydraulique et électrique sont obtenues par un entraînement mécanique du moteur. L'énergie pneumatique est quant à elle obtenue par prélèvement d'air sur les compresseurs du moteur (cas de l'avion à réaction)

L'aéronautique connaît actuellement de grandes évolutions énergétiques. Les équipements, de plus en plus électriques, font croître la proportion d'électricité utilisée à bord. Cela n'est pas sans provoquer des restructurations importantes du réseau électrique. Dans cet article, nous décrivons ces bouleversements, agissant au niveau global de l'avion, en se focalisant sur les avions de transports civils [OL04].

2. Avions actuels

Le prélèvement mécanique effectué sur le moteur permet d'une part de couvrir les besoins mécaniques

propres au moteur, d'autre part de générer les énergies hydraulique et électrique. L'énergie hydraulique est utilisée pour les actionneurs de puissance, tels que ceux mis en œuvre pour les commandes de vol. L'énergie électrique est utilisée uniquement pour l'instrumentation, la navigation, et les appareils de divertissement et de confort des passagers.

Le prélèvement d'air du moteur, « air bleed » en anglais, est utilisé pour le dégivrage des bords d'attaque des ailes et du moteur, et bien sûr pour le conditionnement d'air du cockpit et de la cabine.

A. Réseau hydraulique

Le réseau hydraulique, dont la génération est effectuée par des pompes entraînées par les moteurs, se compose de trois circuits totalement indépendants. On parle alors d'architecture 3H (trois circuits hydrauliques). Le choix de trois circuits s'explique par la redondance nécessaire pour les commandes de vol. Chaque actionneur de commande de vol est alimenté par l'un des circuits de manière à ce que l'avion reste manœuvrable avec un seul de ces trois circuits. Le schéma *Figure 1* montre la constitution du réseau hydraulique dans le cas d'un biréacteur, basé sur l'Airbus A330. Les trois circuits sont distingués par trois couleurs différentes : vert, jaune et bleu.

En cas de perte des moteurs suite à une défaillance quelconque, une génération minimale d'énergie hydraulique est assurée par une éolienne (RAT : Ram Air Turbine) se déployant sous l'avion. Cette RAT alimente un seul des trois circuits hydrauliques, en laissant inactif les deux autres.

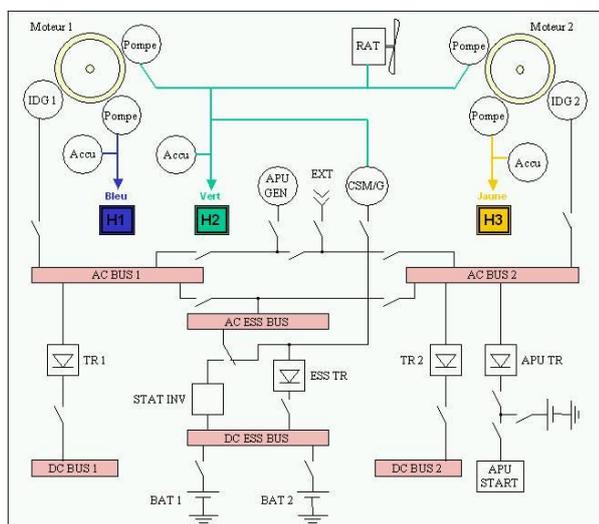


Figure 1 : Architecture type d'un avion actuel, possédant trois circuits hydrauliques indépendants. Cette architecture est dite 3H. (Cas d'un bimoteur, basé sur l'architecture A330.)

B. Réseau électrique

La génération d'électricité est obtenue par des générateurs mécaniquement régulés en vitesse (IDG : Integrated Drive Generator). Chaque moteur entraîne généralement un générateur alimentant son propre circuit électrique. En fonctionnement normal, les

circuits sont ségrégués, les générateurs ne sont jamais couplés en parallèle. Le schéma *Figure 1* présente une vue d'ensemble du réseau électrique d'un A330.

Pour les moyens ou gros porteurs, la génération est effectuée en courant alternatif triphasé 115/200 V – 400 Hz. Ce standard correspond au réseau principal, sur lequel sont alimentés les consommateurs puissants. Le réseau secondaire, en courant continu 28 V, est destiné à l'alimentation des faibles charges. Ce réseau continu est obtenu à partir du réseau alternatif, par abaissement et redressement de tension, via les équipements TRU (Transformer Rectifier Unit).

Au sol, l'avion est souvent alimenté par un groupe de parc. Toujours au sol, et rarement en vol, le groupe auxiliaire (APU : Auxiliary Power Unit) permet de fournir de l'électricité en 115/200 V – 400 Hz.

En cas de perte des générateurs principaux, un générateur de secours (CSM/G : Constant Speed Motor/Generator) permet de fournir une puissance minimale en 115/200 V – 400 Hz à partir du réseau hydraulique.

Enfin, deux ou trois batteries permettent de disposer d'un minimum d'électricité pendant les phases transitoires ou la génération en courant alternatif serait absente.

3. Avions « plus électriques »

L'Airbus A380, dont le premier vol a été effectué en avril 2005, marque le premier pas de l'aéronautique vers le tout électrique. On parle alors d'avion « plus électrique » du fait du remplacement de certains équipements hydrauliques par des équipements électriques. Les principales avancées technologiques proposées par l'A380 sont les suivantes :

- certaines surfaces de commandes de vol sont déplacées par des actionneurs électriques,
- le système de secours est totalement électrique,
- le réseau alternatif adopte une fréquence variable,
- les disjoncteurs de faible calibre deviennent électroniques.

A. Réseaux hydraulique et électrique

Le schéma de la *Figure 2* donne l'architecture simplifiée des réseaux hydraulique et électrique de l'A380 adaptée à un bimoteur. Cela permet de bien cibler les différences par rapport à l'architecture précédente concernant l'A330.

La différence frappante est la suppression d'un circuit hydraulique. Seuls deux circuits hydrauliques sont disponibles pour alimenter les actionneurs de commande de vol. En contrepartie, deux circuits électriques sont utilisés pour alimenter des actionneurs électriques de commande de vol. L'architecture type 3H précédemment présentée cède la place à cette architecture type 2H+2E.

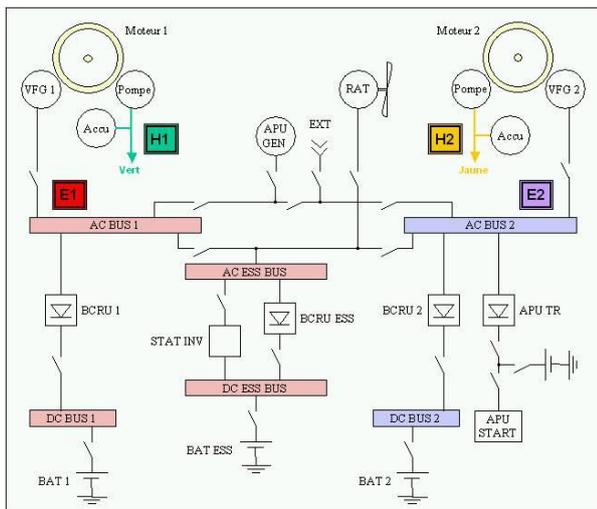


Figure 2 : Architecture type d'un avion plus électrique, possédant deux circuits hydrauliques et deux circuits électriques, tous indépendants. Cette architecture est dite 2H+2E. (Cas d'un bimoteur, mais basé sur l'architecture A380.)

B. Génération électrique AC

Les générateurs électriques de l'A380 sont fondamentalement différents de ceux des anciens programmes Airbus. Les IDG ont été remplacés par des VFG (Variable Frequency Generator). La différence technologique est la suppression du système de régulation de la vitesse de rotation du générateur (CSD : Constant Speed Drive). Ce système hydromécanique permet de compenser la variation de vitesse de l'entraînement du réacteur (du simple au double suivant les phases de vol).

Les avantages de la suppression du CSD sont liés à la simplification du système, d'où un gain en fiabilité et en maintenance, ainsi qu'un gain de masse. Les VFG engendrent une diminution de la masse de l'ordre de 20 % par rapport aux IDG (à puissance identique).

En contrepartie, la vitesse de rotation du générateur n'est plus régulée, et varie donc approximativement dans un rapport deux. La conséquence directe est la variation de fréquence du réseau électrique. Auparavant fixée à 400 Hz, elle s'étend désormais de 360 à 800 Hz. Cette variation de fréquence a un impact sur les équipements alimentés en courant alternatif. En particulier, la plupart des pompes à carburant et les ventilateurs ne peuvent plus être actionnés directement par un moteur asynchrone. L'usage de moteurs synchrones à aimants permanents associés à une conversion statique se généralise ainsi. Les progrès en électronique de puissance permettent d'envisager l'utilisation de cette nouvelle technologie.

Exceptée la suppression du système de régulation de vitesse, les générateurs d'un IDG et d'un VFG restent identiques (cf. Figure 3). Ils se composent de trois étages de machines : le PMG (Permanent Magnet Generator), l'Exciter et le Main. Le premier permet d'alimenter le système de contrôle/commande du générateur. Le second permet de fournir l'excitation du Main, lequel délivre l'électricité au réseau alternatif.

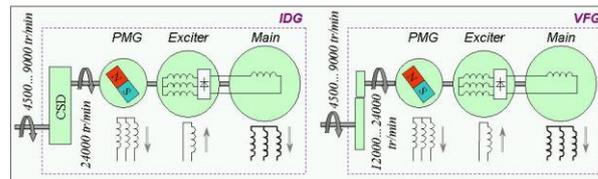


Figure 3 : Evolution des générateurs utilisés sur les avions Airbus. Le VFG, introduit sur l'A380, remplace l'IDG équipant les précédentes générations. Le régulateur mécanique de vitesse est supprimé.

C. Génération électrique DC

Le principe de génération du courant continu de l'A380 est identique à celui des anciennes générations d'avion. Par contre, les transformateurs-redresseurs (TRU) sont remplacés par des BCRU (Battery Charge and Rectifier Unit). La constitution de ces deux types d'équipements est donnée en Figure 4.

Concernant le TRU, il se compose d'un transformateur triphasé à deux secondaires (étoile et triangle) suivis de deux redresseurs triphasés double alternance, de manière à réaliser un redressement dodécaphasé (« 12-pulses »).

Le BCRU a une structure plus complexe, car il contient un ATRU (Auto-Transformer-Rectifier Unit) suivi d'un convertisseur DC/DC. L'ATRU possède la structure d'un TRU, mais délivre une tension élevée de 270 V DC. Le convertisseur DC/DC permet de délivrer une basse tension de 28 V.

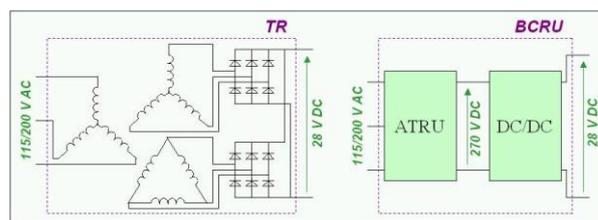


Figure 4 : Evolution de la génération de courant continu. Le BCRU introduit sur l'A380 remplace le TRU équipant les précédentes générations d'avion. La tension de sortie 28 V peut désormais être ajustée électroniquement.

L'intérêt du BCRU se situe dans le contrôle de sa tension de sortie, ce qui permet de laisser les batteries couplées en permanence sur le réseau 28 V DC. Avec les TRU, les batteries étaient couplées uniquement en cas de besoin. L'intérêt de disposer les batteries en tampon sur le réseau continu est l'élimination des coupures d'électricité sur ce dernier. Ceci est un avantage par rapport aux avions précédents, sur lesquels cette fonction n'existait pas. Seuls certains avions disposaient d'une fonction « anti-coupage » sur le réseau alternatif, mais cette fonction est rendue impossible sur l'A380 à cause de l'introduction de la fréquence variable.

D. Actionneurs de commande de vol

Pour la première fois, l'A380 embarque un grand nombre d'actionneurs électriques de commande de vol. Il s'agit principalement d'EHA (Electro-Hydrostatic Actuator), mais l'on y trouve également des EBHA

(Electrical Backup Hydraulic Actuator) et quelques EMA (Electro-Mechanical Actuator). Environ le tiers des actionneurs de commande de vol sont électriques, tandis que les autres restent des actionneurs hydrauliques traditionnels.

Un EHA est en fait une servocommande hydraulique sur laquelle est disposé son propre système de génération hydraulique à partir de l'électricité. Une vision de ces deux actionneurs est donnée en *Figure 5*. La génération hydraulique locale à l'EHA est obtenue par un groupe moteur-pompe. Le moteur électrique, généralement à aimants permanents, est alimenté par un onduleur. Etant alimenté en courant alternatif, l'actionneur possède également un redresseur triphasé (cf. *Figure 6*). Ce système est un exemple typique d'interdisciplinarité réussie. En effet, l'utilisation conjointe d'énergie électrique et hydraulique permet d'utiliser un moteur électrique à grande vitesse de rotation (donc à forte puissance massique) couplé à un sous système pompe-vérin qui offre un rapport de réduction mécanique très élevé permettant de disposer, au niveau des surfaces de commande de vol, de fortes capacités en terme de poussée à faible vitesse de débattement.



Figure 5 : Evolution des actionneurs de commande de vol. A gauche, une servocommande traditionnelle, alimentée par l'hydraulique avion. A droite, un EHA, alimenté par l'électricité avion, mais recréant une hydraulique locale pour mouvoir le vérin.

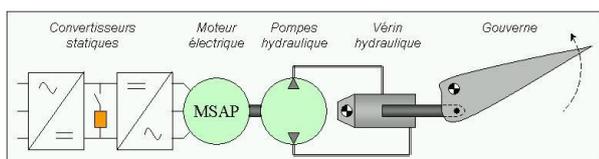


Figure 6 : Schéma de principe d'un EHA actionnant une gouverne de commande de vol. Un vérin hydraulique traditionnel est alimenté par un ensemble convertisseur-moteur-pompe local.

L'encombrement et la masse d'un EHA sont plus importants que ceux des servocommandes hydrauliques. Par contre, l'économie de masse réalisée sur les canalisations hydrauliques est intéressante. En comptant les actionneurs et la distribution, le remplacement des circuits 3H par 2H+2E entraîne une diminution de masse significative.

L'utilisation d'actionneurs électriques (EHA) plutôt que les traditionnelles servocommandes hydrauliques offre l'avantage de remplacer les canalisations hydrauliques par des câbles électriques. Ceux-ci éliminent les risques de fuite de fluide, tandis qu'un défaut sur une ligne électrique est plus facilement identifiable que sur une ligne hydraulique. La

maintenance sur le réseau de distribution est ainsi facilitée et diminuée. De plus, un défaut sur une ligne électrique est facile à isoler, évitant ainsi la perte d'un réseau complet.

4. Avion « tout électrique »

Il semble avantageux d'augmenter le nombre d'équipements électriques en remplaçant leurs homologues hydrauliques ou pneumatiques. En poussant le raisonnement à l'extrême, on peut envisager la suppression de toute génération hydraulique ou pneumatique à partir des moteurs.

A. Suppression des pompes hydrauliques moteur

La suppression de tous les circuits hydrauliques peut s'avérer intéressante, en imaginant la suppression de toutes les canalisations et pompes hydrauliques.

La suppression des pompes hydrauliques oblige à supprimer tout autre équipement hydraulique de l'avion. Parmi eux, le freinage des roues apparaît comme le plus contraignant. En effet, le passage à l'électrique de ce système, à base d'EMA, requiert des pointes de puissance très élevées, notamment avec l'utilisation de la fonction anti-blocage des roues. Actuellement, l'A380 possède déjà une assistance électrique pour le freinage, à base d'EBHA. L'électricité est utilisée en cas d'incident sur le circuit hydraulique.

B. Suppression du prélèvement d'air moteur

La quasi-totalité de l'énergie pneumatique utilisée par l'avion prend son origine par un prélèvement d'air sur les moteurs (« bleed »). Cette énergie est importante, et principalement utilisée pour le conditionnement d'air, le dégivrage des bords d'attaque des ailes et des entrées d'air moteur. Il apparaît plus avantageux, en terme de souplesse, d'utiliser des groupes de conditionnement d'air ainsi que des dégivrages électriques. Cela entraîne une augmentation considérable de la puissance électrique installée sur l'avion (cf. *Figure 7*).

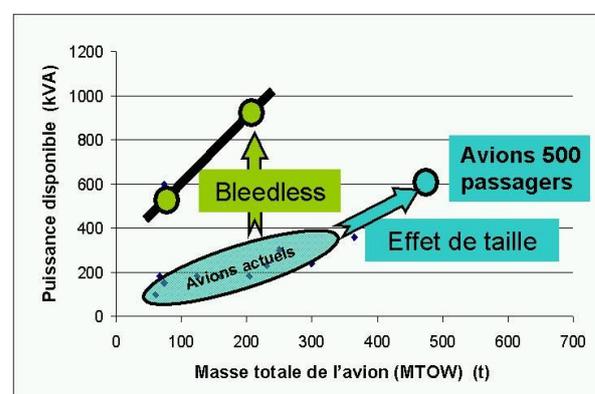


Figure 7 : Impact de la suppression du prélèvement d'air (bleed) sur la puissance électrique installée.

La suppression du prélèvement d'air à une forte influence sur le fonctionnement de l'avion. En effet, ce même « bleed » sert également au démarrage des moteurs au sol, en utilisant l'air en provenance de l'APU

(cf. Figure 8). Une fois les moteurs démarrés, l'APU est éteint, et ne permet plus la fourniture d'énergie pneumatique. L'utilisation d'un APU pour la réalisation du conditionnement d'air par exemple est donc impossible.

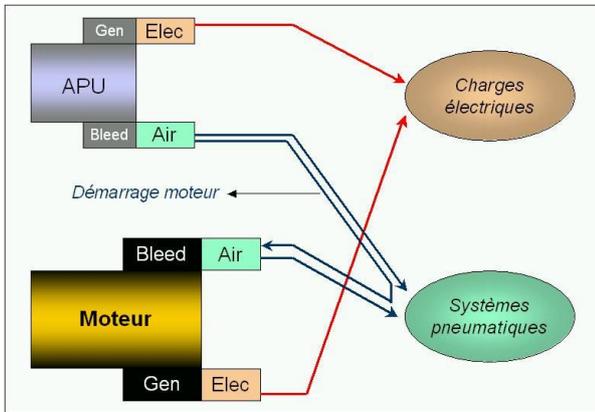


Figure 8 : Utilisation actuelle des ressources en air et électricité. L'APU étant en fonctionnement, le démarrage des moteurs est réalisé par l'air de l'APU à travers le « bleed ». Ce même « bleed » est ensuite utilisé pour alimenter les systèmes pneumatiques. Les charges électriques sont totalement indépendantes.

Dans le cas de la suppression du « bleed », les moteurs doivent être démarrés électriquement (cf. Figure 9). Des travaux portent alors sur l'utilisation des générateurs comme démarreur électrique de manière à mutualiser les fonctions.

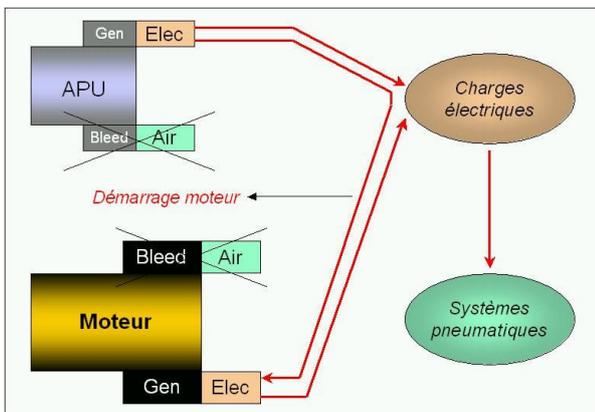


Figure 9 : Fonctionnement des systèmes pneumatiques et électriques après suppression du « bleed ». L'APU étant en fonctionnement, le démarrage des moteurs est réalisé électriquement par l'intermédiaire des générateurs. Ces générateurs alimentent ensuite les systèmes électriques. Les systèmes pneumatiques sont alimentés en utilisant l'énergie électrique.

Puisque l'APU n'a plus à fournir d'énergie pneumatique, il serait possible de remplacer ce groupe par une autre source d'électricité. La pile à combustible est un générateur candidat pour cette fonction. Néanmoins, la puissance importante qu'elle doit être capable de fournir entraîne aujourd'hui un encombrement et une masse trop importante. Il y a un

manque de maturité de cette technologie pour l'application aéronautique souhaitée.

C. Génération électrique

L'augmentation du nombre d'équipements électriques impose la mise en place de générateurs puissants. Pour un long courrier type 300 passagers, le conditionnement d'air implique une augmentation de la puissance électrique installée d'environ 400 kW. En ajoutant très approximativement 200 kW nécessaire aux dégivrages et autres équipements auparavant hydrauliques, cela fait grimper la puissance de la génération normale à près de 1 MW, contre seulement 230 kW pour un actuel avion 300 passagers.

La masse et encombrement des générateurs dans le boîtier d'accessoires moteur sont alors importants (cf. Figure 10), ce qui conduit à étudier d'autres possibilités d'installation. En particulier, l'intégration des générateurs au centre des moteurs permettrait, à terme, d'éliminer la transmission mécanique nécessaire à l'entraînement des systèmes de génération hydraulique et électrique actuellement utilisés (cf. Figure 11). Cependant, les contraintes thermiques sont très fortes dans le moteur, et la faisabilité de l'intégration des générateurs est encore à l'étude. Ce concept est imaginé depuis plusieurs années, avec des machines réversibles permettant également le démarrage des moteurs [REQ93].

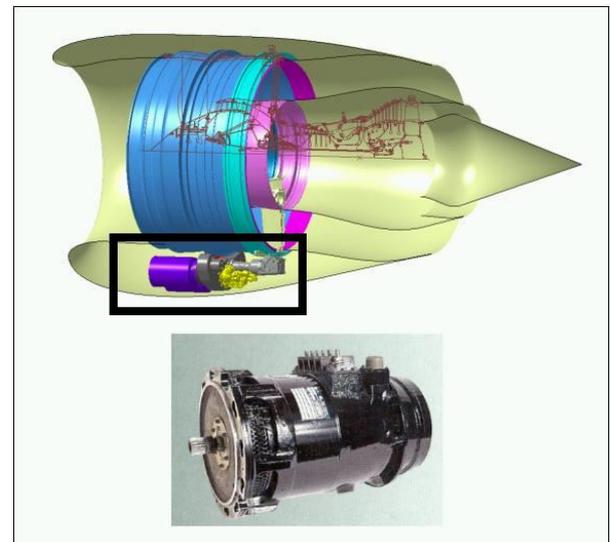


Figure 10 : Disposition des générateurs électriques sur les avions actuels. Ici, les VFG de l'A380 occupent une place importante en périphérie du moteur (boîtier d'accessoires moteur).

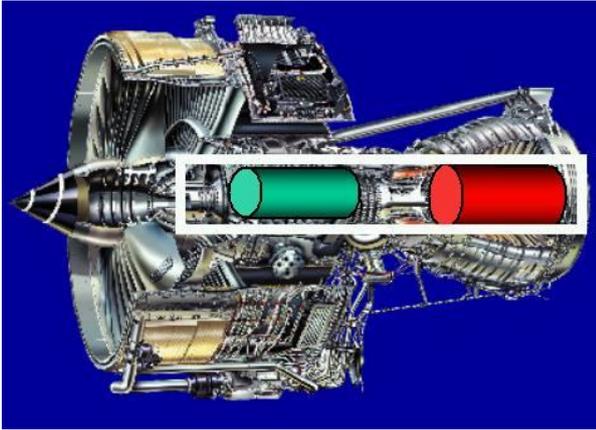


Figure 11 : Disposition à l'étude pour l'avenir. Les générateurs seraient intégrés dans le moteur.

D. Réseau électrique

Tous les avions de transports de taille moyenne ou importante utilisent deux standards de tension pour leurs réseaux de bord : 28 V DC et 115 V AC. L'augmentation de la puissance montre un intérêt pour l'élévation de ces tensions, afin de diminuer les sections de câbles et leurs masses. En ce qui concerne le réseau secondaire, le 28 V DC reste judicieux. Par contre, le réseau principal 115 V AC pourrait être remplacé ou complété par la tension 230 V AC. La haute tension continue pourrait également se généraliser, avec 270 V DC, ou même ± 270 V DC, soit une tension différentielle de 540 V DC. Cela fait de nombreuses années que cette haute tension différentielle est envisagée, associée à un alterno-démarrreur [JAW93]. En effet, cette haute tension est particulièrement adaptée pour les consommateurs de forte puissance, tels que les groupes de conditionnement d'air.

Toujours du fait de l'augmentation de la puissance installée et, en conséquence, de la montée en puissance des convertisseurs statiques utilisés par les équipements, le risque de perturbation réseau est croissant. En particulier sur le réseau alternatif, les redresseurs à diodes type « 6-pulses » génèrent des harmoniques basses fréquences pouvant entacher la qualité de tension réseau. Des solutions de filtrage actif seront probablement intégrées dans les réseaux de bord [PL04].

5. Conclusion

Des évolutions majeures sont nécessaires pour la suppression du prélèvement d'énergie pneumatique sur les moteurs et la diminution de l'énergie hydraulique, au profit de l'augmentation de l'énergie électrique. Ceci demandera des changements importants dans la génération et la distribution électrique, ainsi que dans l'approche des réseaux embarqués.

Des projets de recherche récents, tel que le POA (Power Optimized Aircraft), ont mis en avant des gains significatifs apportés par l'utilisation massive de l'électricité, et ont permis de dégager des voies d'exploration de l'avion plus électrique vers le tout électrique. L'usage de technologies désormais compétitives et fiables, telles que l'électronique de puissance, permet de surpasser des solutions

conventionnelles déjà optimisées, lesquelles n'ont pas un potentiel d'amélioration significatif.

Des évolutions conséquentes sont nécessaires pour les futurs systèmes électriques embarqués afin de fournir les puissances demandées et de réussir les challenges technologiques associés. Ces évolutions doivent être l'occasion de considérer des concepts nouveaux apportant de nouvelles fonctionnalités, sans oublier l'intégration physique dans l'avion.

Références

[OL04] O. Langlois, E. Foch, X. Roboam, H. Piquet, *De l'avion plus électrique à l'avion tout électrique : état de l'art et prospective sur les réseaux de bord*, Journées 2004 de la section électrotechnique du club EEA, mars 2004.

[REQ93] Richard E. Quigley, Jr., Aerospace Power Division, Aero Propulsion and Power Directorate, Wright Laboratory, *More Electric Aircraft*, IEEE Applied Power Electronics Conference, mars 1993.

[JAW93] Joseph A. Weimer, Aerospace Power Division, Aero Propulsion and Power Directorate, Wright Laboratory, *Electrical Power Technology For The More Electric Aircraft*, 1993.

[PL04] Ph. Ladoux, F. Richardeau, L. Raulin, *Electronique de Puissance pour la qualité de l'énergie des réseaux de bord d'avion*, Journées 2004 de la section électrotechnique du club EEA, mars 2004.

Comparaison des réseaux alternatifs et continus du point de vue de leur stabilisation

Régimes transitoires – pollution harmonique

Jacques COURAULT

Areva T&D

Résumé : Pour un ensemble de charges, la distribution de l'énergie peut être envisagée en partant d'un réseau continu ou d'un réseau alternatif. Les deux distributions ont leurs avantages et leurs inconvénients. Depuis une vingtaine d'années l'industrie utilise les alimentations à courant continu quand elles permettent d'introduire des avantages fonctionnels, par ailleurs certains navires, comme les sous-marins les utilisent depuis toujours. Cependant, les alimentations alternatives ont bien des mérites et conservent dans une grande majorité d'applications l'avantage de la fiabilité. Dans les lignes qui suivent, les difficultés et les avantages des deux types d'alimentations sont évoqués.

1. Introduction

Aujourd'hui la distribution de l'énergie électrique entre les utilisateurs d'un même site s'effectue d'une manière très classique avec des tensions alternatives. L'intérêt essentiel de ce mode de distribution repose d'une part, sur une utilisation encore importante de machines triphasées à vitesse fixe ne nécessitant pas de conversion statique et d'autre part sur la souplesse apportée par l'utilisation des transformateurs... Cependant dans bien des types d'industrie, et en particulier sur les bateaux, la vitesse variable se généralise dans le but d'optimiser soit l'exploitation soit la production.

Les variateurs de vitesse généralement utilisés, de quelques kW à éventuellement plus de dix MW, sont du type indirect en tension, c'est à dire qu'ils comprennent un convertisseur réseau et un convertisseur machine séparés par un élément le découplage des conversions. Dans ces conditions il est bien évident qu'une alimentation continue permettrait d'éliminer le convertisseur réseau.

Par ailleurs pour renforcer l'intérêt d'une distribution par tension continue, il est nécessaire d'évoquer une certaine facilité de stockage de l'énergie, particulièrement intéressante, dans le cas des charges cycliques, voire impulsionnelles.

1.1. Alimentations en courant continu.

L'intérêt industriel pour les alimentations continues est double, d'une part fonctionnel et d'autre part économique.

1.1.1. Intérêt fonctionnel.

Échange d'énergie entre différentes motorisations. Pourquoi passer par le réseau alternatif d'alimentation et le polluer ? Il s'agit probablement là de la motivation essentielle, d'une part réduire les coûts de la dépollution, qui est toujours nécessaire pour les puissances importantes et d'autre part prendre en compte dans le dimensionnement global du redresseur le foisonnement des charges. La figure 1 met en évidence le principe d'une alimentation, dite à courant continu, d'un ensemble de motorisations.

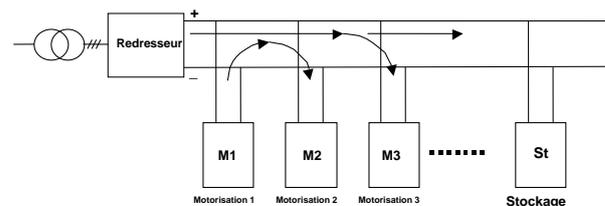


Figure 1

Dans une certaine mesure, ce type d'alimentation permet de s'affranchir des perturbations présentes sur les réseaux de distribution alternatifs et plus particulièrement des creux de tension dont l'effet, sur les convertisseurs, peut être destructeur en freinage et par voie de conséquence catastrophique pour les procédés. Dans certains cas, la fiabilisation du réseau continu, vis-à-vis des perturbations du réseau alternatif est nécessaire, elle est réalisée, comme le montre la figure 1 en introduisant un stockage d'énergie, batterie ou stockage inertielle.

1.1.2. Intérêt économique

Depuis une quinzaine d'années, la machine à courant continu a été abandonnée au profit des machines alternatives, synchrones et surtout asynchrones jugées plus robustes et plus économiques. Par ailleurs, avec les techniques modernes de contrôle, les machines alternatives permettent d'accéder à des performances dynamiques supérieures à celles possibles avec les machines à courant continu. Cette généralisation de l'utilisation des machines alternatives tient, pour beaucoup, aux progrès réalisés dans les convertisseurs de puissance et plus particulièrement à l'évolution des IGBT. Ces composants de puissance étant asymétriques, les alimentations en tension se sont généralisées. La figure 2 montre la structure classique d'un convertisseur indirect en tension, qui est composé de trois blocs fondamentaux : le convertisseur machine, le bus à courant continu et le convertisseur réseau.

Le convertisseur machine est naturellement réversible, mais dans sa version la plus simple, pont de diodes, le convertisseur réseau ne l'est pas d'où la nécessité, dans certains cas d'introduire des sophistications supplémentaires à ce niveau... La structure de ce convertisseur élémentaire permet d'imaginer l'intérêt fonctionnel et économique d'un regroupement de plusieurs convertisseurs, dits machine, sur un même bus à courant continu ne comprenant qu'une seule alimentation.

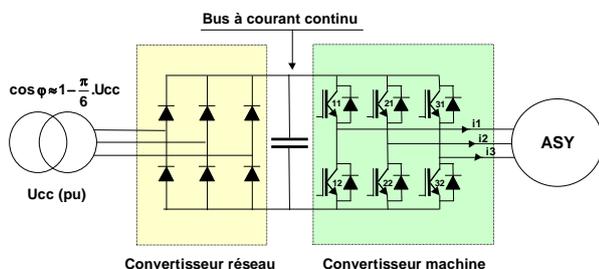


Figure 2

Il est donc clair, que le convertisseur de fréquence à retenir, avec ce type d'alimentation est le convertisseur en tension.

Le réseau à courant continu est alimenté soit par un simple pont de diodes ou par un convertisseur plus complexe permettant de réguler la tension continue à une valeur constante, ainsi les dimensionnements du redresseur d'alimentation et de son transformateur peuvent être optimisés de manière à réduire la consommation d'énergie réactive. À bord d'un bateau, cette solution présente un intérêt significatif pour le dimensionnement de la centrale.

1.1.3. Difficultés de mise en œuvre

La principale difficulté, pour les installations de forte puissance, réside dans l'absence d'isolation entre les différentes motorisations.

Un défaut d'isolation sur une motorisation perturbe l'ensemble du réseau.

Nécessité d'introduire des dispositifs de blocage des composantes homopolaires, haute fréquence, générées par les différents actionneurs.

Pour les fortes puissances, il est bien évident que les tensions continues doivent être élevées... Dans les applications industrielles, jusqu'à 2 MW, les tensions continues sont de l'ordre de 980 V, de manière à pouvoir alimenter des machines en 690 V. Pour les puissances supérieures, quand la distribution est limitée à deux ou trois convertisseurs, la tension continue est comprise entre 4,7 kV et 5 kV, de manière à alimenter des machines 3,3 kV. Mais dans le cas général d'une grande quantité de convertisseurs présents sur le réseau continu, le bon choix de tension est probablement de l'ordre de 3,5 kV, pour l'alimentation de machines 2,4 kV. La raison de cette perception est simple, elle repose d'une part sur la nécessité d'introduire des organes de manœuvre et de protection et d'autre part sur les matériels disponibles sur le marché : 3 kV est l'une des tensions normalisées en traction ferroviaire. Sur un plan industriel il est toujours souhaitable, dans le but de réduire les coûts de développement, d'envisager des synergies avec d'autres activités. Il faut d'ailleurs bien prendre en compte qu'une caténaire alimentant un nombre important de motrices, constitue, par excellence, un réseau à courant continu sur lequel on trouve des nécessités de protections, de disponibilité et des contraintes liées aux harmoniques en relation aussi bien avec les matériels que la sécurité (non-perturbation des relais de voie)...

1.2. Alimentations en courant alternatif

Elles sont classiques et largement répandues, aussi bien dans le monde industriel que dans le monde maritime. Leur intérêt réside essentiellement dans l'évolution des niveaux de tension : pour chaque type d'utilisation il est possible de choisir, en introduisant des transformateurs, la tension la mieux adaptée et la plus économique du point de vue des protections. Les tensions les plus utilisées sont le 6,6 kV et le 11 kV du fait de l'augmentation des puissances.

Avec une alimentation alternative, on peut utiliser aussi bien des convertisseurs indirects en tension, déjà évoqués dans les lignes précédentes, que des

convertisseurs indirects en courant voire des convertisseurs directs en tension. Pour les fortes puissances les convertisseurs directs de type cycloconvertisseur étaient très utilisés il y a une vingtaine d'années. Alors que les seuls composants disponibles étaient les thyristors et que les moteurs de propulsion avaient et ont toujours des vitesses maximales comprises entre 100 et 200 t/mn, il est logique que le cycloconvertisseur ait été largement utilisé. Il n'en est plus de même aujourd'hui, mais s'il conserve quelques inconditionnels, sur les brise-glace notamment où la tradition y est pour beaucoup, les autres types de convertisseurs sont tout aussi capables d'autoriser des couples importants, plus élevés que les couples nominaux, même à vitesse nulle.

Le schéma de principe d'un cycloconvertisseur est représenté ci dessous. Ce convertisseur prélève directement l'énergie de la machine sur le réseau, au moyen de ponts de GRAËTZ, ainsi non seulement il génère des courants harmoniques significatifs mais également des fluctuations de l'énergie réactive appelée sur le réseau. Avec ce type de conversion, la stabilisation du réseau est délicate et conduit presque toujours, pour la propulsion des bateaux, à installer un réseau dédié.

Même si ce convertisseur est encore parfois retenu dans l'industrie, son utilisation devient marginale.

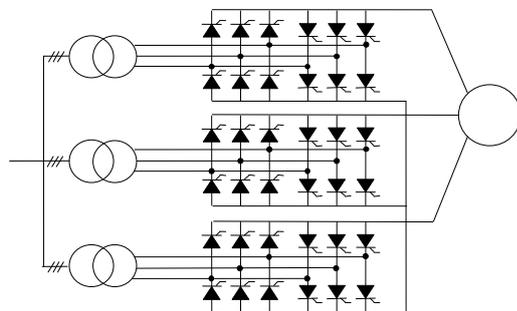


Figure 3

Durant ces dix dernières années les propulsions électriques des bateaux de commerce ou de croisière se sont très largement développées en partant d'un convertisseur, dont le principe était connu depuis bien longtemps, le redresseur / onduleur à commutation naturelle (brevet AEG 1936) et largement répandu dans les procédés à haute fiabilité (vapocraqueurs en pétrochimie), depuis plus de vingt cinq ans. On peut même noter qu'une série de TGV a également retenu ce schéma... Le schéma de principe de ce convertisseur dit indirect en courant est représenté par la figure 4.

Alors que le schéma de la figure 3 peut indifféremment alimenter des machines synchrones ou asynchrones, celui de la figure 4 ne peut qu'alimenter des machines synchrones, capables de fonctionner avec

un facteur de puissance « avant », c'est-à-dire, susceptibles de fournir l'énergie réactive sans laquelle un pont de GRAËTZ à commutation naturelle ne peut fonctionner.

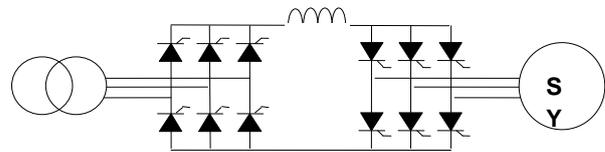


Figure 4

Les harmoniques de courant générés sur le réseau sont les rangs 5, 7, 11, 13 ... classiques d'un pont de GRAËTZ. La présence de l'inductance entre les ponts machine et réseau limite la remontée des harmoniques ayant pour origine le convertisseur machine, c'est l'une des propriétés fondamentales de la conversion indirecte. Il doit être noté que le dimensionnement de cette inductance de lissage est fondamental dans l'adéquation machine, convertisseur, réseau.

Ce schéma de base est cependant rarement utilisé pour la propulsion des bateaux, il est nécessaire de le faire évoluer, dans le double but de réduire la pollution sur les réseaux d'alimentation et d'introduire les redondances nécessaires à une exploitation sécurisée et d'ailleurs imposée par les règlements maritimes.

Le schéma de principe utilisé est donc celui de la figure 5. Il est du type dodécaphasé parallèle. Les harmoniques générés sur le réseau sont de rangs 11, 13, 23, 25... La marche sur demi-moteur est possible et dans ce cas dégradé nous revenons à la structure de base, avec génération d'harmoniques 5, 7 ... mais avec une puissance plus faible. La figure 6 donne un ordre de grandeur des possibilités de cette marche dégradée, qui est limitée sensiblement à 70% de vitesse soit environ 34 % de la puissance de l'hélice.

Cette structure n'apporte hélas aucun gain vis-à-vis des puissances réactives consommées.

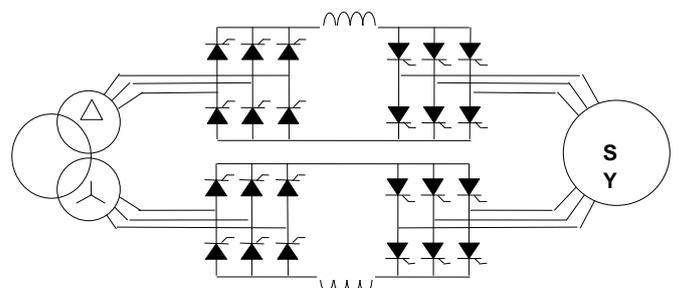
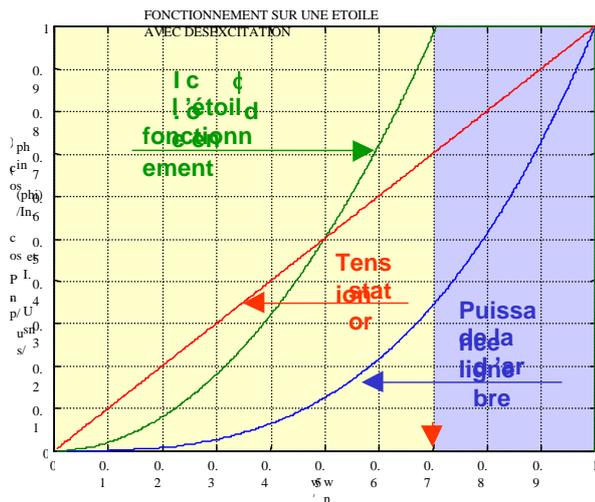


Figure 5


Figure 6

Depuis quelques années le développement des composants de forte puissance, blocables par la gâchette, les GTO et plus particulièrement les IGBT, largement utilisés en traction ferroviaire, autorise la conception de convertisseurs indirects en tension, utilisables pour la propulsion des navires : la structure de principe est donnée par la figure 2.

Vis-à-vis du réseau l'intérêt de ces convertisseurs est incontestable. La tension continue intermédiaire étant fixe, le premier avantage évident est celui du facteur de puissance. Le plus souvent des ponts de diodes sont suffisants pour assurer un fonctionnement satisfaisant, d'où un facteur de puissance toujours supérieur à 0,9. Le second avantage est également lié aux diodes du convertisseur réseau : du fait de la durée de commutation plus importante, avec des diodes ($\alpha=0$) qu'avec des thyristors, la décroissance de l'amplitude des harmoniques de courant est notablement supérieure à $1/h$, h étant le rang de l'harmonique considéré. Il en résulte une pollution plus faible qui réduit d'autant l'importance physique des filtres qui dans certains cas peuvent être totalement éliminés.

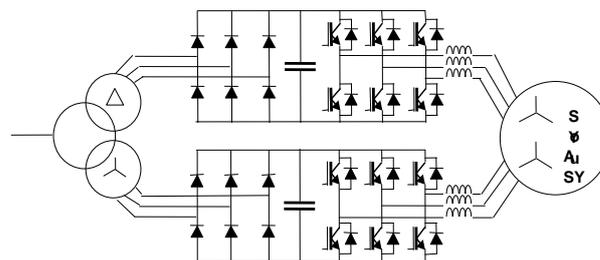
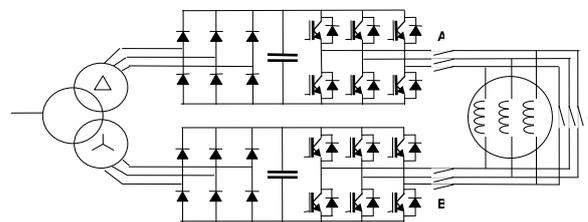
Il convient de noter que la réduction, du réactif et des harmoniques, introduite par ce type de schéma influe favorablement sur le dimensionnement des alternateurs des réseaux de bord.

Les figures 7 et 8 donnent un aperçu des schémas de principe possibles en alimentation de tension pour la propulsion des navires.

Ces deux schémas prennent en compte le besoin de redondance imposé par les propulsions. La figure 7 est classique et reprend le même principe que celui utilisé en alimentation de courant figure 5, les limitations fonctionnelles entraînées par une marche dégradée sur demi-moteur sont donc les mêmes que celles

représentées sur la figure 6. Le schéma représenté par la figure 8 alimente une machine triphasée, en partant de deux convertisseurs [9]... La redondance ne prend donc en compte que les convertisseurs et non la demi-machine. En situation de marche dégradée, les sectionneurs du convertisseur en défaut (A ou B) sont ouverts et C est fermé. La machine est donc couplée en triangle pour être alimentée par le convertisseur en état.

Vis-à-vis du réseau, les deux structures sont équivalentes, les figures 7 et 8 conduisent à un redressement à 12 phases, mais il est bien évident qu'une structure 24 phases est possible si l'on souhaite une marche dégradée aussi peu polluante que possible.


Figure 7

Figure 8

Avantages et inconvénients des alimentations en courant alternatif

La possibilité d'utiliser des transformateurs introduit tout à la fois des avantages et des inconvénients.

Les avantages sont évidents, pour chaque niveau de puissance il est possible d'utiliser la tension la mieux adaptée et d'introduire les protections qui existent sur le marché.

Un transformateur, du fait de ses réactances, réalise une adaptation des courants de défaut.

Un transformateur permet de choisir, pour chaque type d'utilisation la tension la mieux adaptée, en particulier quand les charges sont des convertisseurs statiques, le choix de l'optimum technico-économique est plus facile.

La tolérance aux défauts d'isolement est plus grande et autorise éventuellement des marches dégradées. Si chaque réseau alimenté par un transformateur est isolé, le fonctionnement avec un défaut d'isolement peut être toléré, la mise hors service définitive étant introduite par le deuxième défaut.

Un transformateur correctement défini, avec écrans, doit être considéré comme un composant clé vis-à-vis de la compatibilité électromagnétique. En effet, comme expliqué dans les lignes qui suivent, les convertisseurs statiques sont des générateurs de courants homopolaires hautes fréquences.

Les inconvénients découlent des avantages :

Les transformateurs introduisent des masses et des volumes significatifs.

Le stockage de l'énergie est délicat en alternatif. Il est cependant possible, mais indirect, il ne peut se faire qu'en passant par des convertisseurs statiques, onduleurs à commutation naturelle ou forcée.

2. Alimentation à courant continu

Les points à prendre en compte pour définir la structure d'un réseau à courant continu sont d'une part, l'alimentation et son contrôle et d'autre part sa compatibilité électromagnétique.

2.1. Contrôle des réseaux à courant continu

Deux familles de solutions sont possibles, soit la tension n'est pas régulée, soit elle est régulée rapidement. Dans le premier cas il s'agit d'une alimentation basée sur l'association de ponts à diodes et dans le second elle utilise des actionneurs plus sophistiqués, à thyristors par exemple.

Dans les deux cas il s'agit d'obtenir une tension V2 stable, soit quand la tension d'entrée V1 est perturbée, soit quand la résistance équivalente à l'ensemble des charges présentes sur le réseau évolue. La figure 9 met en évidence le schéma équivalent, de principe, d'une telle alimentation : fonction de transfert V2/V1, pulsation propre et amortissement sont pris en considération.

Pour entrevoir toutes les différences entre ces deux manières de résoudre le problème, il convient en premier lieu de s'interroger sur la nature et le comportement des charges dominantes. Sur une installation moderne la plus grande partie de ces charges est constituée de convertisseurs statiques à modulation de largeur d'impulsions. Chaque convertisseur étant pourvu de contrôles, tension, vitesse ou couple, en principe

indépendants de la tension continue V2 d'alimentation. Cela signifie en particulier que si la tension V2 décroît, le courant dans la résistance R augmente de manière à maintenir une puissance constante en sortie des convertisseurs présents sur le réseau [1], nous sommes donc en présence d'une résistance équivalente particulière...

$P = UI = \text{constante} \dots dP = 0 \dots I \Delta U + U \Delta I = 0$ d'où, $R = \frac{U}{I} = -\frac{\Delta U}{\Delta I}$
 Vis-à-vis des variations de tension cette résistance est négative [2].

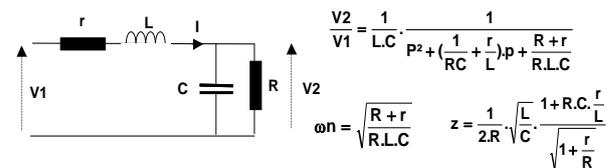


Figure 9

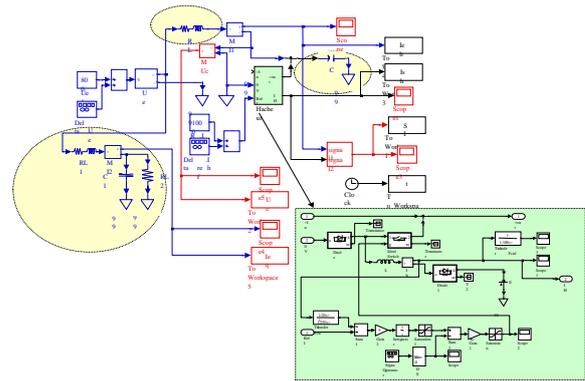


Figure 10

La figure 10 représente la simulation sous MATLAB/SIMULINK, de l'alimentation d'un hacheur, qui impose le fonctionnement à puissance constante, en présence d'un filtre r,L,C. Sur la même simulation la source V1 alimente également un circuit r,L,C, R, cette dernière valeur, constante et positive, est représentative de la résistance moyenne présentée sur le réseau par le hacheur.

La figure 11 représente la phase d'initialisation de la simulation de la figure 10 (courants dans L en fonction du temps), sur la partie droite, avec une valeur de condensateur de 50 mF la convergence semble difficile pour le courant absorbé sur le réseau par la charge comprenant le hacheur, par contre, avec la même sollicitation le courant dans la charge passive s'amortit assez rapidement. Sur la simulation gauche, avec une valeur de condensateur dix fois plus forte, la convergence s'effectue sensiblement de la même

manière pour la charge active et pour la charge passive. On notera cependant que l'amortissement est plus élevé avec la charge passive.

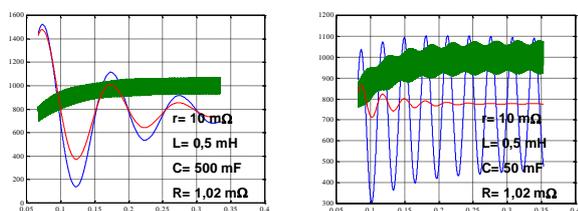


Figure 11

La figure 12 représente l'amortissement z pour une charge passive $R > 0$ (z_{pl}) et pour une charge active $R < 0$ (z_{al}), en fonction de la valeur du condensateur.

$$z_{pl} = \frac{1}{2.R} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot \frac{1 + R.C \cdot \frac{r}{L}}{\sqrt{1 + \frac{r}{R}}} \quad \text{et} \quad z_{al} = \frac{-1}{2.R} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot \frac{1 - R.C \cdot \frac{r}{L}}{\sqrt{1 - \frac{r}{R}}}$$

On peut effectivement constater que pour $C = 50$ mF l'amortissement, sur charge active est nul, ce qui confirme l'existence d'une oscillation entretenue à l'initialisation de la simulation. Ainsi, une condition élémentaire de stabilité est donnée par $z > 0$, soit,

$$R.C > \frac{L}{r} \quad \text{ou encore en manipulant cette inégalité,}$$

$$P < \frac{C.r}{L} \cdot U^2$$

P étant la puissance fournie par l'alimentation.

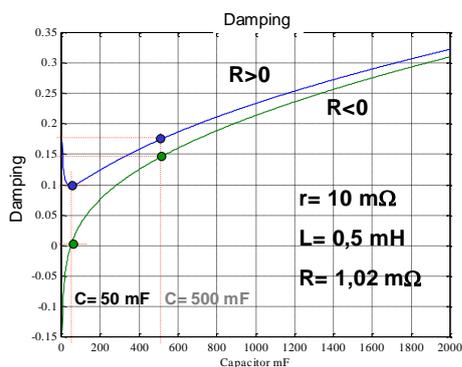


Figure 12

Cette relation, simplificatrice mais synthétique, montre bien que la stabilité sera d'autant meilleure que l'inductance sera faible, le condensateur élevé ou encore la tension élevée. Ceci dit, l'égalité correspond à un amortissement nul, c'est dire que pour être réellement stable, la valeur minimale du condensateur, ainsi définie, devra être multipliée par trois ou quatre.

Dans l'industrie on peut trouver bien des entraînements dans lesquels cette condition n'est pas remplie... Il faut savoir qu'il s'agit alors d'alimentations à courant continu comprenant un nombre limité de motorisations (nombre inférieur à quatre) et surtout que la nature des procédés permet de relâcher transitoirement des contraintes (couple ou vitesse) ce qui élimine tout fonctionnement à puissance constante. On conçoit bien que sur une pluralité de charges, il soit difficile de mettre en œuvre les retours d'état permettant le relâchement des contraintes évoquées. Avec une alimentation non régulée, il est donc nécessaire de réduire l'inductance, il y a des limites (soit physiques ou liées à la compatibilité électromagnétique), soit d'augmenter la valeur du condensateur...

La figure 13 met en évidence l'influence d'une évolution de l'inductance L sur les courants dans les deux schémas, actif et passif, lors d'une variation en échelon de 1% de la tension V_1 .

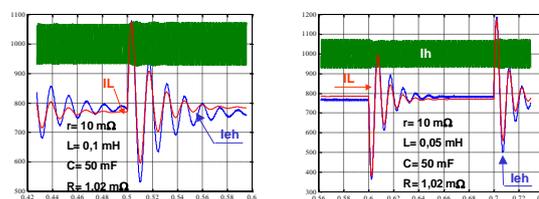


Figure 13

Cette simulation montre bien évidemment qu'une inductance faible augmente la stabilité naturelle du système. I_h courant, maintenu constant en sortie du hacheur, I_{eh} courant dans l'inductance du circuit actif, I_L courant dans l'inductance du circuit passif.

La façon la plus réaliste d'obtenir une alimentation à courant continu stable consiste à utiliser une source contrôlable : redresseur, hacheur ou autre.

Plusieurs structures de contrôle sont envisageables, soit un contrôle direct de la tension, soit un contrôle indirect passant par une régulation de courant...

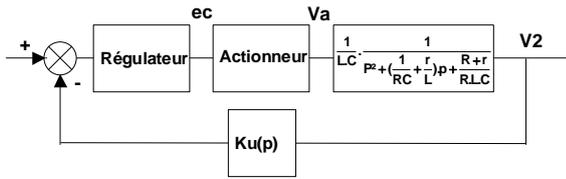


Figure 14

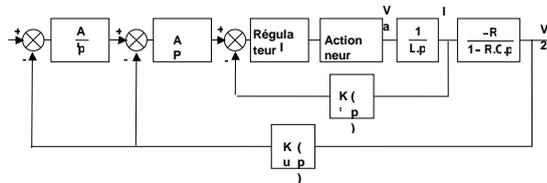


Figure 15

La figure 14 représente un contrôle direct de la tension. Compte tenu de la fonction de transfert $V2/Va$ qui est du deuxième ordre et évolutive en fonction de la charge et en fonction de C , la conception d'un régulateur performant et robuste est difficile voire impossible, d'où la structure de contrôle de la figure 15.

Le premier élément de réflexion pour l'introduire, repose sur la réduction de l'ordre de la fonction de transfert. Pour cela une régulation rapide du courant est réalisée. Ce contrôle rapide du courant est naturellement robuste, il ne dépend que de la valeur de l'inductance L , il est indépendant de C et de la charge : le condensateur C , pour autant qu'il existe, se comportant pour les variations rapides du courant comme un court circuit. Une fois le courant contrôlé, la fonction de transfert est effectivement du premier ordre :

$$\frac{V2}{I} = \frac{-R}{1-R.C.p} = \frac{-\frac{p}{\omega_c}}{1-\frac{p}{\omega_c}} \cdot \frac{1}{C.p}$$

avec $\omega_c = \frac{1}{R.C}$ ainsi pour les pulsations élevées supérieures à ω_c la fonction de transfert est équivalente

$$\text{à } \frac{V2}{I} = \frac{1}{C.p} \dots$$

La régulation de courant peut être approchée par un système du premier ordre de la forme

$$\frac{I}{\text{Réf.I}} = \frac{1}{K_i} \cdot \frac{1}{1+\frac{p}{\omega_i}}$$

en boucle fermée.

Il est alors logique de rechercher pour la première boucle en tension une coupure en boucle ouverte

comprise entre ω_c et ω_i , $\omega_c < \omega_{cbo1} < \omega_i$. Etant donné la forme de la fonction de transfert, $1/C.p$, une simple boucle proportionnelle est suffisante.

Si ω_{cbo1} désigne la pulsation de coupure en boucle ouverte de cette première boucle tension, elle est liée au gain proportionnel AP du régulateur par la relation

$$\text{suivante : } \omega_{cbo1} = \frac{AP.K_u}{K_i.C}$$

Pour apprécier la robustesse de la solution nous considérons maintenant le système en boucle fermée.

$$\frac{V2}{\text{Réf.V2}} = \frac{\omega_{cbo1}.\omega_i}{K_u} \cdot \frac{1}{p^2 + p.(\omega_i - \omega_c) + \omega_i.\omega_c \cdot (\frac{\omega_{cbo1}}{\omega_c} - 1)}$$

Il est bien évident que la position relative des pulsations ω_c , ω_{cbo1} et ω_i est fondamentale pour optimiser le système, pour être synthétique nous supposons que ω_{cbo1} est géométriquement centré par rapport à ω_c et ω_i , soit $\omega_{cbo1} = \sqrt{\omega_i.\omega_c}$. L'amortissement z peut alors être exprimé simplement :

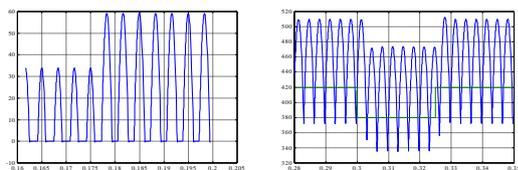
$$z = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{\omega_c}{\omega_i}} \cdot \frac{\frac{\omega_i}{\omega_c} - 1}{\sqrt{\frac{\omega_i}{\omega_c} - 1}}$$

Pour un rapport minimal entre ω_i et ω_c de 3 nous pouvons calculer un amortissement de 0,67. Ce qui constitue un progrès significatif par rapport à une alimentation non régulée. Notons que ce rapport est indépendant de L du fait du bouclage en courant.

Ces quelques considérations font le lien entre les possibilités du contrôle et le dimensionnement électrotechnique. Si par sécurité nous fixons $\omega_i/\omega_c=4$, nous en déduisons :

$$\boxed{C = \frac{4}{R.\omega_i}} \quad \text{ou encore} \quad \boxed{P < \frac{C.\omega_i}{4} .U^2}$$

Pour préciser les ordres de grandeur, considérons le cas d'un actionneur de type pont de GRAËTZ, alimenté par un réseau 50 Hz. Si le régulateur de courant est réglé pour obtenir les performances de la figure 16, on peut estimer que le retard statistique de réponse à un échelon est de l'ordre de 1,7 ms d'où le ω_i équivalent de 600 r/s.


Figure 16

Dans ces conditions une résistance de charge de 1 Ω impose une valeur minimale du condensateur de 6,7 mF. Le gain par rapport aux simulations des figures 11 et 13 est significatif.

Notons :

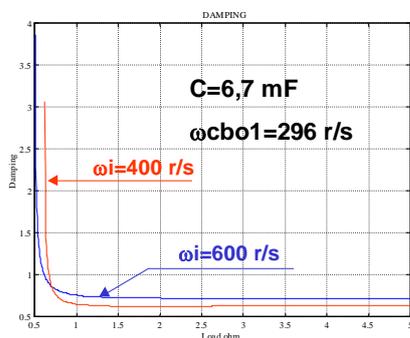
Encore une fois, que le résultat est indépendant de la valeur de L, ce qui libère d'autres critères de dimensionnement pour cette inductance, protections ou harmoniques.

Que l'intérêt d'avoir un actionneur rapide est incontestable (augmentation de ω_i) pour réduire C.

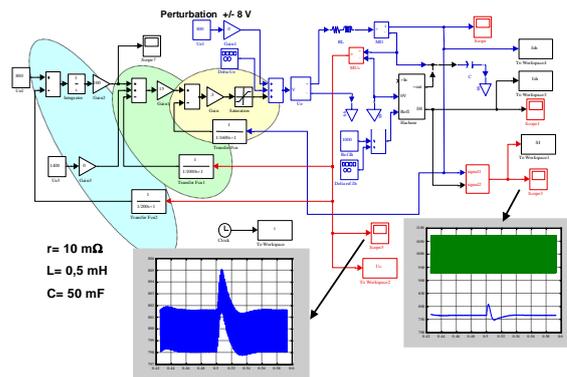
Que ω_c n'est pas aussi variable qu'il n'y paraît, ($\omega_c = 1/RC$) quand la charge augmente du fait d'un nombre plus important de convertisseurs sur le réseau, il en va de même pour C.

La figure 17 met en évidence une stabilité satisfaisante de l'amortissement en fonction de la charge R.

À ce niveau, la régulation de tension n'est que proportionnelle et n'assure pas la précision souhaitée. Pour y arriver il suffit d'ajouter une boucle intégrale lente comme représentée sur la figure 15. Etant donné les caractéristiques de la boucle précédente, amortissement et rapidité, cette dernière boucle de tension ne présente aucune difficulté de réglage.


Figure 17

En fait l'association d'une boucle proportionnelle et d'une boucle intégrale est des plus classiques et connue sous le nom de PI sans zéro.


Figure 18

La figure 18 est représentative de la simulation globale du contrôle de la tension d'un réseau continu. La perturbation d'évaluation de la robustesse, introduite au niveau de l'actionneur, simule une variation de la tension d'alimentation de 1%. Les résultats obtenus montrent la validité de la solution de contrôle proposée.

2.2. Les alimentations possibles

Plusieurs schémas sont possibles, le choix ne peut être fait qu'avec une connaissance précise des charges alimentées et de leurs foisonnements. À notre connaissance, il n'existe aujourd'hui aucun bateau ou navire à distribution totalement continue (les sous-marins classiques, constituent une exception), ainsi la démarche pour retenir les solutions possibles doit nécessairement s'appuyer sur des réalisations industrielles, en prenant en compte les besoins spécifiques de l'application.

Dans cet article, le terme bateau désigne des installations civiles et le terme navire des bâtiments à vocation militaire. Ces deux applications ont néanmoins de nombreux points communs, comme fiabilité, maintenabilité et réduction des volumes, ceci en présence de contraintes différentes.

C'est la nature des convertisseurs modernes qui pourrait imposer sur les bateaux les distributions ou BUS à courant continu, il est cependant peu probable, même dans un futur lointain, que des distributions globales soient envisagées. Mais des BUS locaux, par type d'application commencent à trouver leur justification technico-économique.

Pour une distribution globale les schémas de la figure 19 pourraient être envisagés. Ils seraient réalisés en partant d'alternateurs classiques à deux étoiles. Fréquence et vitesse de ces machines pourraient être élevées de manière à réduire les masses (entraînement par turbines), sachant que les variations de fréquence ont dans ces schémas une criticité qui est du deuxième ordre.

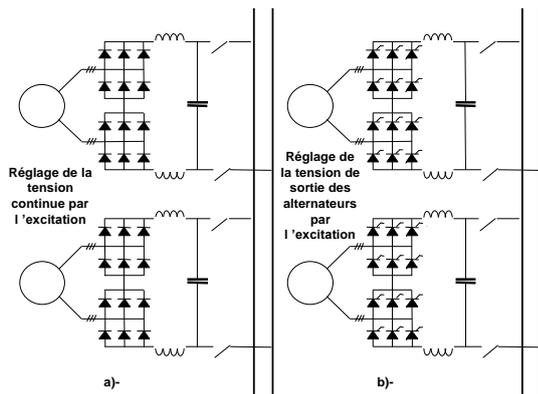


Figure 19

Le schéma 19-a est des plus classiques, les redresseurs sont des diodes, la tension continue et la répartition de la charge étant contrôlées en agissant sur l'excitation des alternateurs. Au niveau des critères de dimensionnement des différents composants évoqués dans le paragraphe précédent nous sommes en présence d'un cas non régulé. Mais il est bien évident que la dynamique de contrôle par action sur l'excitation est beaucoup trop faible. Le schéma de la figure 19-b utilise des thyristors qui permettent un contrôle rapide de la tension. Il convient de noter ici l'ensemble des avantages d'une structure dodécaphasée : d'abord pour la machine, réduction des contraintes sur les amortisseurs (dans une machine triphasée le premier harmonique de courant dans les amortisseurs est de rang 6, dans une machine avec deux étoiles décalées de 30° le premier harmonique de courant dans les amortisseurs est de rang 12), réduction des vibrations (pulsations de couple) et ensuite une augmentation possible de la dynamique de contrôle du régulateur courant.

La figure 19 prend en compte des machines classiques, même si elles peuvent être rapides, il est nécessaire dans une cohérence de réduction des masses de considérer des machines modernes, machines à aimants permanents ou machines à griffes. Ces deux types de machine ont un point commun, c'est l'importance de leurs réactances qui élimine toute possibilité de conversion alternatif / continu par des convertisseurs simples à commutation naturelle. Les facteurs de puissance qui en résulteraient seraient faibles et conduiraient à des surdimensionnements qui ne seraient pas cohérents avec les objectifs de réduction de masse recherchés. Il est donc impératif d'avoir recours à des convertisseurs plus sophistiqués, comme les redresseurs actifs, à commutation forcée. La figure 20 représente les schémas de principe possibles pour un tel redresseur.

Sur une machine à aimants permanents, le contrôle de la tension machine est par définition difficile à réaliser (noter malgré tout, quelques possibilités dans l'axe d), c'est donc au redresseur que cette fonction incombe totalement et cela avec un contrôle actif du facteur de puissance et une absorption sinusoïdale du courant dans le but de réaliser une optimisation de la machine. La figure 20-a donne le schéma de principe d'un redresseur MLI, il comporte du fait de sa topologie les degrés de libertés suffisants, d'une part pour faire de l'absorption sinusoïdale à facteur de puissance imposé, et d'autre part pour le réglage de la tension continue.

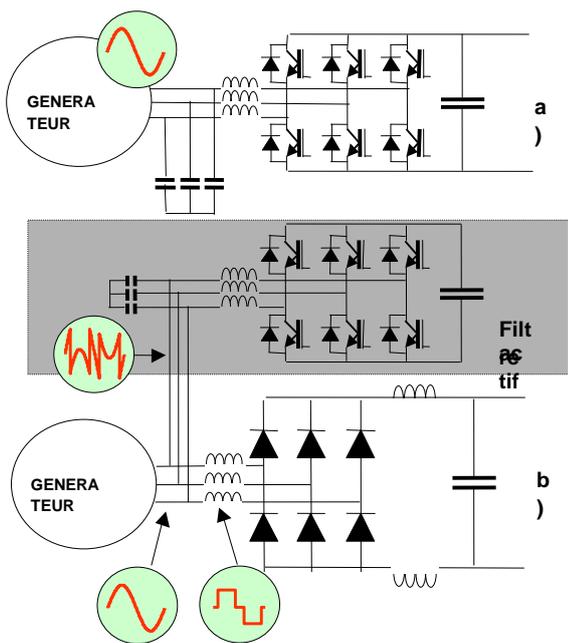
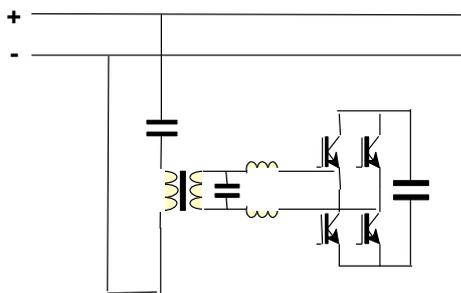
Avec ce schéma toute la puissance transite par le convertisseur IGBT, ce qui peut présenter quelques inconvénients vis-à-vis d'un MTBF calculé et surtout d'une manière plus objective, vis-à-vis des pertes de la conversion.

Le schéma 20-b est fondamentalement différent, puisque la puissance utile transite par un pont de diodes dont on corrige les imperfections, harmoniques et facteur de puissance par un filtre actif dont le dimensionnement, dû aux harmoniques, est de l'ordre de 30% de celui du pont de diodes et dû au réactif de l'ordre de 50%, en relation avec les réactances machine et la fréquence. Par rapport au schéma 20-a les possibilités de réglage de la tension de sortie sont faibles, d'une manière très dynamique et de faible amplitude par une modulation de l'énergie réactive au moyen d'une action sur la commande du filtre actif. D'une manière plus lente, dans le cas des machines à griffes on peut agir sur l'excitation.

Ainsi, les deux schémas de la figure 20 permettent un contrôle avec grande dynamique du réseau à courant continu.

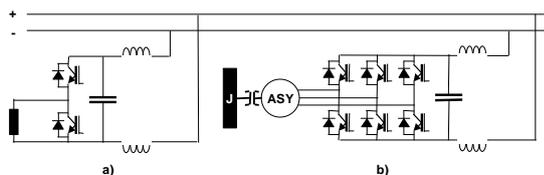
La figure 21 donne le schéma de principe d'un dispositif d'amortissement du réseau continu pour les bases fréquences, en particulier celles qui ont été longuement évoquées dans le paragraphe 2-1. Il trouve son intérêt dans les cas où le ou les générateurs d'alimentation du réseau ne possèdent pas la dynamique suffisante.

D'une manière générale, sur les réseaux continus, comme sur les réseaux alternatifs, se pose le problème du freinage des lignes d'arbres de la propulsion. Le renvoi de l'énergie sur le réseau de bord n'est possible que s'il existe une certitude de consommation suffisante des auxiliaires de bord.


Figure 20

Figure 21

Le recours à des moyens dissipatifs est classique. La ou les résistances de freinage sont introduites au moyen de hacheurs, figure 22-a, qui contrôlent les augmentations de la tension du réseau continu.

La figure 22-b introduit un stockage de l'énergie au moyen d'une ligne d'arbres inertielle à grande vitesse. La machine électrique qui semble la mieux adaptée à cette fonction est la machine asynchrone.


Figure 22

2.3. Les harmoniques dans les alimentations à courant continu

Comme dans le cas des réseaux alternatifs, les harmoniques de courant qui sont majoritairement générés par les convertisseurs statiques doivent faire l'objet d'une prise en compte particulière, qui en premier lieu conduit à l'identification des facteurs de pollution.

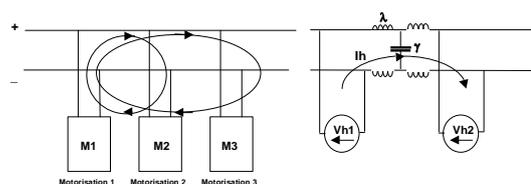
Les sources de pollutions.

Les éléments L, C, r du réseau qui conduisent soit à une oscillation propre soit à l'entretien d'une oscillation générée par un pollueur.

2.3.1. Les sources de pollution

La génération de la tension continue constitue une première source de pollution. Dans la majorité des schémas représentés dans cet article il figure toujours une inductance en sortie de redresseur (sur les deux polarités) dans le but d'avoir un filtrage énergétique des harmoniques engendrés par les sources. La structure de contrôle proposée permet de s'affranchir de la valeur de cette inductance au niveau de la stabilité du système. Cette inductance trouve un autre intérêt au niveau des protections, pour la sélectivité des défauts vis-à-vis de la définition des fusibles ou des disjoncteurs...

L'utilisation d'un réseau à courant continu n'est envisageable qu'avec des convertisseurs statiques. Chaque convertisseur statique est un générateur de courants harmoniques à la fréquence de découpage des IGBT.


Figure 23

Pour le réseau à courant continu chaque convertisseur statique est perçu pour les hautes fréquences comme un condensateur ou encore une source de tension harmonique d'impédance faible, figure 23. Les courants harmoniques générés par les tensions V_h , ne sont limités dans cette dernière figure que par l'impédance du réseau et les courants générés par un convertisseur sont susceptibles de se refermer dans les condensateurs de tête d'un autre convertisseur. Là encore des inductances de faible valeur sont

nécessaires de manière à rendre déterministe la répartition et la valeur des courants harmoniques.

2.3.2. Les constantes du réseau

Cela revient plus ou moins à définir le réseau à courant continu idéal... La fonction essentielle est bien évidemment la distribution d'une tension continue sur l'ensemble des consommateurs en véhiculant avec un minimum de pertes le courant : un réseau continu doit donc avoir une résistance faible vis-à-vis du courant continu. Globalement il doit avoir une fréquence propre élevée (λ et γ de la figure 23) et présenter pour les fréquences élevées une résistance élevée (effet de peau des jeux de barres) de manière à introduire un amortissement important des oscillations propres. Les jeux de barres doivent être peu résistants pour les courants continus et fortement résistants pour les courants hautes fréquences, nous sommes donc en face d'un problème de géométrie, dont la résolution passera toujours par une recherche de la compacité.

Compacité favorable, non seulement à la minimisation des inductances linéiques, mais également à la tenue des jeux de barres lors des défauts et à la minimisation des champs magnétiques rayonnés.

2.3.3. Les tensions homopolaires

Pour aborder ce sujet fondamental, aussi bien pour la compatibilité électromagnétique que pour la durée de vie des matériels, il convient en préalable de se poser quelques questions sur les solutions possibles pour référencer l'installation par rapport à la masse.

Si l'installation est totalement flottante, on peut être certain que les potentiels se fixeront en fonction des isolations naturelles des différents matériels et en fonction des condensateurs qui résultent de l'isolation... Manifestement il ne s'agit pas d'une solution souhaitable, aussi bien vis-à-vis de la durée de vie des matériels que de la compatibilité électromagnétique. La solution pratiquée dans les installations industrielles consiste à fixer d'une manière fortement impédante un point de symétrie du schéma, le point milieu du réseau continu par exemple.

Le schéma de la figure 24-a est généralement pratiqué. Deux résistances de forte valeur symétrisent les tensions du jeu de barres. Sur les installations de forte puissance il est parfois nécessaire de mettre en parallèle avec les résistances des condensateurs de faible valeur de manière à conserver un bon équilibre dynamique.

La détection des défauts ou d'une manière plus générale le contrôle d'isolement de l'installation est réalisé par une mesure du courant dans la liaison de masse.

Le point milieu des résistances est donc un point de référence à prendre en compte dans l'évaluation des tensions homopolaires... La tension qui apparaît entre le point milieu et le neutre d'une machine est bien connue, figure 26, dans le cas d'un seul entraînement, avec une symétrisation impédante, les courants générés par la tension homopolaire sont négligeables. Mais sur un réseau à courant continu, les différentes sources sont reliées d'une part, par le jeu de barre et d'autre part, par la masse naturelle qui est géométriquement incertaine, peu résistive et avec une inductance indéfinie, même si des précautions de câblage peuvent, dans une certaine mesure, fixer le cheminement des courants hautes fréquences.

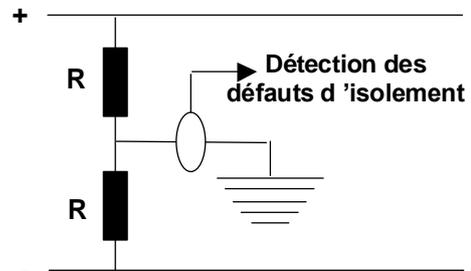


Figure 24-a

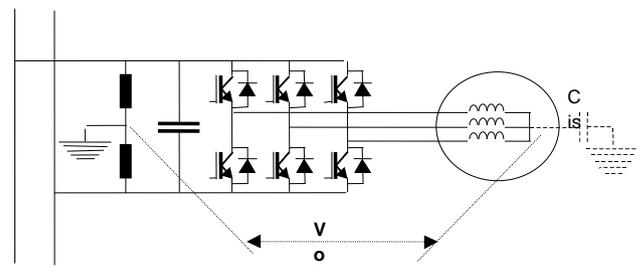
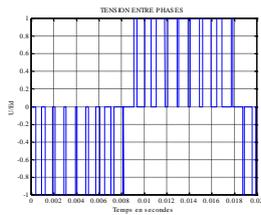
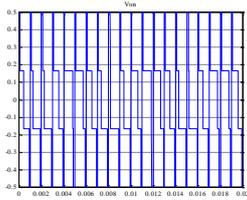


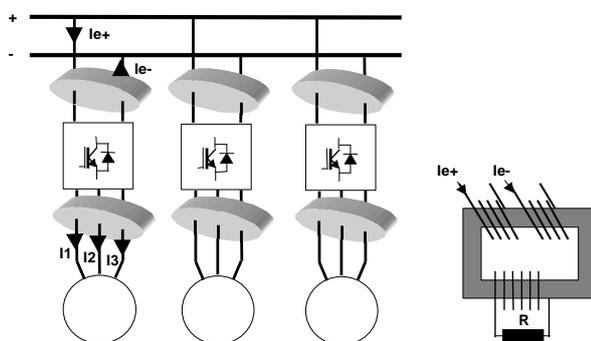
Figure 24-b

Pour un convertisseur deux niveaux classique, alimentant une machine avec la tension entre phases de la figure 25, laquelle prend en compte une tension continue égale à l'unité (u_s/Ed), on peut calculer la tension homopolaire définie dans les lignes précédentes par V_{oh} : cette tension est représentée par la figure 26.


Figure 25

Figure 26

Il est donc fondamental, sur un réseau à courant continu, de limiter les courants générés par ces tensions homopolaires. Ne rien faire conduirait à une détérioration prématurée de l'isolation des machines [7], [8] et à des difficultés au niveau de la compatibilité électromagnétique de l'ensemble de l'installation.

La mise en œuvre d'un dispositif de blocage de ces courants de circulation est bien connue et repose sur la mise en place, pour chaque motorisation, d'inductances dites homopolaires. Sur la figure 27, deux possibilités d'introduire ces inductances sont envisagées, soit entre le moteur et le convertisseur, soit entre le convertisseur et le point de raccordement sur le réseau continu commun. Fonctionnellement les deux dispositions sont satisfaisantes, pour les courants normaux, I_{e+} et I_{e-} on peut écrire $(I_{e+}) + (I_{e-}) = 0$ de même pour I_1, I_2, I_3 nous avons $I_1 + I_2 + I_3 = 0$. Ces égalités ne sont pas remplies en présence d'un courant à la masse... C'est bien le cas des courants homopolaires, ainsi le dimensionnement de ces inductances prend en compte des tensions homopolaires telles que représentées sur la figure 26, pour lesquelles la fréquence est élevée (fréquence de découpage IGBT), ce qui conduira à des composants de taille acceptable. On notera sur la figure 27 l'introduction d'un amortissement, par une résistance R placée sur un troisième enroulement.


Figure 27

L'inductance homopolaire à deux enroulements principaux est plus facile à réaliser c'est la raison qui nous a conduit à la représenter pour les courants I_{e+} et I_{e-} . De plus, comme déjà mentionné, une faible

inductance est nécessaire à l'entrée des convertisseurs, l'inductance homopolaire peut avec ses inductances de fuite jouer ce rôle.

2.4. Conclusions sur les alimentations à courant continu.

Envisager, dans sa globalité, la distribution de l'énergie à bord d'un bâtiment avec un réseau continu semble aujourd'hui peu crédible et le restera longtemps. Toute conversion d'énergie fait appel à des convertisseurs statiques, même pour les entraînements à vitesse fixe.

Par contre, envisager par familles de consommateurs, puissance / tension, des sous-réseaux à courant continu peut permettre de réduire les masses en jouant sur le foisonnement des charges, d'organiser des stockages répartis de l'énergie et éventuellement de conserver une petite distribution en alternatif pour certains auxiliaires de bord.

Il est bien difficile de clore ces quelques considérations sur les alimentations à courant continu sans évoquer les installations industrielles qui utilisent le principe du réseau à courant continu.

Petite puissance, 3 MW maximum, en 850 V ou 990 V, les lignes de parachèvement, dans les industries du papier et surtout du métal (machines asynchrones).

Plates-formes de forage, en 850 V, jusqu'à 5 MW, pour la distribution des équipements de forage, treuil de forage, table de rotation, pompes à boue (machines asynchrones)...

Industrie du métal en 4,7 kV pour bobineuses et enrouleuses jusqu'à 6 MW (machines synchrones).

Les installations fixes pour la traction ferroviaire, utilisent également le principe d'un réseau continu intermédiaire pour la conversion 60 Hz / 25 Hz ou 50 Hz / 16 Hz 2/3...

3. Réseaux alternatifs

La stabilité des réseaux alternatifs à bord des bateaux n'est jamais un problème très simple. Il est cependant plus classique que celui des réseaux à courant continu. La relative complexité de la stabilisation des réseaux de bord tient pour beaucoup au faible rapport entre la puissance de court circuit, par ailleurs évolutive, et la puissance des entraînements de propulsion.

Comme sur tout réseau alternatif, il existe deux contraintes, l'une est liée à la qualité de la tension distribuée et l'autre au facteur de puissance perçu par la centrale. Longtemps la propulsion a été à l'origine de la pollution la plus importante, c'est toujours le cas pour les propulsions classiques réalisées avec des sources de courant, mais on constate une croissance significative de la pollution des auxiliaires qui utilise de plus en plus la conversion statique (ascenseurs, grues, pompes...). Ainsi, le filtrage et la compensation des réseaux de bord doivent prendre en compte une pluralité de pollueurs caractéristiques.

La figure 28 permet d'initier la démarche de la dépollution du réseau électrique d'un bateau.

Comme pour toute installation, un réseau de bord peut être synthétisé par une source, des pollueurs et des filtres.

La particularité réside dans une forte évolution de la structure de la centrale, d'où les variations de X_{cc} qui se traduisent sur la figure 28 par des variations de X . La fréquence du fait des temps de réponse des diesels ou des turbines est également variable, même si des précautions sont toujours prises, au niveau des entraînements puissants, pour limiter les gradients de puissance, dP / dt .

Nous allons donc analyser les conséquences, sur le dimensionnement des filtres, des variations de X_{cc} (X) et de la fréquence.

Comme le montre, en présence d'un filtre élémentaire, la figure 29, il est usuel de considérer le schéma équivalent de l'installation en partant du pollueur que l'on considère comme une source de courants harmoniques. En fonction de ces courants on en déduit les tensions harmoniques qui permettront l'évaluation du THD, donc de la qualité de la tension. Ainsi, une manière synthétique d'aborder le problème est de considérer l'impédance du réseau vue par le pollueur, en fonction de la fréquence.

Rappelons que le rang d'accord d'un filtre, et sa puissance réactive sont donnés par les formules suivantes :

$$h_a = \frac{1}{\omega L_f \sqrt{L_f C_f}} \quad \text{et} \quad Q = \frac{C_f \omega L U^2}{1 - \left(\frac{1}{h_a}\right)^2}$$

La figure 30 représente l'impédance du réseau, vue par le pollueur, en fonction de la fréquence ou encore du rang (f/f_1). On notera d'une part la présence d'un accord sur le rang 5 et d'autre part une anti-résonance pour une fréquence inférieure à la fréquence d'accord, d'autant plus faible que C_f et L_r sont importants.

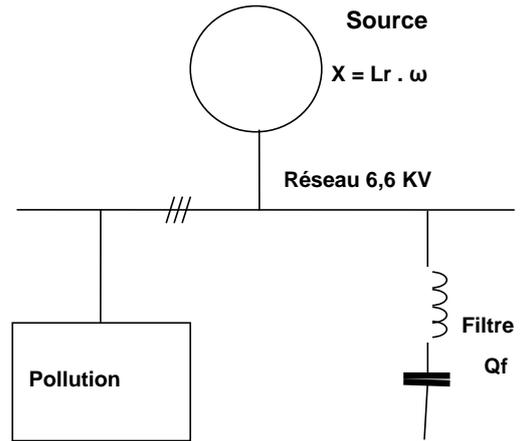


Figure 28

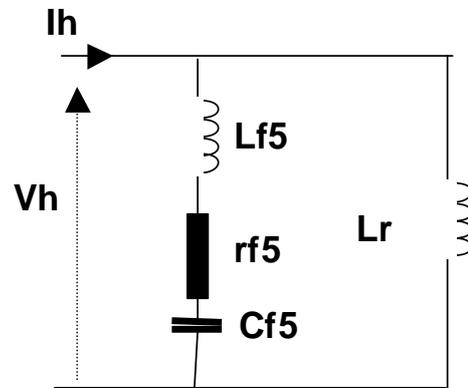


Figure 29

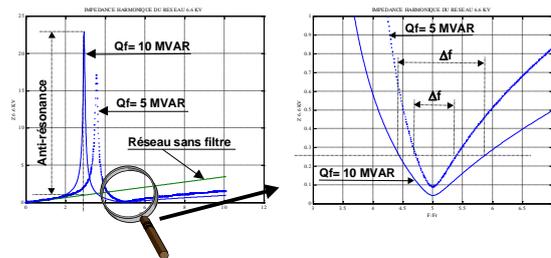


Figure 30

Cette anti-résonance peut être particulièrement gênante, si un harmonique du pollueur vient l'exciter...

Le respect d'un taux de distorsion global conduit, principalement pour les harmoniques importants, à réduire la valeur de l'impédance réseau aux fréquences correspondantes et pour cela il est nécessaire de prendre en compte les variations de fréquence du fondamental et de ses multiples. La partie droite de la figure 31 met en évidence qu'une augmentation de la puissance réactive du filtre contribue à augmenter la plage de fréquence Δf dans laquelle les objectifs de réduction de l'impédance sont tenus (variation de fréquence à prendre en compte

+/- 5%). Hélas, comme le montre toujours la figure 30, l'augmentation d'impédance est d'autant plus importante que la puissance réactive du filtre est plus élevée. Vis-à-vis de l'anti-résonance la figure 31 montre une tendance identique, faible puissance de court-circuit (X fort), c'est à dire un nombre limité d'alternateurs alimentant le jeu de barres, conduit à une anti-résonance d'amplitude élevée.

Cet exemple simple montre que la définition d'un filtre sur un réseau de bord, n'est généralement pas une chose facile et qu'elle fait le plus souvent appel à des compromis.

Fréquence de l'anti-résonance.

Amplitude de l'anti-résonance.

Efficacité de réjection, Δf .

Le moyen le plus classique pour faciliter le compromis entre ces différents points, réside dans l'introduction d'un amortisseur, dont le schéma et la réponse en fréquence sont donnés par la figure 32. Il s'agit en fait d'un filtre amorti, donc d'un mauvais filtre, vis-à-vis de l'affaiblissement qu'il introduit à sa fréquence d'accord.

Il apporte l'amortissement à l'ensemble du filtre et du réseau, il donne donc la robustesse nécessaire vis-à-vis des variations de Scc et de fréquence.

Hélas, comme dans toute introduction d'amortissement, les pertes générées dans la résistance Ra peuvent être importantes.

La figure 33 représente le schéma pris en compte pour la simulation et la figure 34 le résultat obtenu. On peut effectivement constater que le filtre introduit est médiocre, à la résonance l'impédance est légèrement supérieure à l'impédance du réseau sans filtre, mais que le but recherché est atteint, à savoir l'affaiblissement des anti-résonances.

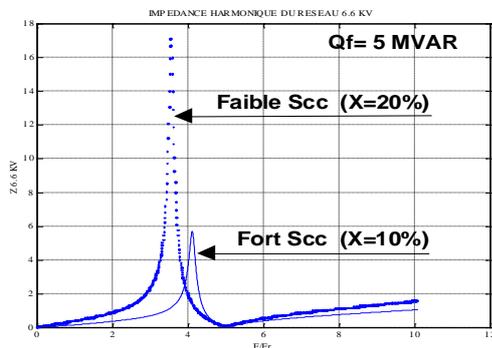


Figure 31

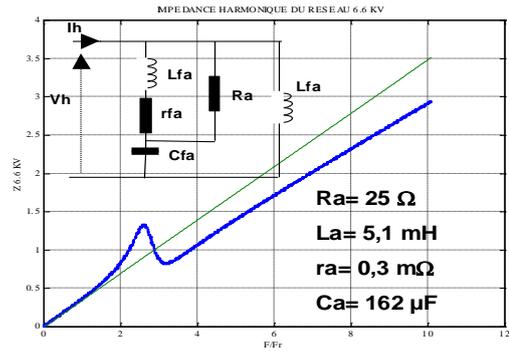


Figure 32

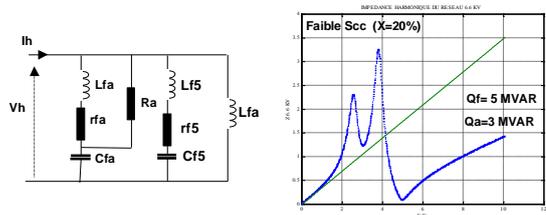


Figure 33

Figure 34

Les machines électriques de propulsion sont des machines à courant alternatif, asynchrones pour les faibles puissances et synchrones pour les fortes puissances. Les convertisseurs de puissance sont aujourd'hui majoritairement des convertisseurs indirects, en courant ou en tension, malgré cela il est évident que les réseaux de propulsion sont sollicités par des combinaisons de fréquence, réseau, machine. Il existe donc des interharmoniques de faibles valeurs qui sont fonction de la vitesse de la ligne d'arbre, c'est la raison pour laquelle il est impératif de limiter la valeur des anti-résonances. Vis-à-vis de ce phénomène, les cycloconvertisseurs, figure 3, posent un problème qui ne peut se résoudre que par des centrales de bord surdimensionnées ou des filtres complexes. Les alimentations indirectes en courant, figures 4 et 5 sont, du point de vue des harmoniques, infiniment moins pénalisantes : l'inductance entre les convertisseurs machine et réseau assure un découplage. Le dimensionnement de cette inductance est fondamental dans l'adéquation convertisseur / réseau. Pour les alimentations indirectes en tension, le découplage machine / réseau, est plus facile à réaliser, il peut se faire avec des masses beaucoup plus réduites.

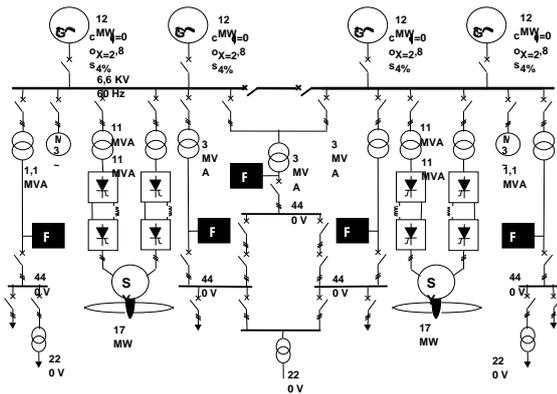


Figure 35

La figure 35 donne le schéma de principe simplifié de la distribution à bord d'un bateau. La génération d'énergie est en 6,6 kV, ce qui est relativement limite pour ce niveau de puissance : les courants de défaut commencent à être très importants et pénalisent la définition des différents matériels présents sur les jeux de barres et en particulier des disjoncteurs.

Sur cette installation il a été retenu d'introduire la totalité du filtrage au niveau basse tension. Le choix d'un filtrage au niveau 6,6 kV était tout aussi pertinent, les deux solutions sont pratiquées sans qu'une règle technico-économique sans faille puisse être dégagée. Cette solution rend possible la répartition des filtres au plus près des utilisateurs et autorise une disposition répartie dans le bateau. De plus la présence d'une adaptation des courants de défaut, réalisée par les différents transformateurs, permet un gain de dimensionnement non seulement des filtres mais également de l'appareillage associé. Malgré ces arguments favorables, le foisonnement des MVAR de filtre entraîne une augmentation globale de volume.

Cette disposition des filtres est favorable à la tenue d'un THD faible sur les jeux de barres basse tension.

Par contre, elle entraîne des distorsions plus importantes sur la moyenne tension, donc dans certaines limites, des contraintes supplémentaires sur les alternateurs.

Par souci de simplicité, il est toujours tenté de limiter le nombre de types de filtres. Dans le cas présent, deux types sont utilisés : un type pour les transformateurs de 3 MVA et un autre pour les transformateurs de 1,1 MVA. Ceci dit, il est bien évident que le calcul du filtrage est dans ce cas, complexe. Pour chaque filtre il convient de tenir compte des autres filtres, des filtres à trois rangs sur les petits transformateurs et quatre rangs sur les gros...

La valeur de THD qui suit, est généralement garantie :

Sur chaque départ 440 V avec l'ensemble des filtres (en fait n-1), de deux à quatre alternateurs en service, avec des variations de fréquence de +/- 5 %, en propulsion dodécaphasée, le THD est inférieur à 5%.

Dans ces conditions, le THD sur le réseau 6,6 kV sera inférieur à 15%.

4. Conclusions

En alternatif comme en continu, la mise en œuvre d'un réseau de bord commun aux servitudes et à la propulsion demande une expertise particulière, du fait de l'importance des variations de la puissance de court-circuit et de la fréquence. L'intérêt fondamental des réseaux alternatifs réside dans l'adaptation simple de la bonne tension pour la bonne puissance, alors que l'avantage d'une distribution continue réside dans un allègement des matériels et un échange facile de l'énergie entre différentes motorisations.

Il semble aujourd'hui totalement irréaliste d'imaginer la totalité d'un réseau de distribution en continu, avec des tensions possibles comprises entre 3kV et 5 kV. Ces tensions, satisfaisantes pour la propulsion, n'étant pas réalistes pour les servitudes de bord. Alors, pour associer les avantages des deux solutions, il est probable que le meilleur choix consiste à créer des réseaux continus par niveau de puissance ou de besoins.

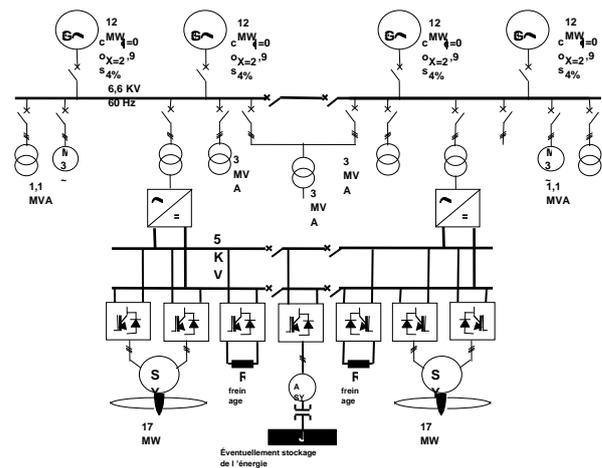


Figure 36

La figure 36 représente un schéma de principe possible de réseau continu, dédié propulsion. Pour les puissances indiquées, une tension de 5 kV est adaptée, elle suppose pour les différents convertisseurs des mises en série d'IGBT, soit directement, soit d'une manière plus rationnelle, du point de vue des contraintes (dV / dt)

sur les machines, avec une technique multiniveaux [5],[6]. Par ailleurs il est envisageable d'associer à chaque alimentation du réseau continu des dispositifs de filtrage actif, voire de compensation du facteur de puissance.

Pour d'autres besoins, d'autres réseaux peuvent être créés, avec les tensions les mieux adaptées, 3,5 kV ou 980 V...

Les avantages de cette solution mixte sont les suivants :

Réduction de la masse globale des transformateurs.

Réduction de la masse des alternateurs du fait d'un meilleur facteur de puissance.

Réduction significative des sources de pollution harmoniques.

Souplesse au niveau de l'isolation globale de l'installation, chaque réseau est indépendant du point de vue de son contrôle d'isolement.

Possibilité de disposer d'une énergie adaptée à un besoin impulsif.

Pour certaines servitudes qui ne nécessiteraient pas de secours particuliers, vitesses fixes par exemple, le réseau alternatif est toujours utilisable.

Ces trente dernières années ont vu un développement très important de l'électronique de puissance, aujourd'hui il n'existe que peu de secteurs de l'activité industrielle qui n'utilise pas la conversion statique de l'énergie. Ce développement se poursuit, associant les quatre pôles fondamentaux sur lesquels la conversion statique de l'énergie s'appuie, les composants de puissance, les topologies, les algorithmes et les bases matérielles destinées à les supporter.

Sans entrer dans des prévisions, toujours aléatoires, des techniques du futur, il doit être mentionné que plusieurs constructeurs et distributeurs travaillent sur la réduction de masse des transformateurs envisageant des solutions de conversion permettant le remplacement des composants actuels, à fréquence industrielle, par des ensembles convertisseurs / transformateurs en moyenne fréquence. Les conséquences sur les masses seront très importantes pour la propulsion navale d'une manière générale et pour les navires à vocation militaire en particulier.

Après plusieurs dizaines d'années de recherche universitaire sur les différentes topologies et la commutation douce, les industriels disposent aujourd'hui de bases solides pour envisager, les associations convertisseurs de puissance et transformateurs, qui conduiront à une nouvelle optimisation de la conversion d'énergie.

Le filtrage actif n'a pas été abordé dans cet article [3],[4], c'est pourtant une des techniques de base pour le futur, aussi bien pour les réseaux continus qu'alternatifs. Elle est, dans l'industrie, le fruit déjà mûr de plusieurs années de recherche sur les topologies et les algorithmes. Il est probable que dans les années qui viennent son intérêt technico-économique s'imposera aux constructeurs comme aux exploitants.

La maîtrise des réseaux est l'une des clés pour l'optimisation de toute solution de conversion. Les constructeurs sont conscients des enjeux du futur, renforcent leurs connaissances et leur expertise dans les techniques du présent, comme les filtres actifs, et préparent les solutions de demain.

Bibliographie.

[1] – EPE'95 – STABILITY ANALYSIS AND STABILISATION OF INDUCTION MOTOR DRIVE WITH INPUT FILTER – DELEMONTÉY, JAQUOT, IUNG, DE FERNEL, BAVARD.

[2] – RGE N°6/92 juin 1992 – LES REDRESSEURS DE FORTE PUISSANCE POUR LES APPLICATIONS STATIQUES DE L'ÉLECTRICITÉ -Jacques COURAULT, Christian BOZEC.

[3] – EP2 FORUM 98 - DISTRIBUTION NETWORK STABILISATION AND DEPOLLUTION – ACTIVE FILTER – Jacques COURAULT, Simon JONES, Olivier LAPIERRE.

[4] – EPE'99-LAUSANNE - A SINGLE PHASE 25 HZ FREQUENCY CONVERTER FOR THE NEW YORK METRO – Simon JONES, A MIRZAIAN, Pascal MANUELLE.

[5] – EPE'99 – INDUSTRIAL INTEREST OF MULTILEVEL CONVERTERS – Jacques COURAULT, Olivier LAPIERRE, Jean-Louis POULIQUEN.

[6] – IEEE Power Electronics Specialists Conference June / July 1992 – MULTI-LEVEL CONVERSION: HIGH VOLTAGE CHOPPERS AND VOLTAGE SOURCE INVERTER – T.A MEYNARD, H FOCH.

[7] – IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, Vol 33 N°5 September / October 1997 – WILL YOUR MOTOR INSULATION SURVIVE A NEW ADJUSTABLE-FREQUENCY DRIVE ? Sidney BELL, Jason SUNG.

[8] - IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRICAL INSULATION, June 1998 – USING CORONA INCEPTION VOLTAGE FOR MOTOR EVALUATION. Chris LANIER.

[9] – CREEBEL – BELFORT , Novembre 1999 – THE MULTILEVEL TOPOLOGY OF ALSTOM POWER CONVERSION FOR VOLTAGE SOURCE INVERTERS IN INDUSTRY – Jacques COURAULT

Etude d'un réseau de bord : problème corrigé

Marc ODDON

Professeur Agrégé à l'IUT1 de Grenoble
département Génie Electrique 1
151 rue de la papeterie
38400 St Martin d'Hères
Marc.Oddon@ujf-grenoble.fr

Résumé :

L'année 2005 a été celle du décollage de l'avion gros porteur A380 d'AIRBUS. Cet avion utilise de plus en plus de systèmes électriques et possède un réseau alternatif à fréquence variable. Dans ce problème corrigé sont abordés la génération électrique à partir des réacteurs, la protection des personnes et du matériel ainsi qu'une solution encore expérimentale de réduction des harmoniques de courants de ligne à l'aide d'un autotransformateur dodécaphasé.



Caractéristiques générales :

- Motorisation : 4 réacteurs Rolls-Royce
- Capacité : 555 passagers
- Rayon d'action : peut atteindre 14 800 km
- Charge utile : de l'ordre de 150 tonnes pour la version cargo

Principales innovations :

- Commandes de vol électriques
- Réseau alternatif à fréquence variable
- Réseau de secours totalement électrique
- Servocommandes à puissance électrique

1. Génération électrique principale

1.1 Présentation générale

La génération du réseau alternatif triphasé à fréquence variable est assurée par 4 VFG (Variable Frequency Generator) directement accouplées sur l'étage haute pression de chaque réacteur.

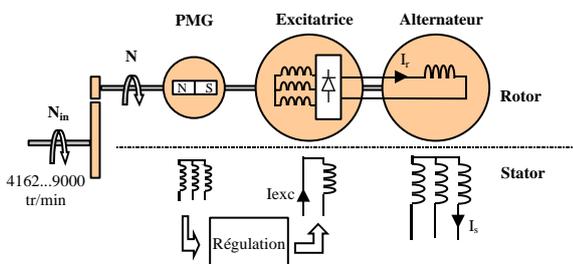


Figure 1 : Schéma de principe d'un alternateur VFG

Chaque VFG constitue une génératrice autonome à trois étages (génératrice à aimants permanents, excitatrice, alternateur), et alimente sa propre "barre bus

principale alternative" avec une fréquence de réseau comprise entre 370 et 800 Hz environ.

L'excitation de l'alternateur est commandée de façon à obtenir une tension efficace de sortie régulée de 115/200 V alternative. (Appelé POR Point of Regulation).

L'alternateur triphasé surprend par sa compacité pour une puissance apparente nominale relativement élevée. La norme impose qu'il puisse supporter une surcharge de 100% pendant 5 secondes.

- Dimensions: environ $\phi=15\text{cm}$ et long = 20 cm
- Couplage étoile, 370 Hz à $N=11100$ tr/min
- 2 paires de pôles
- Valeurs nominales : $S_{sn}=150$ kVA, $V_{sn}=115$ V
- Circuit magnétique : Tôles cobalt, pertes nominales 40W/kg à 0,7 Tesla pour un total de 60kg environ.
- Enroulements : Méplat cuivre, bobines à pas raccourcis 1/3, 96 encoches, 2 conducteurs par encoche, 4 voies d'enroulement.

- Densité de courant : 20A/mm² refroidissement par circulation d'huile.
- Pertes mécaniques nominales : environ 10kW.
- Rapport de multiplication de la fréquence de rotation réacteur N_{in} par rapport à la fréquence de rotation de l'arbre machine N :

$$k_m = \frac{N}{N_{in}} = 2,667$$

Les caractéristiques à vide (fig 2) et en court-circuit triphasé (fig 3) de l'alternateur sont réalisées à la fréquence minimale (370 Hz).

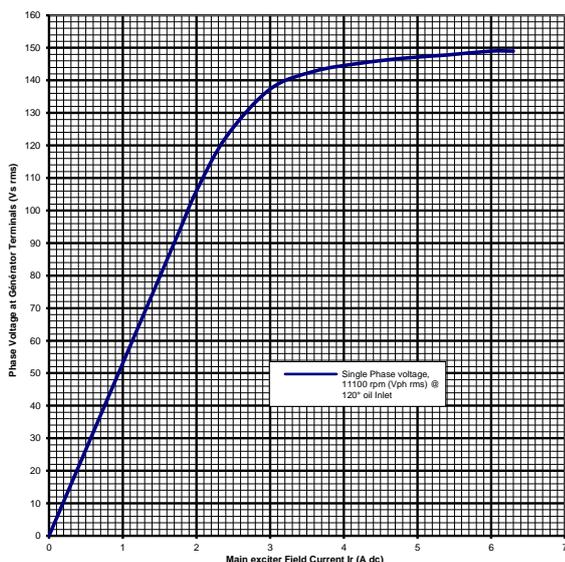


Figure 2 : Caractéristique à vide VFG

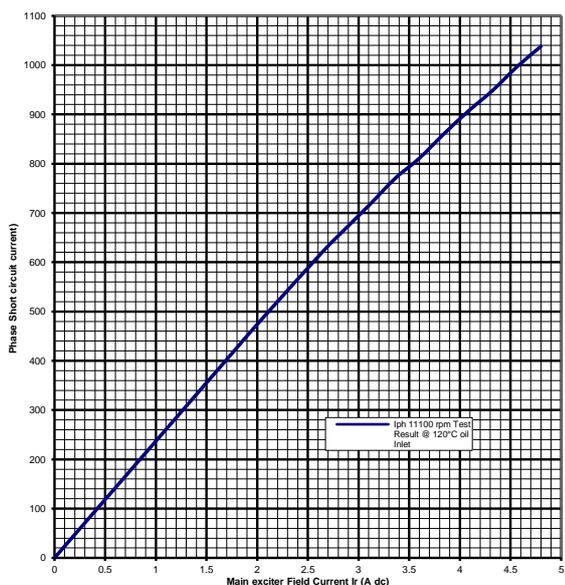


Figure 3 : Caractéristique en court-circuit VFG

1. Expliciter le terme de "génératrice 3 étages" en précisant le rôle de chaque sous-fonction. Quels sont les avantages d'un tel système par rapport à une excitation traditionnelle ?

- Etage1 : PMG : petit alternateur permettant de fournir l'énergie nécessaire à la génération de l'excitation.
- Etage 2 : Excitatrice évite la présence de balais et de bagues, génère I_r par redressement de la tension triphasée induite.
- Etage 3 : Alternateur de puissance : alimentation avion

Avantage : Pas de bague et système autonome.

2. Exprimer la fréquence de sortie réseau f en fonction de N_{in} , k_m et p .

$$f = \frac{p \cdot k_m \cdot N_{in}}{60}$$

3. En déduire le nombre de paire de pôles de l'alternateur et les excursions maximale, f_{max} , et minimale, f_{min} , de la fréquence réseau.

$$N_{min}=4162 \text{ tr/min} \Rightarrow f_{min} = 370 \text{ Hz}$$

$$N_{max}=9000 \text{ tr/min} \Rightarrow f_{max} = 800,1 \text{ Hz}$$

$$p = 2 \text{ correspond à } N=11100 \text{ tr/min et } f=370 \text{ Hz}$$

4. Justifier sur des critères mécaniques l'intérêt en aéronautique d'un fonctionnement à fréquence variable sur une telle gamme.

- Prise directe sur l'étage basse pression du réacteur : pas de régulation de vitesse complexe à réaliser, liaison mécanique plus simple.
- Gamme de fréquence supérieure à 50 Hz permettant des circuits magnétiques et transformateurs réduits : gain de poids.
- Nombre de paires de pôles des machines peu élevé avec grandes vitesses de rotation.

De plus, les longueurs de câble étant faibles l'effet d'atténuation capacitif est moins crucial.

5. Calculer l'intensité nominale par phase I_{sn} de alternateur.

$$I_{sn} = S_n / (3 \cdot V_{sn}) = 150 \cdot 10^3 / (3 \cdot 115) = 434,78 \text{ A}$$

6. Le flux émis par un pôle $\Phi(t)$ est de la forme $\phi(t) = \hat{\phi} \cdot \cos(p(\Omega t - \theta_0))$. Exprimer $e_c(t)$ la force électromotrice induite dans une spire d'induit en fonction de $\hat{\phi}$, f , p , t , et θ_0 .

$$e_c(t) = -\frac{d\Phi(t)}{dt} \text{ et } \Omega = \omega/p. \text{ On a donc :}$$

$$e_c(t) = 2\pi f \cdot \hat{\phi} \cdot \sin(2\pi f \cdot t - p\theta_0)$$

7. La force électromotrice induite pour une phase i est donnée par : $e_{si}(t) = k_b \cdot N_b \cdot e_c(t)$ où k_b représente un coefficient de bobinage et N_b le nombre de spires pour une phase. Quel est l'origine physique de ce coefficient de bobinage ?

La répartition des encoches pour un pôle conduit à une somme vectorielle des fem d'amplitude inférieure à leur somme algébrique. (Ici nous avons 8 encoches par pôle et par phase).

D'autre part on peut remarquer le bobinage à pas raccourci qui mériterait à lui seul une étude... (harmoniques 3...)

1.2 Etude d'un point de fonctionnement

L'alternateur est modélisé par le modèle de Behn-Eschenburg.

- La fréquence est variable de **370 Hz à 770 Hz**.
- $R_s = 0,4 \text{ m}\Omega$
- $E_{si} = \lambda \cdot \omega \cdot I_r$ (valeur efficace de la fem d'une phase)

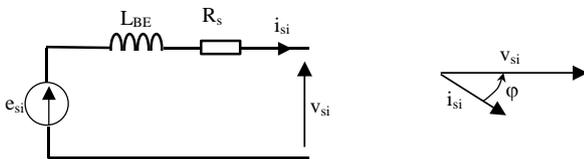


Figure 4 : modèle de Behn-Eschenburg

8. Calculer le coefficient λ pour différents points de la caractéristique à vide et préciser son unité.

E_{si} et I_r sont donnés (fig 2) à 11100 rpm donc pour 370 Hz

$$\lambda = \frac{E_{si}}{I_r \cdot 2\pi f} = \frac{E_{si}}{I_r \cdot 2\pi \cdot 370}$$

unité de λ : H ou $V \cdot A^{-1} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{s}$

$$\lambda = 22\text{mH} \text{ pour } I_r = 2\text{A}$$

9. Calculer la réactance synchrone $X_{BE} = L_{BE} \cdot \omega$ pour la partie linéaire et en déduire la valeur de l'inductance L_{BE} .

Si l'on se met à 370 Hz et $I_r = 2\text{A}$ par exemple on a :

$$Z_{BE370\text{Hz}} = \frac{E_{S370\text{Hz},2\text{A}}}{I_{SC370\text{Hz},2\text{A}}} = \frac{106}{474} = 223,63 \text{ m}\Omega$$

$$X_{BE} = \sqrt{Z_{BE}^2 - R_s^2} = 223,63 \text{ m}\Omega$$

$$L_{BE} = \frac{X_{BE}}{2\pi \cdot 370} = 96,19 \text{ }\mu\text{H}$$

10. A partir de la caractéristique $E_{si} = f(I_r)$ à 370 Hz (fig 2), tracer rapidement l'allure de $E_{si} = f(I_r)$ pour un essai à vide à 770Hz .

Open Circuit Characteristics VFG

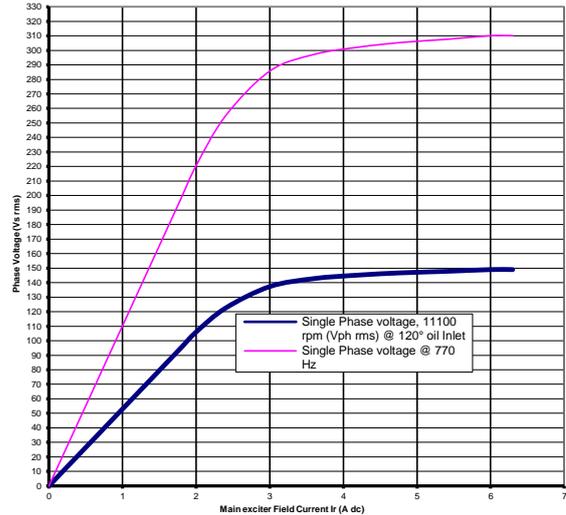


Figure 5 : caractéristiques à vide 370 et 770 Hz

11. Comment aurait été modifiée la caractéristique $I_{sc} = f(I_r)$ si l'essai en court circuit avait été réalisé à 770Hz. Pourquoi ?

La caractéristique aurait été pratiquement identique car la fem et l'impédance de Behn-Eschenburg sont fonction de la fréquence.

$$I_{sc} = E_s / Z_{BE} \approx E_s / X_{BE} = \lambda \cdot \omega \cdot I_r / L_{BE} \cdot \omega = \lambda \cdot I_r / L_{BE} \text{ non fonction de } f.$$

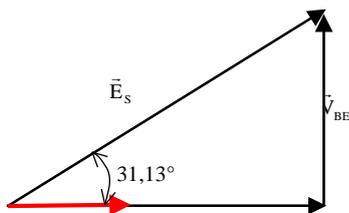
12. Calculer les valeurs efficaces (V_s , I_s) du point de fonctionnement à $f = 500 \text{ Hz}$ et $I_r = 2\text{A}$ correspondant à une charge R_{ch} pure de $0,5 \text{ }\Omega$. Représenter le diagramme de Behn-Eschenburg en respectant les ordres de grandeur des amplitudes et des angles. Ecrire sur le diagramme le nom de chaque vecteur et angle.

$$f = 500 \text{ Hz et } I_r = 2\text{A: impliquent } E_s = 143,24 \text{ V}$$

$$I_s = \frac{E_s}{\sqrt{(R_s + R_{ch})^2 + (L_{BE} \cdot \omega)^2}} \text{ On a donc}$$

$$I_s = \frac{143,24}{\sqrt{(4 \cdot 10^{-4} + 0,5)^2 + (96,19 \cdot 10^{-6} \cdot 2\pi \cdot 500)^2}} = 245 \text{ A}$$

$$V_s = R_{ch} \cdot I_s = 0,5 \cdot 245 = 122,5 \text{ V}$$



- $R_s I_s = 0,1 \text{ V}$
négligeable
- $V_{BE} = L_{BE} \cdot \omega \cdot I_s$
 $= 74 \text{ V}$

13. Dans quel sens évoluent les grandeurs φ , I_s et V_s si f augmente ? Pourquoi ?

Si f augmente alors I_s et V_s augmentent et φ reste inchangé.

Dans la partie linéaire :

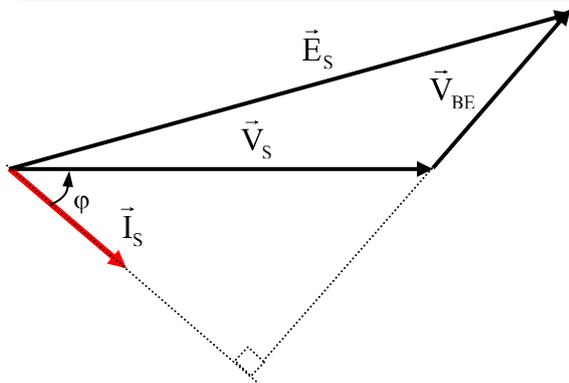
$$I_s = \frac{\lambda \cdot I_r \cdot \omega}{\sqrt{R_{ch}^2 + L_{BE}^2 \cdot \omega^2}} = \frac{\lambda \cdot I_r}{\sqrt{\frac{R_{ch}^2}{\omega^2} + L_{BE}^2}}$$

et V_s liée à I_s .

L'excitation principale I_r de l'alternateur est maintenue constante. La charge utile alimentée par l'alternateur peut être assimilée à une impédance : $R_{ch} = 0,5 \Omega$ et $L_{ch} = 150 \mu\text{H}$.

$$\underline{Z}_{ch} = R_{ch} + jL_{ch}\omega = Z_{ch} \cdot e^{j\varphi}$$

14. Tracer l'allure du diagramme de Behn-Eschenburg pour un facteur de puissance de 0,75 (charge inductive).



$$\underline{V}_{si} = (R_{ch} + jL_{ch}\omega) \cdot \underline{I}_{si} = Z_{ch} \cdot e^{j\varphi} \cdot \underline{I}_{si}$$

$$\underline{E}_{si} = (R_{si} + jL_{BE}\omega) \cdot \underline{I}_{si} + \underline{V}_{si} = jL_{BE} \cdot \omega \cdot \underline{I}_{si} + \underline{V}_{si}$$

15. Exprimer de façon littérale la valeur efficace V_{si} en fonction de λ , ω , R_{ch} , L_{ch} , L_{BE} et I_r .

$$I_{si} = \frac{E_{si}}{Z_{eq}} \text{ avec } E_{si} = \lambda \cdot \omega \cdot I_r \text{ et } V_{si} = Z_{ch} \cdot I_{si}$$

$$\underline{Z}_{eq} = j \cdot L_{BE} \omega + R_{ch} + j \cdot L_{ch} \omega \quad \text{et donc}$$

$$Z_{eq} = \sqrt{R_{ch}^2 + (L_{ch} + L_{BE})^2 \omega^2}$$

$$V_{si} = \frac{\lambda \cdot \omega \cdot I_r \cdot Z_{ch}}{\sqrt{R_{ch}^2 + (L_{ch} + L_{BE})^2 \omega^2}}$$

$$V_{si} = \sqrt{\frac{R_{ch}^2 + (L_{ch}\omega)^2}{R_{ch}^2 + (L_{ch} + L_{BE})^2 \omega^2}} \cdot \lambda \cdot \omega \cdot I_r$$

Application numérique

f en Hz	370	770
I_r en A	2	2
I_s en A	135	165
V_s en V	82	145

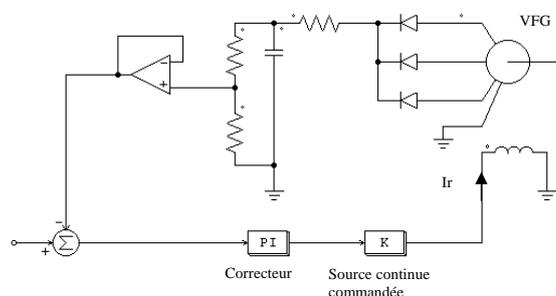
16. Conclure sur la nécessité d'une régulation de V_s et sur l'effet de la variation de f sur le $\cos\varphi$ de la charge.

V_s est donc fonction de la fréquence de rotation de l'alternateur et du régime de charge ($\cos\varphi$ et valeur de I_s). On peut remarquer que pour la charge fixe donnée:

Pour $f=770 \text{ Hz}$: $\varphi = 55,43^\circ$ et $\cos\varphi = 0,567$

Pour $f=370 \text{ Hz}$: $\varphi = 34,89^\circ$ et $\cos\varphi = 0,82$

17. Proposer une solution pour la boucle de régulation en précisant la méthode utilisée pour la mesure de V_s .



On peut mesurer l'image de la valeur efficace de V_s en prenant la valeur moyenne redressée de la tension de sortie. Une isolation galvanique n'est pas, dans ce cas, absolument nécessaire.

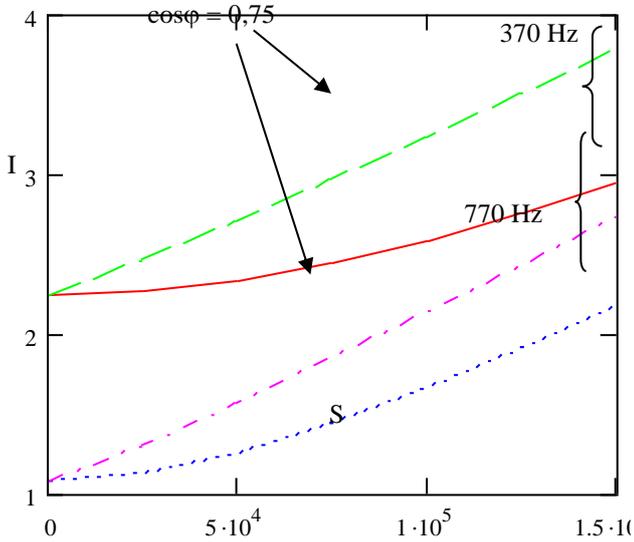
18. On suppose maintenant que V_{si} est parfaitement régulée à 115 V efficaces quel que soit le régime de charge. On désire tracer la caractéristique au point de régulation, de I_r en fonction de la puissance apparente $S_s = 3 \cdot V_s \cdot I_s$ demandée pour deux facteurs de puissance de la charge (1 et 0,75). Exprimer littéralement I_r en fonction de S_s , φ , λ , ω , L_{BE} , et V_s .

En écrivant la conservation des puissances :

$$S^2 = P^2 + Q^2 = 3E_s \cdot I_s \text{ avec } I_s = S_s / 3 \cdot V_s \text{ et par suite :}$$

$$I_r = \frac{\sqrt{[S_s \cdot \cos \varphi]^2 + \left[S_s \cdot \sin \varphi + 3 \cdot L_{BE} \cdot \omega \left(\frac{S_s}{3 \cdot V_s} \right)^2 \right]^2}}{3 \cdot \lambda \cdot \omega \cdot \frac{S_s}{3 \cdot V_s}}$$

On peut voir sur ce diagramme la plage de réglage



nécessaire pour I_r en fonction de la vitesse de rotation et du type de charge.

2. Distribution

Le réseau de bord dispose de moyens de protection des matériels et des personnes :

- liaison alternateur VFG-AC BUS : en temps réel, les courants sur chaque phase sont mesurés à la sortie de l'alternateur et à l'arrivée sur le bus AC. Un défaut amène la désexcitation de l'alternateur puis son isolement; le bus AC étant alimenté par l'un des 3 autres alternateurs.
- départs à partir du bus AC : disjoncteurs.

La structure métallique de l'avion est utilisée comme conducteur neutre.

L'installation comprend 3 câbles par phase mis en faisceau indépendant. (Donc 3 câbles par faisceau)



19. Quel est le régime de neutre de notre réseau de bord ? Quel est l'appareillage assurant la protection des personnes ?

La structure métallique de l'avion étant utilisée comme conducteur neutre, nous sommes en régime : TNC. (Faibles longueurs relative des câbles)

Dispositif de protection : disjoncteur magnéto-thermique. (effet magnétique)

20. Dans ce cas, quelle contrainte a-t-on entre l'appareillage de protection et le courant de défaut?

Lors d'un défaut d'isolement phase/masses métalliques, le courant de défaut est un courant de court circuit phase neutre.

(Pouvoir de coupure > I défaut)

Le dispositif de protection contre les court circuit doit alors ouvrir le circuit dans un temps maximum spécifié par les normes.

21. Quelle est l'origine physique des coefficients correcteurs à appliquer sur l'intensité admissible d'un câble ?

La densité de courant admissible est proportionnelle à la surface d'échange thermique. Les coefficients de rayonnement et de convection dépendent du milieu dans lequel est placé le câble. (Mode de pose et condition d'environnement: pose en faisceau, altitude, température ambiante...)

La température maximale atteinte ne doit pas dépasser celle que peut supporter l'isolant.

Il faut vérifier que la chute de tension de tension entre le cœur électrique et les équipements ne dépasse pas les 2,5V fixés par la norme en régime permanent.

22. Pour quelles raisons principales (mécanique, électrique, thermique ...) n'utilise t-on pas un seul câble par phase?

mécaniques	Souplesse câble et connections plus aisées. Répartition du poids dans le fuselage.
électriques	Effet de peau à 800 Hz de 2,9 mm à 20°C dans l'aluminium, rendant nécessaire les câbles multi-brins : complexité de réalisation.
Thermique	Surface d'échange thermique plus importante, meilleurs rayonnement et convection.
Sécurité	Continuité du service en cas de panne, accident ou dysfonctionnement.

3. Harmoniques et facteur de puissance

Une fréquence de réseau de bord variable implique la nécessité de passer par un étage continu pour différents équipements. Les servocommandes à puissance électrique comportent en général une pompe hydraulique entraînée par un moteur synchrone auto-piloté alimenté via un étage continu.

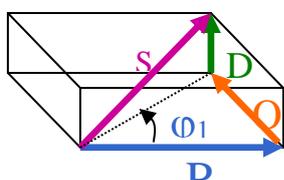
Les solutions possibles de conversion alternatif-continu doivent donc tendre à réduire les harmoniques de courant réinjectés sur le réseau et proposer une faible ondulation de la tension de sortie redressée.

3.1 Problèmes liés aux harmoniques

23. En présence d'harmoniques de courant, exprimer (en le justifiant) les puissances P , Q et D en fonction de V , et des I_k , φ_k concernés.

$$P = \langle p(t) \rangle = V \cdot I_1 \cdot \cos(\varphi_1) \quad Q = V \cdot I_1 \cdot \sin(\varphi_1)$$

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



$$D = V \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}$$

24. Pour un même service, défini par des puissances active et réactives constantes, exprimer l'accroissement relatif des pertes joules en ligne ($\alpha_j = \frac{\Delta P_j}{P_{jl}}$) dû à la présence de puissance déformante, en fonction de P , Q et D . En déduire l'expression de α_j en fonction du taux de distorsion en courant THD_i . (remarque : pertes joules totales en ligne $P_{jT} = P_{jl} + \Delta P_j$)

On a : $P_{jT} = P_{jl} + \Delta P_j$ et les pertes joules en ligne

$P_{jT} = r \cdot I^2$ ou r partie réelle de l'impédance de la ligne.

$$P_{jT} = r \cdot \sum_{k=1}^{\infty} I_k^2 = r \cdot I_1^2 + r \cdot \sum_{k=2}^{\infty} I_k^2$$

$$\alpha_j = \frac{\Delta P_j}{P_{jl}} = \frac{D^2}{P^2 + Q^2} = \frac{V^2 \cdot \sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}{V^2 \cdot I_1^2} = THD_i^2$$

25. Conclure sur les effets d'une importante pollution harmonique du courant sur les réseaux et sur les dispositifs associés.

Les grandeurs harmoniques circulant sur un réseau peuvent principalement :

- Causer des échauffements supplémentaires dans les conducteurs, inductances, condensateurs etc... (pertes joules, diélectriques et magnétiques)
- Générer des vibrations et des bruits (domaine de fréquence acoustique)
- Perturber les dispositifs électroniques (applications dites « courants faibles »)

La valeur efficace du courant est augmentée pour une même puissance active transportée.

Le coefficient d'accroissement des pertes est proportionnel au THD_i^2 .

Ce qui conduit à un mauvais rendement, des surcharges, échauffements, et déclenchement des protections.

3.2 Correction du facteur de puissance

Cet autotransformateur est une alternative au classique transformateur Dyd permettant par symétrie, de supprimer certains rangs d'harmoniques de courant.

La nouveauté réside dans le gain de poids réalisable.

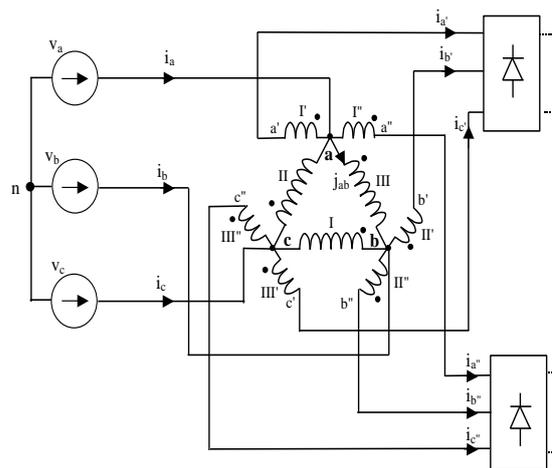


Figure 6 : Autotransformateur redresseur

Caractéristiques de l'autotransformateur :

- Le circuit magnétique est composé de trois colonnes A, B, et C identiques reliés par 2 culasses (cf figure C.2).
- Chaque colonne comporte 3 enroulements : 1 enroulement primaire (I, II, III) et deux enroulements secondaires (I', II', III' et I'', II'', III'). Le sens des bobinages est donné par le point indiquant les bornes homologues.
- Les bobines parallèles sur la figure 6 sont disposées sur une même colonne. Exemple : les bobines secondaires I' et I'' sont sur la même colonne que la bobine primaire I.
- N_s est le nombre de spires secondaire ($N_s = N_s' = N_s''$) et N_p le nombre de spires primaire.

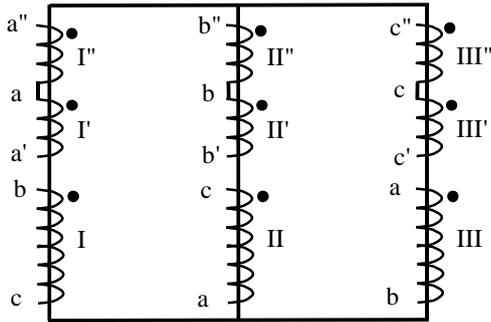
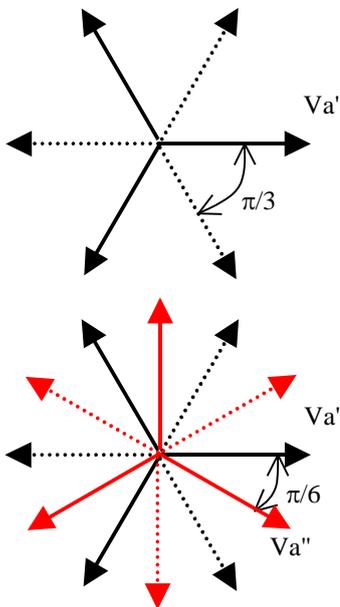


Figure 7 : circuit magnétique et bobinages

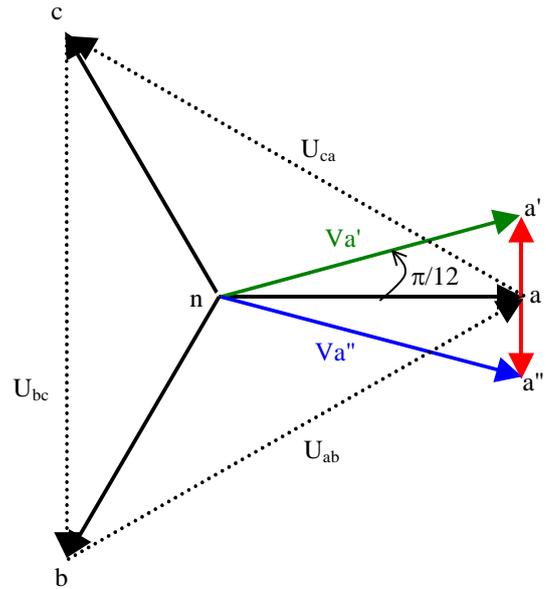
26. On désire disposer d'un système de tensions de façon à pouvoir réaliser un redressement à diode dodécaphasé. Montrer que le déphasage entre $\vec{V}_{a''}$ et $\vec{V}_{a'}$ doit être de $\frac{\pi}{6}$.



Il faut donc que les tensions $V_{a,b,c''}$ alimentant le deuxième PD3 soient complémentaires, ce qui impose un déphasage entre $\vec{V}_{a''}$ et $\vec{V}_{a'}$ de $\frac{\pi}{6}$.

Les 12 tensions équivalentes sont déphasées de $2\pi/12 = \pi/6$.

27. Donner un diagramme de Fresnel des tensions simples ($\vec{V}_a, \vec{V}_b, \vec{V}_c$) et composées ($\vec{U}_{ab}, \vec{U}_{bc}, \vec{U}_{ca}$) primaire. Construire les tensions simples secondaire $\vec{V}_{a'}$ et $\vec{V}_{a''}$ de façon à respecter la condition de la question précédente.



$$\begin{aligned} V_a &= 115 \text{ V} \\ U_{a'a} &= 30,8 \text{ V} \\ V_{a'} &= 119,1 \text{ V} \end{aligned}$$

28. Calculer le rapport de transformation par colonne m_c de ce transformateur. En déduire la valeur du rapport de transformation externe du transformateur $m = \frac{V_{a'}}{V_a}$.

$$m_c = \frac{U_{a'a}}{U_{bc}} = \frac{\text{tg}\left(\frac{\pi}{12}\right)}{\sqrt{3}}$$

$$m_c = 0,1547$$

$$m = \frac{V_{a'}}{V_a} = \sqrt{1 + \left(\text{tg}\frac{\pi}{12}\right)^2}$$

m étant le module du rapport de transformation $m = 1,035$

29. Ecrire la relation que l'on a entre les courants au nœud a.

$$i_a = i_{a'} + i_{a''} + j_{ab} - j_{ca}$$

30. Exprimer le courant j_{ab} en fonction de m_c et des courants de ligne secondaires.

$$j_{ab} = -m_c \cdot i_{c'} + m_c \cdot i_{c''}$$

31. Exprimer le courant de ligne i_a en fonction des courants de ligne secondaires et du rapport de transformation par colonne m_c .

$$\begin{aligned} i_a &= i_{a'} + i_{a''} - m_c \cdot i_{c'} + m_c \cdot i_{c''} - (-m_c \cdot i_{b'} + m_c \cdot i_{b''}) \\ i_a &= i_{a'} + i_{a''} + m_c \cdot (i_{b'} - i_{b''} - i_{c'} + i_{c''}) \end{aligned}$$

Si l'on suppose que les courants de ligne secondaires sont parfaitement équilibrés pour tous les rangs d'harmoniques présents :

- $i_1'(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \hat{I}_k \cdot \sin(k(\omega t + \alpha_1'))$
- $i_1''(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \hat{I}_k \cdot \sin(k(\omega t + \alpha_1''))$

On peut démontrer la formule générale suivante pour $i_a(t)$:

$$i_a(t) = 2 \sum_{k=1}^{\infty} \hat{I}_k \cdot \sin(k\omega t) \left[\cos\left(k \frac{\pi}{12}\right) + 2 \cdot m_c \cdot \sin\left(k \frac{\pi}{12}\right) \cdot \sin\left(k \frac{2\pi}{3}\right) \right]$$

32. A partir des mesures faites sur le courant de ligne secondaire i_1' ou i_1'' (redresseur triphasé sur charge capacitive), calculer les valeurs efficaces des harmoniques de courant primaire I_{ak} de $i_a(t)$ et remplir le tableau.

Rang d'harmonique k		1	5	7	11	13	17	19
Courant efficace secondaire mesuré I_k pour i_1' ou i_1''	I_k (A)	33	28	24	13,5	8,6	1,2	0,4
Courant efficace en ligne primaire I_{ak}	I_{ak} (A)	68,3	0	0	28	17,8	0	0

33. Pour ce cas de fonctionnement précis, calculer la puissance apparente primaire et la puissance apparente secondaire de l'autotransformateur.

Courant secondaire efficace en ligne :

$$I_1' = \sqrt{\sum_{k=1}^{19} I_{1'k}^2} = 52,03 \text{ A}$$

Courant primaire efficace en ligne :

$$I_a = \sqrt{\sum_{k=1}^{19} I_{ak}^2} = 75,94 \text{ A}$$

- puissance apparente secondaire (équivalente) :

$$S_{\text{secondaireéquiv}} = 6 \cdot V_{1'} \cdot I_1' = 6 \cdot m \cdot V_a \cdot I_1' = 6 \cdot 119 \cdot 52,03 = 37,17 \text{ kVA}$$

- puissance apparente secondaire des seuls enroulement ' et '' :

$$S_{\text{secondait}} = 6 \cdot V_{11'} \cdot I_1' = 6 \cdot m_c \cdot V_a \cdot \sqrt{3} \cdot I_1' = 6 \cdot 30,82 \cdot 52,03 = 9,6 \text{ kVA}$$

- puissance apparente primaire :

$$S_{\text{primaire}} = 3 \cdot V_a \cdot I_a = 3 \cdot 115 \cdot 75,94 = 26,2 \text{ kVA}$$

34. Conclure sur l'intérêt de ce type d'autotransformateur par rapport au classique transformateur Dyd .

Cet autotransformateur permet de réaliser un "filtrage" harmonique même si la fréquence primaire varie.

On peut remarquer que la valeur efficace des courants en ligne au primaire est réduite et que seuls les harmoniques de rang 11 et 13 subsistent.

Le filtrage double pont Dyd demande un transformateur coûteux à double enroulement secondaire dimensionné pour 37,17 kVA au lieu de 9,6 kVA.

3.3 Conclusion

Le choix de filtres passifs pour éviter la propagation d'harmoniques de courant sur la ligne n'est pas aisé en utilisation à fréquence variable.

On préfère utiliser pour les plus faibles puissances une topologie de convertisseurs à absorption sinusoïdale monophasé.



Prévision de l'énergie éolienne en vue de son intégration au Dispatching tunisien

Souad CHEBBI* - Chokri BOUCHOUCHA - Salem LEFI** - Mohamed ANNABI***

Ecole Supérieure des Sciences et Technique de Tunis 5 Avenue Taha Hussein Tunis 1008 Tunisie

chebbisouad@yahoo.fr

**Société Tunisienne de l'Electricité et du Gaz Bouchoucha_chokri05@yahoo.fr, Salem_lefi@yahoo.fr,

RESUME : La production de l'énergie électrique exploitant des énergies renouvelables n'est pas facile à intégrer dans le Dispatching où la production vient principalement des centrales électriques conventionnelles. Pour assurer un équilibre entre la production et la consommation de l'énergie électrique, le centre de pilotage (Dispatching) du réseau haute tension (HT) doit réagir efficacement et rapidement aux diverses demandes et perturbations. Afin de faire face à ces problèmes d'intégration, nous proposons dans cet article une stratégie qui tient compte des règles et consignes d'exploitation pour satisfaire, en temps réel, l'équilibre production - consommation. La prévision de la courbe de charge éolienne est nécessaire afin de faciliter l'emplacement des autres moyens de production conventionnelle. Cette prévision constitue aussi, un support d'exploitation et un outil d'aide à la décision pour la bonne gestion du système électrique.

MOTS CLES : Intégration, énergie éolienne, Dispatching, Réseau haute tension, prévision.

1- Introduction

La nature non ou difficilement stockable de l'énergie électrique rend difficile la gestion en temps réel de l'équilibre production - consommation. L'adaptation de la production à la consommation est réalisée automatiquement par la modulation des énergies conventionnelles par action sur l'énergie primaire des turbines entraînant les alternateurs. Un déséquilibre entre la production et la consommation se traduit par une fluctuation de fréquence qui sera compensée instantanément par l'énergie cinétique des masses tournantes des groupes des générateurs et des moteurs.

La gestion du système électrique en temps réel est basée sur un ensemble des règles et consignes qui définissent la marge d'exploitation et les limites d'utilisation des ouvrages. Cet ensemble prend le nom de support d'exploitation. La prévision de la courbe de charge nationale qui facilite l'emplacement des moyens de production est un élément important de cet ensemble et un outil d'aide à la décision pour la gestion efficace du système électrique.

L'énergie renouvelable en particulier l'éolienne est à caractère aléatoire puisqu'elle est subordonnée aux conditions météorologiques. Nous pouvons ainsi considérer ce type d'énergie comme une perturbation dynamique dépendant des conditions météorologiques. La stratégie de gestion de l'équilibre production - consommation doit tenir compte de cette perturbation et sa dynamique est supposée lente vis à vis des variables et paramètres du système électrique.

Pour tenir compte de l'insertion des énergies éoliennes dans le système électrique assurant l'alimentation des consommateurs d'électricité, il est nécessaire de

chercher une méthode de prévision efficace de cette énergie pour faciliter la gestion du système et diminuer l'erreur de la prévision de la courbe de charge nationale et les surcoûts associés.

Le couplage d'une centrale de production électrique sur le réseau HT permet d'éviter les défauts spécifiques du réseau MT comme le problème de manque de tension (déséquilibre important de tension), les chutes de tension, les courants asymétriques, ... et par conséquent une meilleure rentabilité de la centrale.

La prévision efficace de la courbe de production éolienne permet d'améliorer la gestion du système électrique et d'optimiser les ressources d'énergie conventionnelles.

La prévision de la courbe de charge nationale, le suivi de la disponibilité des centres de production, la disponibilité des lignes de transport, ... sont déterminés par le Dispatching National (DN).

2- Stratégie d'intégration des centrales éoliennes

Afin d'étudier l'intégration des Centrales éoliennes au DN, nous analysons tout d'abord la constitution du système de production et de consommation d'énergie électrique puis la prévision de la consommation et enfin le placement des moyens de production.

2-1- Constitution d'un système de production et de consommation d'énergie électrique

Un système de production et de consommation d'énergie électrique (**Fig.1**) est constitué par trois sous - systèmes : production, transport et consommation. Le transport constitue en fait un dispositif d'adaptation des conditions de production aux conditions de consommation.

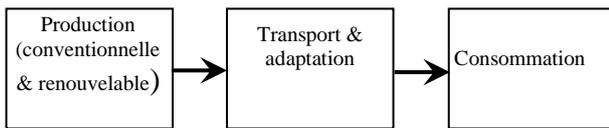


Fig.1- Système de production et de consommation d'énergie électrique

En tenant compte des centrales de production non conventionnelles, un système électrique est schématiquement constitué par une partie puissance et une partie de pilotage (Fig.2).

- La partie puissance est constituée par :
 - les centrales de production conventionnelles, les centrales de production non conventionnelles (dans notre cas, il s'agit de centrales éoliennes conditionnées par le gisement éolien), le réseau national de transport d'électricité constitué par les lignes HT et les postes HT/MT, le réseau des pays voisins, la consommation ;
- La partie de pilotage qui est caractérisée par :
 - la prévision de la courbe de charge, les mesures de variables d'état [concernant le gisement éolien, la production des centrales éoliennes, la production conventionnelle, le réseau (lignes et postes), la consommation], la commande [concernant le téléajustage des centrales de production conventionnelle, les disjoncteurs de commande du réseau (lignes et postes), les disjoncteurs d'interconnexions avec les réseaux voisins, les disjoncteurs de délestage des consommateurs (abonnés)].

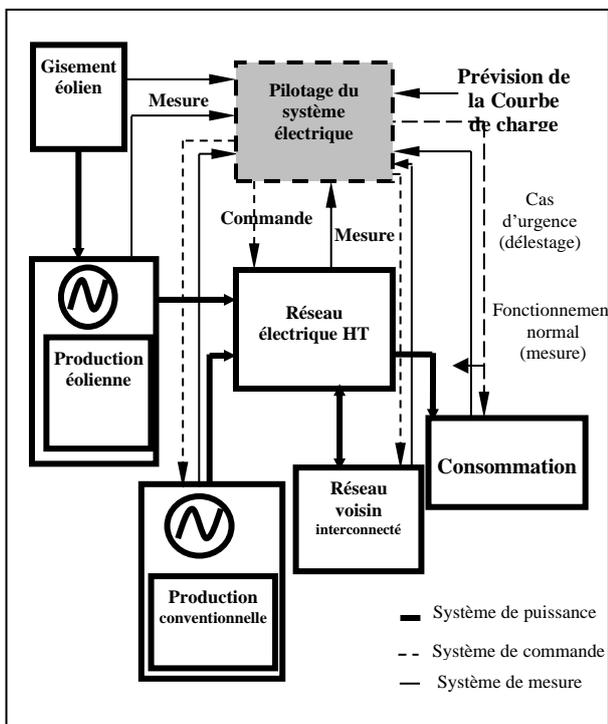


Fig.2- Logigramme de fonctionnement en temps réel du réseau HT

2-2- Prévision de la courbe de charge

La prévision de la courbe de charge nationale facilitant l'emplacement des moyens de production est un élément important de cet ensemble et un outil d'aide à la décision pour la gestion efficace du système électrique.

La prévision journalière de la courbe de charge nationale (courbe de consommation prévisionnelle) reflète l'état de la demande des abonnés, elle dépend :

- o de la nature des activités nécessitant une consommation électrique selon leur répartition spatio-temporelle (Fig.3 courbe a),
- o des aléas modulant la courbe de charge (Fig.3 courbes b) :
 - les effets climatiques : la température est le plus important aléa climatique qui affecte sensiblement la demande, cette dernière est sensible particulièrement aux hausses de température. Les variations se font ressentir tant au niveau de la consommation qu'à sa forme,
 - les effets de la nébulosité : la réaction de la demande d'énergie face à ce facteur est rapide, elle s'explique par une sollicitation instantanée et importante de l'éclairage,
 - les fêtes et les jours fériés : Ce type de jour apporte des modifications sur le mode de vie ce qui explique le changement de la structure de la courbe de charge,
 - les autres effets : la courbe de consommation varie suivant d'autres facteurs sociaux tels qu'une simple émission télévisée, un match de football, un événement important qui peuvent engendrer un appel supplémentaire de puissance.

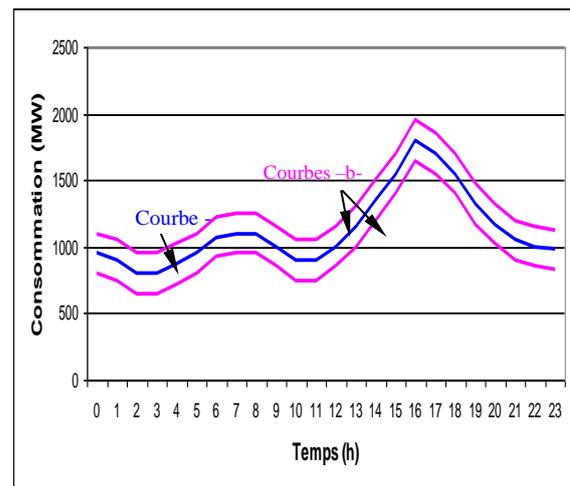


Fig.3- Courbe de charge prévisionnelle



2-3- Placement des moyens de production conventionnelle

Le placement des moyens de production doit se réaliser en fonction de la demande et de sa répartition spatio-temporelle. Ce placement tient compte du potentiel disponible de production et assure une répartition des moyens de production selon des contraintes :

- de qualité de service : continuité de l'approvisionnement, stabilité de la fréquence et de la tension
- de coût

Les moyens de production peuvent être classés en

- centrales conventionnelles de production de base (turbines à vapeur, turbines à cycle combiné) ; ces centrales sont essentiellement caractérisées d'une part par un temps de démarrage très lent (de l'ordre de quelques heures) et un coût de démarrage élevé et d'autre part par une rentabilité en régime permanent
- centrales conventionnelles de production de pointe (turbine à gaz, turbine hydraulique) ; ces centrales sont essentiellement caractérisées par un temps de démarrage rapide (de l'ordre de quelques minutes) et une rentabilité en régime permanent moindre que celle des autres centrales
- les centrales de production non conventionnelles : (dans notre cas, il s'agit de centrales éoliennes conditionnées par le gisement éolien).

Le placement des moyens de production est fondé principalement sur la production dite de base (PB) telles que les centrales conventionnelles ou à cycle combiné. Ces moyens sont commandés en fonction de la courbe de charge prévisionnelle par une modulation de leur production de base (ΔPB). La production de pointe (PP) fournie par les turbines à combustion est démarrée en pointe de charge et arrêtée selon le besoin (Fig.4). L'ensemble PB et PP constitue la production totale (PT) qui doit être disponible à tout instant.

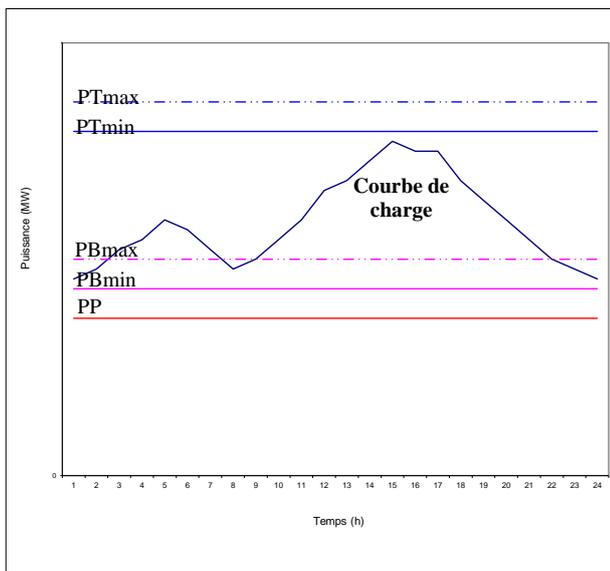


Fig.4- Courbe de charge réelle et placement des moyens de production

L'imprécision dans la prévision de la charge, les aléas de production et la défaillance des composants des lignes de raccordement nécessitent une réserve de capacité de puissance lors de l'exploitation du réseau. Cette réserve qui apporte un surcoût de production constitue une marge de sécurité pour la gestion du système électrique. Les interconnexions avec les pays voisins constituent une source d'énergie supplémentaire en cas d'aléas en partant du principe de solidarité et en cas d'échange économique.

2-4- Prévision de la courbe de charge en tenant compte des centrales éoliennes

Les énergies éoliennes constituent une perturbation dynamique dépendant des conditions météorologiques. La stratégie de gestion de l'équilibre production - consommation doit tenir compte de cette perturbation et de sa dynamique supposée être lente vis à vis des variables et des paramètres du système électrique.

Par conséquent, nous considérons que *la puissance produite par les centrales éoliennes constitue une charge négativement consommée* qui doit être prise en compte dans la prévision du diagramme de charge pour les courts et moyens termes.

En tenant compte de l'insertion des énergies éoliennes, la prévision de la demande se résume ainsi dans :

- la prévision de la courbe de charge de la consommation : on définit pour cette courbe (Fig.5 courbe a) une marge de fluctuation de la prévision MP1
- la prévision de la courbe de production des éoliennes : on définit aussi une marge de fluctuation de la prévision MP2 (Fig.5 courbe b)
- l'établissement de la courbe de production conventionnelle (Fig.6) doit tenir compte de la réserve chaude (réserve primaire et secondaire nécessaire à l'exploitation afin de combler les perturbations) ; cette dernière doit tenir compte aussi de :
 - la fluctuation MP1 et la production nominale de toutes les centrales éoliennes PNE sans prévision
 - les fluctuations MP1 et MP2 ; dans ce cas, la réserve chaude est moindre si nous disposons de la prévision de la production éolienne, et c'est l'objectif à atteindre
- le placement des moyens de production suivant la courbe prévisionnelle toute en assurant un dispatching économique en sécurité.

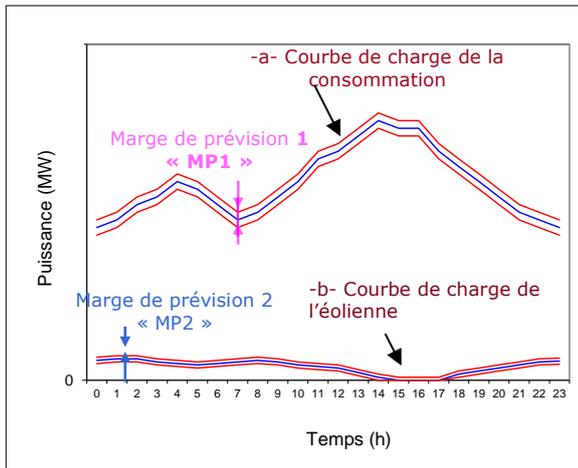


Fig.5- Prédiction des courbes de charge

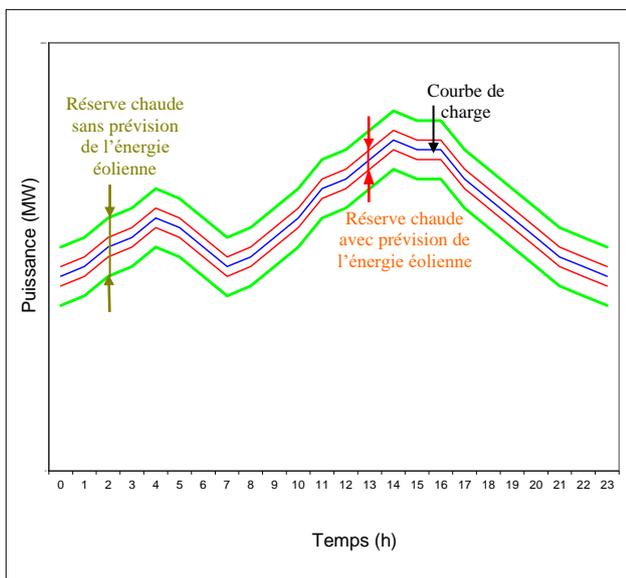


Fig.6- Réserve chaude

L'augmentation de la marge totale de prévision ($MP3=MP1+MP2$) touche directement la sécurité du système électrique. Par conséquent, une réserve plus élevée est obligatoire. De ce fait, une planification de la réserve fondée sur les statistiques réelles des perturbations d'exploitation sera optimale. La prévision de la demande ou de la courbe de production éolienne établie avec les algorithmes des techniques modernes basés sur l'évaluation statistique et l'analyse probabiliste des perturbations aléatoires dans les systèmes électriques réels minimise la marge d'erreur de prévision et ainsi le surcoût de production associée.

La considération de la production éolienne comme étant consommation négative est motivée par le fait qu'elle est similaire à la consommation ; elle dépend des facteurs météorologiques et il est difficile au dispatching de la contrôler.

3- Prédiction de la courbe de charge éolienne

La prévision de la courbe de charge éolienne illustrant la répartition de la production de la centrale sur un horizon temporel donné (24 heures par exemple) doit tenir compte du caractère aléatoire des paramètres météorologiques en particulier le vent. Le schéma de la figure 7 décrit le diagramme fonctionnel de prévision de la courbe de charge éolienne et le support nécessaire pour la détermination du modèle de vent. Ce diagramme comporte essentiellement deux blocs: un bloc B1 pour la prévision de la courbe de charge éolienne et un autre B2 pour la détermination du modèle de vent.

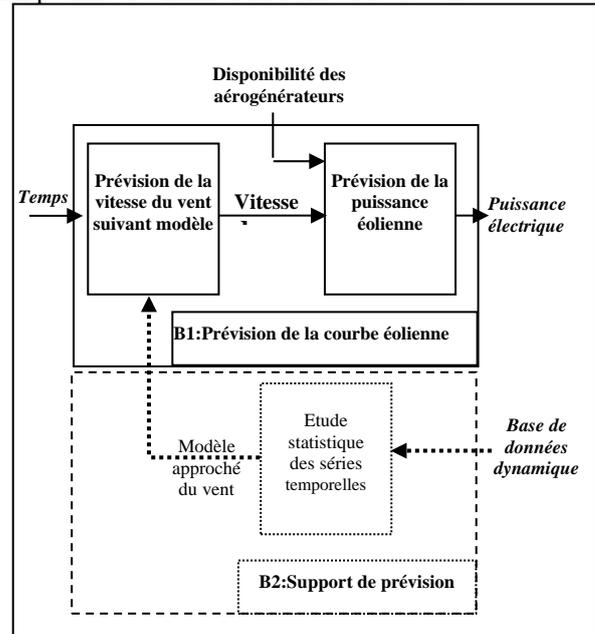


Fig.7- Diagramme fonctionnel de prévision de la courbe de charge éolienne

La prévision de la vitesse du vent est conditionnée par (Fig.8) :

- La prédiction Météo à long, moyen et court termes. Cette prédiction exploite divers outils et méthodes dont l'acquisition et les traitements des images satellitaires, l'exploitation des données de réseau régionaux (particulièrement méditerranéen), les données provenant des stations météorologiques nationales,...
- L'historique du vent
- Les mesures locales à la Centrale éolienne

L'élaboration d'un algorithme de traitement de ces données est nécessaire pour la détermination de la vitesse du vent pour un horizon donné ; les résultats de prévision obtenus seront par la suite confrontés aux mesures réelles en temps opportun et agiront sur le modèle prévisionnel.

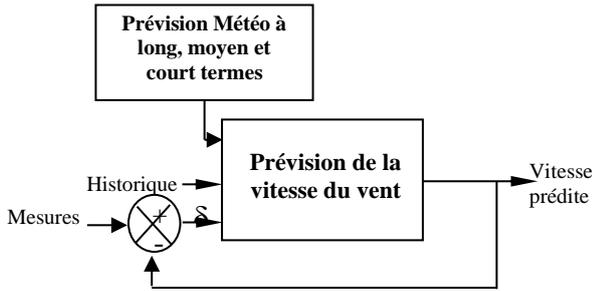


Fig.8- Schéma bloc de l'asservissement de la prévision de la vitesse du vent

4- Prévision de la vitesse du vent de la région de Sidi Daoud :

La prévision de la courbe de charge d'une ferme éolienne nécessite la prévision des facteurs météorologiques de cette région, la dépendance de ces facteurs d'une région donnée de ceux des régions voisines et du comportement météorologique à grande échelle. De ce fait, un asservissement des prévisions aux paramètres météorologiques de la météo s'impose.

4.1- Fréquence du vent:

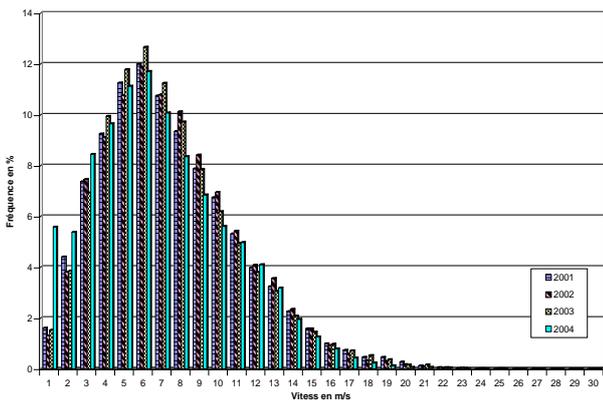


Fig.9- Courbe de distribution des vitesses du vent des années 2001-2004

A partir de la distribution de la vitesse, on peut conclure ce qui suit :

- la vitesse la plus dominante pour les années 2001 à 2004 dans la région de Sidi Daoud est 6m/s.
- les distributions de la vitesse du vent de la région de Sidi Daoud pour ces années sont très proches.

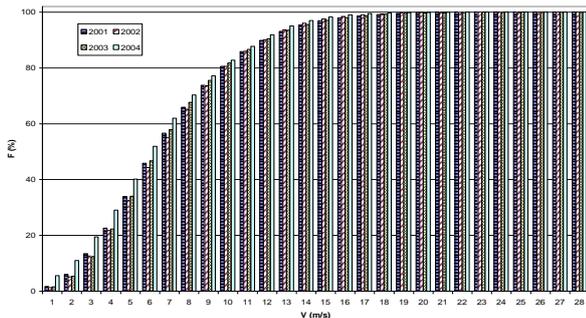


Fig.10- Caractéristique de répartition des vitesses du vent pour les années 2001-2004

La caractéristique de répartition de la vitesse du vent (Fig.10) montre que pendant 80% du temps des années 2001-2004 le vent souffle avec une vitesse supérieure à 4m/s. Donc l'implantation d'une ferme éolienne à la région de Sidi Daoud peut être rentable.

On rappelle que la fonction de répartition $F(v)$ est la probabilité que la vitesse du vent soit inférieure à une certaine valeur v et que la densité de probabilité $f(v)$ est la dérivée de $F(v)$:



Parmi les distributions utilisées dans les modèles statistiques, la distribution de Weibull. Cette distribution est la plus utilisée dans ce domaine, elle s'est avérée appropriée pour la description des propriétés statistiques du vent.

La fonction de répartition Weibull à deux paramètres c et k s'écrit :



En utilisant la relation précédente, il résulte la fonction de la densité de probabilité $f(v)$:



Avec :

- * k paramètre de forme caractérise la répartition du vent
- * c paramètre d'échelle caractérise la vitesse du vent (plus c est élevé plus l'énergie se trouve dans les hautes vitesses)
- * V vitesse du vent « instantanée » (moyennée sur 10 minutes).

A partir du logiciel Wasp.8, nous avons déterminé les paramètres de la distribution de Weibull c et k pour les quatre années 2001-2004 (Tab.2).

Tab.2- Paramètres de weibull [2]

	Année 2001	Année 2002	Année 2003	Année 2004
Paramètre c (m/s)	7.4	7.5	7.3	7.2
Paramètre k	1.91	2.04	1.86	1.83

4.2- Dynamique du vent:

La vitesse du vent a été mesurée avec une période d'échantillonnage de 15mn. La figure suivante (fig.11) illustre la fréquence de variation de la vitesse de vent Δv entre deux instants successifs $T-1$ et T .

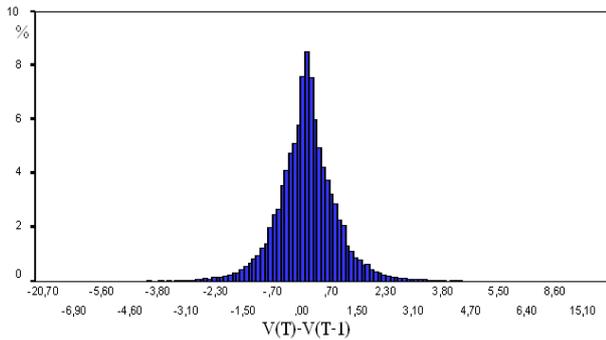


Fig.11 Fréquence de $[V(T)-V(T-1)]$

La fréquence $[V(T)-V(T-1)]$ de variation de vitesse du vent à l'instant T et (T-1) montre que cette variation est lente : la vitesse du vent suit un régime lentement variable. L'analyse des résultats précédents montre que la prévision de la vitesse du vent de la région de Sidi Daoud est possible.

4.3- Prévision à long et moyen termes de la vitesse du vent :

Ce type de prévision est utile pour estimer l'énergie éolienne qu'on peut avoir avant une année ou un mois (Long terme) et avant une semaine ou une journée (moyen terme). Cette prévision permet de rendre ce type d'énergie malléable et flexible pour notre besoin énergétique dans le même ordre que les énergies conventionnelles.

La vitesse moyenne annuelle et mensuelle du vent constitue une information pertinente pour la prévision à long et moyen termes.

Les vitesses moyennes annuelles sont identiques. C'est ainsi, qu'on peut estimer la vitesse annuelle à partir de la vitesse moyenne par :

Vitesse de l'année n = La moyenne de la vitesse des années précédentes.

Tandis que la prévision de la vitesse moyenne mensuelle est donnée par l'intervalle suivant :

$$V_{moy}(X(n+1)) \in [\text{min}(V_{moy}(X(i))), \text{max}(V_{moy}(X(i)))]$$

Avec : V_{moy} : vitesse moyenne mensuelle,
X : le mois,
n : nombre des années considérées,
i : l'année.

4.4- Prévision à court terme de la vitesse du vent :

Cette prévision intéresse le Dispatching National pour faciliter la gestion en temps réel de l'équilibre production-consommation et pour l'emplacement des moyens de production.

Dans ce but, nous avons utilisé deux méthodes de prévision :

- ✓ Méthode directe utilisant l'historique du vent mesuré et une fonction de correction ;
- ✓ Méthode de la moyenne mobile utilisant la moyenne des historiques des vitesses mesurées et une fonction de correction.

Dans ce papier, on se limite à présenter la première méthode. La prévision à l'état t dépend de l'historique, nous exprimons dans ces conditions la vitesse en fonction de celle de l'état (t-1) en tenant compte d'une fonction de correction (pas de variation) $k(t)$ dépendant de la variation de la vitesse entre les instants t et (t-1).

Du fait que notre système n'est exploitable qu'à partir d'une vitesse minimale du vent (4m/s dans notre cas), nous exprimons $v(t+1)$ par :

$$V_p(t+1) = 0 \quad \text{si} \quad V_r(t) < 4$$

$$V_p(t+1) = [V_r(t) + k(t)] \quad \text{pour} \quad V_r(t) > 4$$

Avec : V_p : vitesse du vent prévue,
 V_r : vitesse réalisée,
 $K(t)$: fonction de correction,
t : l'instant t,
t+1 : l'instant t+1.

On a appliqué cette méthode pour la prévision de la vitesse du vent pour deux valeurs de $K(t)$ différentes ($K(t)=0$: Fig.12, $K(t)=[V_r(t)-V_r(t-1)]/N$: Fig.13) sur le Mat 1 à 30 m d'altitude, pour la deuxième journée du mois de janvier 2001 (Er étant l'erreur de prévision).

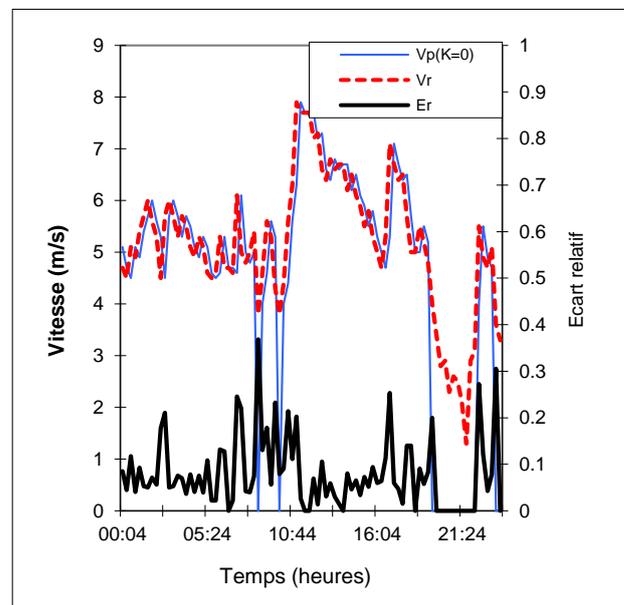


Fig.12 Prévision de la vitesse du vent par la méthode où $K=0$

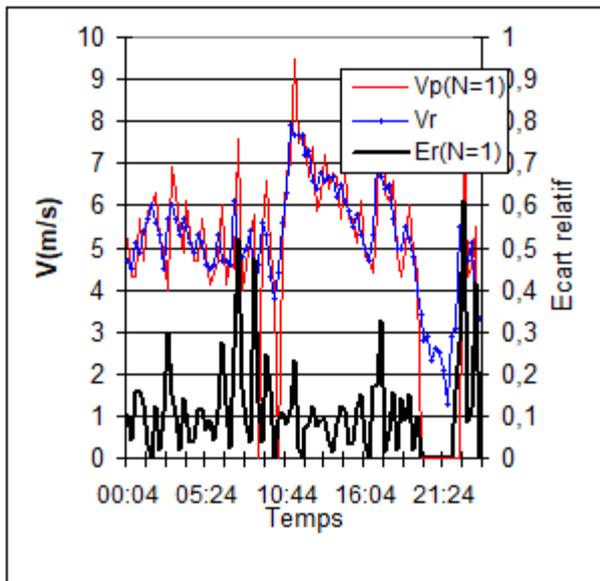


Fig.13 Prévision de la vitesse du vent par la méthode où $K \neq 0$

Références

[1] Bernard Multon¹, Olivier Gergaud¹, Hamid Ben Ahmed¹, Xavier Roboam², Stéphan Astier², Brayima Dakyo³, Cristian Nichita³

État de l'art dans les aérogénérateurs électriques
Club CRIN électronique de puissance énergies renouvelables
¹LÉSIR Antenne de Bretagne de l'ENS Cachan, ²LEEI ENSEIHT Toulouse, ³GREAH Université du Havre

[2] Atlas éolien européen, WASP.

[3] Aref Ouelbani

Analyse de l'exploitation énergétique de la centrale éolienne de Sidi Daoud FST-Juin 2003-DESS : Système de communication et réseau

École supérieure technique des sciences de la Tunisie

[4] Dispatching national, Tunisie

Rapport d'exploitation journalier

[5] Anis Cherif, Nizar Sahli Juin 2004

Projet de fin d'étude : Prévision de la demande de l'énergie électrique à court terme par utilisation des Réseaux de Neurones Artificiels. Ecole nationale d'ingénieurs de Tunis,

[6] Mr. Mohamed Chtourou

Support Cours DEA, année universitaire 2003-2004, Ecole nationale d'ingénieurs de Sfax.

[7] Mr. Taïeb Kallala Mars 2002

Support Cours DESS, Ecole nationale d'ingénieurs de Tunis.

[8] E.N.Dialynas N.D. Hatzargyrioy N.C. Koskolos E.S. Karapidakis

National Technical University of Athens (Grèce)

Effet d'une forte pénétration d'énergie éolienne sur la fiabilité et la sécurité des réseaux électriques, CIGRE, Août 1998.

[9] Jytte Kaad Jensen * Aksel Gruelund Sorensel (ELTRA) (Danemark)

Fermes éoliennes de grande taille, CIGRE, Août 1998.

[10] S. Lefi, C. Bouchoucha, M. Annabi,

Integration wind power in the Tunisian National Dispatching Center. EACWE 4, Prague 11-15 July, 2005.

[11] K. Karoui, J. Dubois, M. Stubbe

Dynamic behaviour of industrial Power system with cogeneration, CEPSE 2000, Manilla Philippine, octobre 2000.

5- Conclusion

Dans les réseaux électriques intégrant des centrales éoliennes, la production de ces dernières constitue une perturbation dynamique dépendant des conditions météorologiques. La stratégie de gestion de l'équilibre production - consommation doit tenir compte de cette perturbation et de sa dynamique. L'énergie éolienne sera considérée comme une charge négativement consommée qui doit être prise en compte dans la prévision du diagramme de charge dans les courts et moyens termes. La prévision de la courbe de charge éolienne appuyée sur des évaluations statistiques et basée sur un algorithme de réseau de neurone peut minimiser les perturbations provoquées par l'insertion de l'énergie électrique d'origine éolienne dans le réseau électrique. Cette prévision nous aidera aussi dans le placement judicieux des moyens de production. De cette manière, l'intégration d'une ferme éolienne dans le Dispatching National devient possible.

[12] V.A.Kiladze, V.F. Timchenko, V.A. Tsvetkov

Une planification opérationnelle de la réserve de puissance minimale nécessaire fondée sur les statistiques réelles des perturbations d'exploitation, CIGRE, Août 1996.

[13] E.O'Dwyer, H.Mangan, C.Kelleher, A.Cooke

L'énergie éolienne. CIGRE, 26 Août 1990.

[14] Harri Vihriälä

Control of Variable Speed Wind Turbines October 29, 2002.

[15] Dispatching national, Tunisie

Rapport d'exploitation journalier

[16] Maxime R. Dubois, Faculty ITS, Group Electrical Power Processing

Review of Electromechanical Conversion in Wind Turbines.

Final Literature review April 2000

[17] Bernard Multon et Jean-Marie Peter,

Revue 3E.I n°6 juin 1996, pp.59-64. Le stockage de l'énergie électrique moyens et applications, Synthèse de la Journée d'Études SEE Clubs 13 et 11, du 1^{er} février 1996 au CNAM Paris.

BIOGRAPHIES :

*Soud Chebbi : 1981 DEA d'électrotechnique étude de la stabilité statique d'un réseau mono-machine ; 1983 thèse de doctorat étude de la stabilité transitoire des grands réseaux électriques. enseignante chercheur à l'ESTT, membre de l'équipe de recherche ATMAT spécialisée en énergétique.

**Chokri bouchoucha Ingénieur d'études de réseaux travaillant à la Société Tunisienne d'électricité et de Gaz, membre de la Comité Maghrébine d'Electricité COMELEC I prépare une thèse sur les systèmes sécurisants des réseaux électriques au sein de l'équipe ATMAT dirigée par le professeur Mohamed Annabi.

**Salem Lefi diplômé ingénieur en Génie Electrique Automatique ; DESS:Réseau d'énergie électrique, octobre 2003 ; prépare un mastère au sein de l'équipe ATMAT dirigée par le professeur Mohamed Annabi.



Chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque

Commande MPPT

Jérôme FADAT

Enseignant Chercheur en Electrotechnique

ESIEE-Amiens (Ecole Supérieure d'Ingénieurs en Electrotechnique et Electronique) (www.esiee-amiens.fr)

14 Quai de la Somme – BP 100 – 80 082 Amiens CEDEX 2

fadat@esiee-amiens.fr

Résumé : Cet article présente plusieurs exemples permettant la commande analogique ou numérique d'un convertisseur statique afin d'optimiser le transfert de puissance disponible à la sortie de générateurs photovoltaïques. Le logiciel Labview est également utilisé pour sauvegarder les différentes mesures. Ce travail a été réalisé en partie avec des élèves ingénieurs de l'ESIEE-Amiens lors de projets.

1. Introduction

La production d'énergie des $\frac{3}{4}$ de la consommation mondiale est assurée essentiellement par les énergies non renouvelables (*fossiles* : pétrole, charbon, gaz naturel, et *nucléaire* : fission).

Celles-ci seront donc à terme épuisées et dès aujourd'hui des stratégies énergétiques sont mises en œuvre, visant à augmenter l'efficacité des systèmes électriques, à éviter le gaspillage mais également à se tourner vers les énergies renouvelables (hydraulique, vent, photovoltaïque, houle, biomasse, géothermie, marée). De nombreux pays se sont lancés récemment dans des programmes de développement des générateurs éolien et photovoltaïque. Les enjeux environnementaux, les aides financières mais aussi la maîtrise technique, ont permis l'essor de ces énergies renouvelables.

Cet article aborde la mise en œuvre des modules photovoltaïques (PV) et plus particulièrement les commandes appliquées à un convertisseur statique DC/DC reliant les panneaux à une charge. Ces commandes analogique ou numérique jouent un rôle important dans les chaînes de conversion d'énergie photovoltaïque car elles maximisent la puissance de sortie de ces générateurs, pour différentes valeurs de la charge, de l'éclairement ou de la température. Ces commandes dites MPPT (Maximum Power Point Tracking) permettent donc de se placer au point unique de la courbe courant/tension ($I_{PV}-V_{PV}$) où le panneau fonctionne avec son maximum de rendement.

Les références [1] et [2] décrivent les techniques de fabrication des cellules photovoltaïques ainsi que tous les aspects économiques liés aux coûts de fabrication et d'utilisation.

Un rappel sur le fonctionnement des générateurs photovoltaïques est réalisé au deuxième paragraphe. Une description des commandes utilisées apparaît au troisième paragraphe. Le suivant montre les simulations effectuées avec le logiciel Matlab-Simulink. Les cinquième et sixième paragraphes décrivent la partie expérimentale et les résultats obtenus.

2. La chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque

2.1. De la jonction PN à la cellule photovoltaïque

Le matériau le plus utilisé pour la réalisation des cellules photovoltaïques, est le silicium sous ses différentes formes (monocristallin, polycristallin ou amorphe). La particularité de ce matériau est que lorsque la jonction PN est éclairée, un courant proportionnel à l'éclairement apparaît [3]. C'est ce principe qui est utilisé pour réaliser un générateur photovoltaïque lui-même constitué de plusieurs cellules associées en série ou en parallèle. Les deux modules photovoltaïques à notre disposition utilisent la technologie du silicium cristallin massif qui est actuellement la plus répandue. Cette technologie permet d'atteindre des rendements de l'ordre de 13,5 %. Néanmoins, la filière à film mince et plus particulièrement la technologie CIGS (diséléniure de cuivre, d'indium et de gallium) par coévaporation semble être une solution d'avenir qui combine le meilleur compromis de haut rendement, de bonne stabilité, de flexibilité de substrat et de faible coût potentiel [2].



La figure 1 montre les caractéristiques d'une jonction PN sous différents éclairagements.

La convention choisie est la convention récepteur. Lorsque les signes du courant et de la tension sont identiques, la puissance est positive signifiant le comportement résistif de cette jonction. Dans le quadrant QI, la valeur de cette résistance est très faible car la tension directe aux bornes de la jonction varie peu à partir d'un seuil dont la valeur dépend du matériau (0,1 à 0,3 V pour Ge ; 0,5 à 0,8 V pour Si). Ce fonctionnement correspond tout simplement à un interrupteur semi-conducteur fermé.

Pour un éclairage nul et dans le quadrant Q III, cette résistance est, à l'opposé, très élevée (interrupteur ouvert). En présence d'un flux lumineux, un courant inverse de polarisation apparaît faisant donc varier fortement cette résistance, c'est la photorésistance.

Dans le quadrant Q IV apparaît un courant non nul pour $E > E_0$, signifiant que le système fonctionne en générateur (la puissance est négative). Le courant de court-circuit (ou photocourant), I_{CC} (pour $V = 0$ V), est donc proportionnel à l'éclairage et la tension à vide (pour $I = 0$ A) est celle de la diode en polarisation directe. C'est donc ce seul quadrant qui correspond à la cellule photovoltaïque à jonction PN et qui va nous permettre de caractériser les générateurs photovoltaïques.

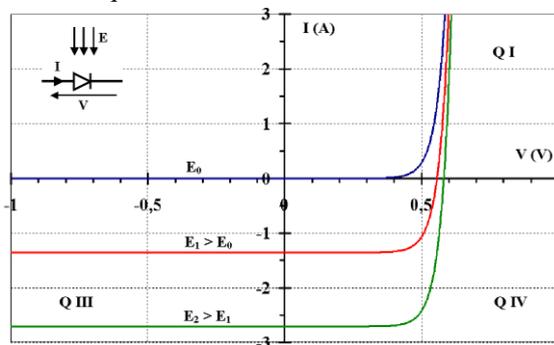


Figure 1 : Caractéristiques d'une jonction PN sous différents éclairagements ($E_0 < E_1 < E_2$)

2.2. Caractéristiques des générateurs photovoltaïques

Le modèle choisi dans l'étude est celui à 1 diode de la figure 2. Il se déduit de la caractéristique de la jonction PN où le courant de saturation inverse est compté positif. Ainsi le courant de sortie, sans tenir compte des résistances, devient égal à la différence entre le courant de court-circuit (proportionnel à l'éclairage et symbolisé par une source de courant) et le courant de la jonction PN (symbolisé par la diode). Dans ce nouveau repère, le courant et la tension obtenus sont positifs et la convention est maintenant la convention générateur.

Afin de compléter le modèle équivalent, le schéma proposé tient compte d'effets résistifs représentés par :

- une résistance série $R_{série}$ équivalente aux diverses résistances de contacts et de connexions,
- une résistance shunt R_{shunt} en parallèle sur le générateur de courant qui caractérise les divers courants de fuite dus à la diode et aux effets de bords de la jonction.

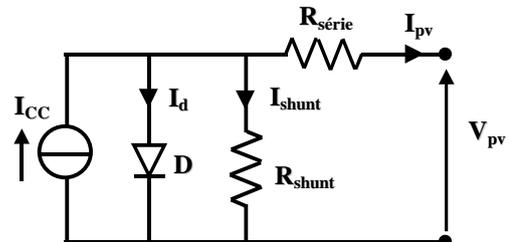


Figure 2 : Modèle à 1 diode d'un générateur photovoltaïque

Enfin pour compléter cette présentation, un générateur photovoltaïque est constitué de plusieurs modules lesquels regroupent des cellules photovoltaïques assemblées en série (n_s) et/ou parallèle (n_p). Ces modules sont vendus avec des diodes de protection pour éviter un courant négatif et pour limiter la tension inverse à une valeur acceptable en situation de déséquilibre.

Les figures suivantes (3 et 4) montrent les courbes I_{PV} - V_{PV} et P_{PV} - V_{PV} , du module photovoltaïque VLX53 (36 cellules en série) utilisé pour les tests. Ses caractéristiques sont données dans l'annexe 1.

Ces courbes ont été obtenues par le logiciel Simulink (paragraphe 4). Le module a été simulé par les équations établies en annexe 2, sans tenir compte des diodes de protection. L'équation reliant les différents courants du modèle équivalent ([4] et [5]), est :

$$I_{PV} = I_{CC} - I_d - I_{shunt} \quad (1)$$

I_{CC} dépend du niveau d'éclairage et de la température. I_d est lié au courant de saturation, I_s et à la tension aux bornes de la diode, V_d . I_{shunt} peut être calculé connaissant V_d .

La courbe en pointillés montre l'évolution du point à puissance maximale.

La puissance et le courant I_{CC} sont proportionnels à l'éclairage. Il est aussi possible de constater que la valeur de la tension, V_{pv} , du point optimal varie peu quel que soit l'éclairage. C'est pour cette raison qu'il existe une technique de commande du convertisseur statique qui contrôle la valeur de cette tension pour fonctionner au point optimal.

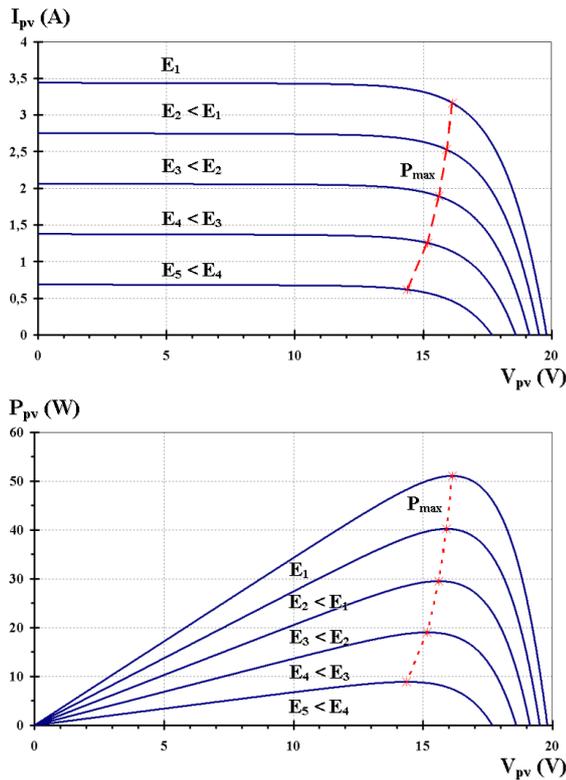


Figure 3 : Caractéristiques d'un générateur photovoltaïque $I_{pv} = f(V_{pv})$ et $P_{pv} = f(V_{pv})$, E variable ($E_1 = 1, E_2 = 0,8, E_3 = 0,6, E_4 = 0,4, E_5 = 0,2 \text{ kW/m}^2$) et pour 50°C

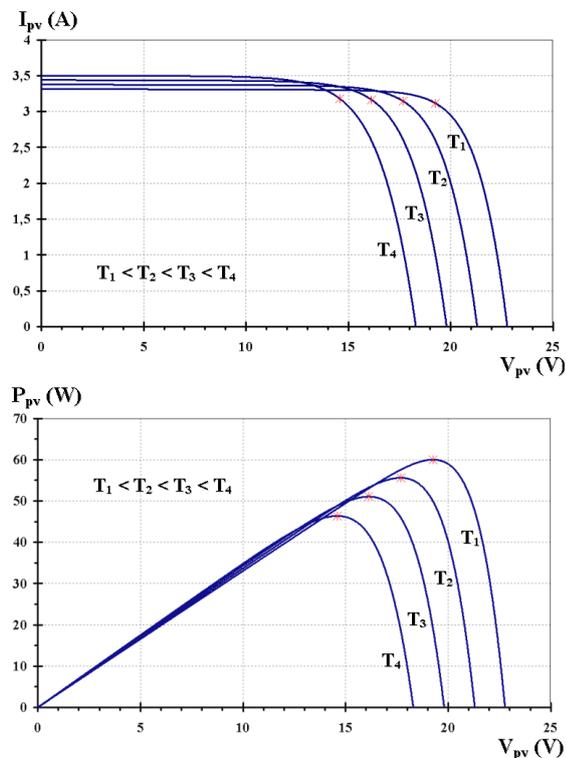


Figure 4 : Caractéristiques d'un générateur photovoltaïque $I_{pv} = f(V_{pv})$ et $P_{pv} = f(V_{pv})$, température variable ($T_1 = 0^\circ\text{C}, T_2 = 25^\circ\text{C}, T_3 = 50^\circ\text{C}, T_4 = 75^\circ\text{C}$) et pour 1 kW/m^2

De la figure 4, il faut retenir que l'augmentation de la température conduit à diminuer la puissance maximale que peut fournir le générateur.

2.3. Association des générateurs photovoltaïques avec un convertisseur statique

L'objectif de ce paragraphe est de montrer l'intérêt d'utiliser un convertisseur statique dans la chaîne de conversion photovoltaïque. Les deux types de structures sont les convertisseurs DC/DC ou les onduleurs. Dans cette étude, le choix s'est porté sur un hacheur série (ou abaisseur ou buck converter). En effet, l'une des utilisations envisagées est de pouvoir charger une batterie de 9 V pour un modèle réduit d'une voiture réalisée par Solaris, association des élèves ingénieurs de l'ESIEE-Amiens (la tension crête maximale : $V_{pvc} = 17,2 \text{ V}$).

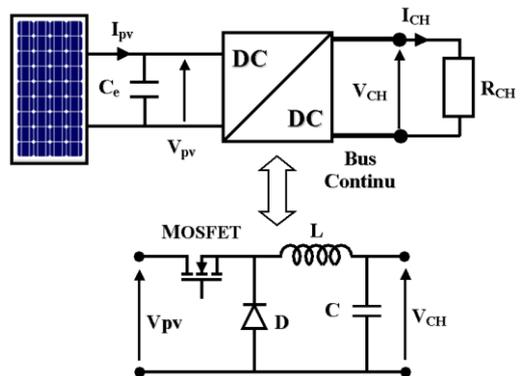


Figure 5 : Chaîne de conversion comprenant le hacheur série

Les figures suivantes (figure 6) présentent le résultat de simulations effectuées sur deux modules (VLX53) en parallèle, pour une température de 50°C et un éclairement de 1 kW/m^2 . Ces figures donnent :

- I_{pv} - V_{pv} (ou I_{CH} - V_{CH}),
- P_{pv} - V_{pv} (ou P_{CH} - V_{CH}),
- la droite de charge : $I = V/R$ ($R = 0,85 \Omega$),
- l'hyperbole de puissance maximale.

Le point de fonctionnement (I - V) est représenté par un cercle, le point noir indique la puissance extraite.

Lorsque le panneau est relié directement à la résistance de $0,85 \Omega$, le point de fonctionnement est $I_{pv} = 6,88 \text{ A}$, $V_{pv} = 5,85 \text{ V}$ et $P_{pv} = 40,21 \text{ W}$, alors que le point optimal dans ces conditions, est $I_{pvc} = 6,33 \text{ A}$, $V_{pvc} = 15,86 \text{ V}$ et $P_{pvc} = 100,4 \text{ W}$.

En utilisant le hacheur série commandé avec un rapport cyclique, α , égal à $0,582$ (d'après l'équation (3)), le point de fonctionnement devient $I_{CH} = 10,87 \text{ A}$, $V_{CH} = 9,24 \text{ V}$ et $P_{CH} = 100,4 \text{ W}$ (α : rapport entre la durée de fermeture du MOSFET et la période de découpage).



Au final, le gain en puissance est d'environ 150 %.

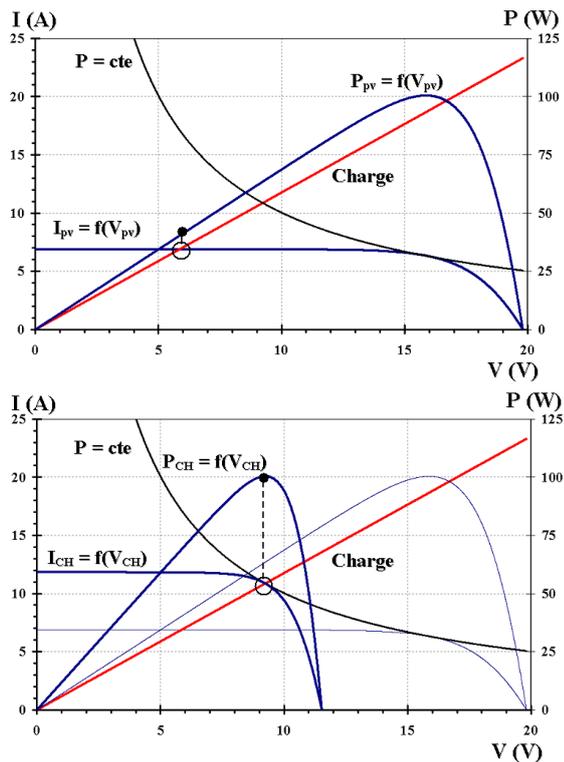


Figure 6 : Caractéristiques $I = f(V)$, $P = f(V)$ et $I = V/R$ ($R_{CH} = 0,85 \Omega$) sans et avec présence du hacheur

Le fonctionnement du hacheur série en mode de conduction continue, est décrit dans [6]. Les principales relations liant l'entrée à la sortie, en supposant un rendement unitaire du hacheur, sont :

$$V_{CH} = \alpha V_{PV} \quad (2a)$$

$$I_{PV} = \alpha I_{CH} \quad (2b)$$

La relation entre R_{CH} et la résistance "vue" par le panneau est donc :

$$R_{PVc} = \frac{V_{PVc}}{I_{PVc}} = \frac{R_{CH}}{\alpha^2} \quad (3)$$

Cela signifie que pour R_{CH} donnée, il est possible de commander le hacheur (α) pour que la résistance aux bornes du module soit optimale, permettant ainsi d'extraire la puissance crête des panneaux comme l'a montré l'exemple (à condition que le point existe car $0 < \alpha < 1$). C'est le principe des commandes MPPT décrites dans le paragraphe suivant.

3. Description des commandes MPPT

3.1. Introduction

Le paragraphe précédent a mis en évidence l'intérêt des convertisseurs statiques dans une chaîne de conversion photovoltaïque. Aussi de nombreuses commandes ([7], [8], [9], [10] et [11]) ont été

développées pour permettre au système d'extraire le maximum de puissance du générateur photovoltaïque.

Comme le montre la figure 7, le principe de ces commandes est de déplacer le point de fonctionnement en augmentant V_{PV} lorsque dP_{PV}/dV_{PV} est positif ou en diminuant V_{PV} lorsque dP_{PV}/dV_{PV} est négatif. Au final, le système oscille autour de la puissance maximale.

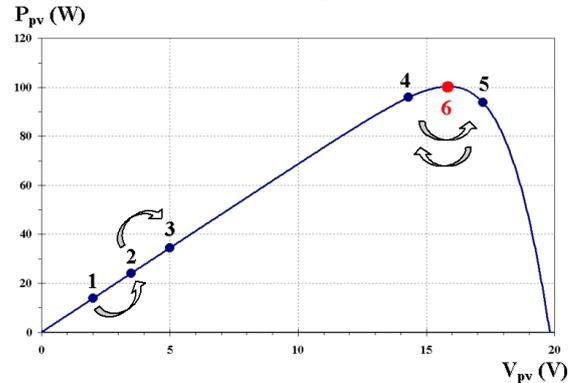


Figure 7 : Principe de fonctionnement des commandes MPPT

Lors de la phase de démarrage ou en régime permanent, ces commandes doivent estimer la puissance et la comparer avec l'instant précédent. Les performances de celles-ci sont liées à la rapidité avec laquelle le point optimal est trouvé, à la manière d'osciller autour de ce même point, mais aussi à la robustesse pour éviter une divergence lors de changements brutaux d'ensoleillement ou de charge.

Dans la suite sont décrits deux algorithmes numériques ainsi qu'une commande MPPT à implantation analogique d'après la référence [7].

3.2. Perturb & Observ (P&O)

Ce premier algorithme est le plus répandu dans le milieu industriel car il est très facile à implanter. Il est représenté sur la figure 8. Son principe est celui décrit au paragraphe 3.1. Il faut tester si les variations de puissance (dP), puis de tension (dV) sont supérieures ou inférieures à 0 pour savoir si la tension doit être augmentée ou diminuée par la commande.

Le problème de cet algorithme est de "se tromper de sens" lors des variations d'éclairement. Pour illustrer ce phénomène, un zoom de la figure 3 a été effectué sur la figure 9, présentant $P_{PV} = f(V_{PV})$ pour trois éclairements E_1 , E_2 et E_3 respectivement de valeur 0,8, 0,6 et 0,4 kW/m².

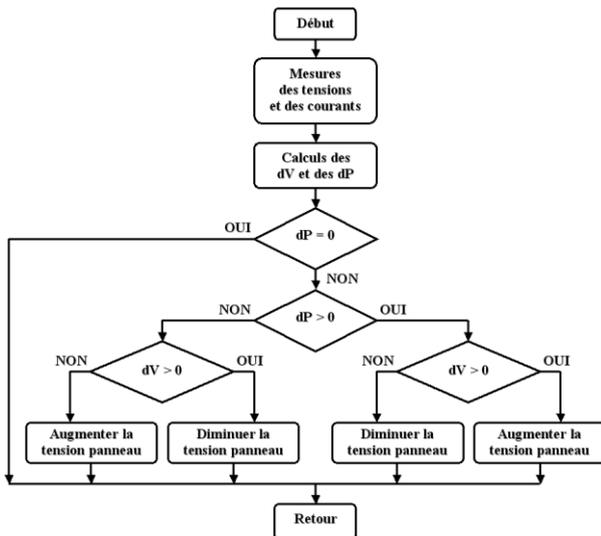


Figure 8 : Algorithme P&O

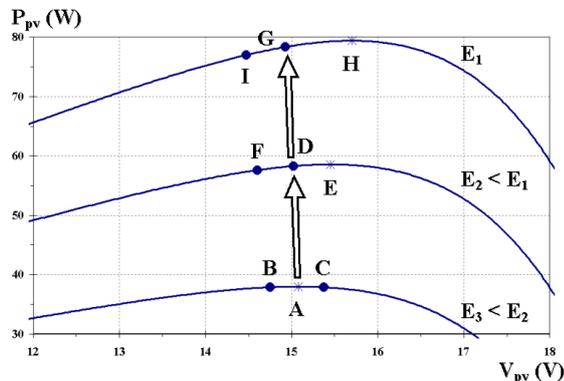


Figure 9 : Illustration des performances de l'algorithme P&O lors d'une variation brutale d'éclairement

Les points A, E et H sont les points où la puissance est maximale (MPP : Maximum Power Point). En supposant que l'éclairement est E_3 , le point de fonctionnement oscille entre B, A et C. Si le point se trouve en A et venant de C, cela signifie que :

$$-dP_{PV} > 0 \text{ W}, dV_{PV} < 0 \text{ V},$$

- \Leftrightarrow il faut que V_{PV} diminue encore pour que le point de fonctionnement se place en B.

A ce moment E_3 passe à E_2 donc le point se trouve en D. Il vient :

$$-dP_{PV} > 0 \text{ W}, dV_{PV} < 0 \text{ V},$$

- \Leftrightarrow il faut que V_{PV} diminue encore et le point de fonctionnement se placera en F.

A ce moment E_2 passe à E_1 donc le point se trouve en G. Il vient :

$$-dP_{PV} > 0 \text{ W}, dV_{PV} < 0 \text{ V},$$

- \Leftrightarrow il faut que V_{PV} diminue encore et le point de fonctionnement va maintenant se placer en I.

Finalement, en partant du MPP pour $E = E_3$, le point de fonctionnement se trouve maintenant, après une variation brutale de l'ensoleillement (passage de E_3 à E_2 puis $E_1 \Leftrightarrow$ ciel nuageux), très loin de H. Il va falloir

attendre quelques boucles au niveau de l'algorithme pour se placer au nouveau MPP. Cela a donc pour conséquence de réduire le rendement global du système. Néanmoins, la rapidité des boucles de calcul peut permettre de minimiser cet inconvénient afin de "rattraper" plus vite le point optimal.

3.3. Incremental Conductance (Inc)

Pour comprendre le fonctionnement de cet algorithme, il suffit de rappeler que le MPP est obtenu lorsque dP/dV est nul. Il est alors possible d'écrire :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} = 0 \quad (4)$$

Ce qui revient à écrire pour le point maximum :

$$-\frac{I}{V} = \frac{dI}{dV} \quad (5)$$

La partie de gauche de (5) représente l'opposée de la conductance instantanée, la partie de droite est sa dérivée (incremental conductance). Lorsque le MPP est atteint, ces deux quantités sont égales mais de signe contraire.

Lors du démarrage ou d'une faible variation, il faut calculer la direction dans laquelle doit aller le point de fonctionnement (augmentation ou diminution de V_{PV}) pour atteindre le MPP. L'algorithme Inc utilise donc l'équation (5). Plus précisément, c'est le système d'équations (6) qui est implanté pour déterminer comment le hacheur doit être commandé. Dans la partie de gauche apparaît explicitement l'endroit où se trouve le point de fonctionnement par rapport à la courbe $P_{PV} = f(V_{PV})$ de la figure 7.

$$\frac{dP}{dV} = 0 \Leftrightarrow \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (6a)$$

\Leftrightarrow MPP atteint.

$$\frac{dP}{dV} > 0 \Leftrightarrow \frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \quad (6b)$$

\Leftrightarrow il faut augmenter V_{PV} pour atteindre le MPP.

$$\frac{dP}{dV} < 0 \Leftrightarrow \frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \quad (6c)$$

\Leftrightarrow il faut diminuer V_{PV} pour atteindre le MPP.

Lors d'une variation brutale de l'éclairement, seul le dI va changer ($dI > 0$ lorsque E augmente, $dI < 0$ lorsque E diminue). Ainsi d'après les courbes de la figure 3, lorsque E augmente, le MPP se trouve toujours sur la droite du point de fonctionnement. Dans ce cas, V_{PV} doit être augmentée. De ces remarques, l'algorithme Inc est représenté sur la figure 10.

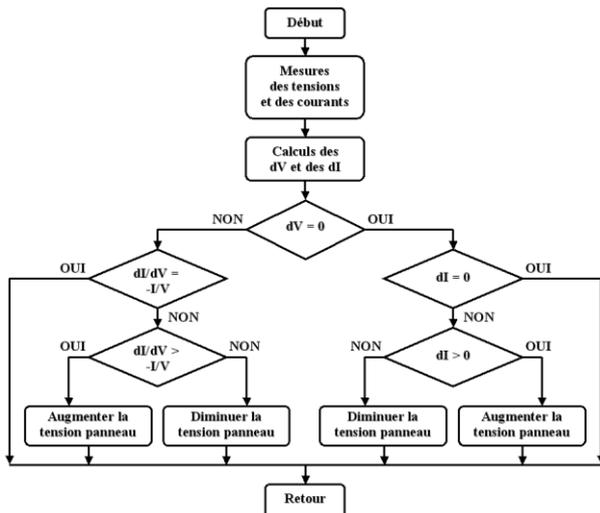


Figure 10 : Algorithme Inc

Cet algorithme semble donc théoriquement plus performant car il détermine à chaque instant le lieu du point de fonctionnement et le sens dans lequel il doit se déplacer pour se rapprocher du MPP.

3.4. MPPT à implantation analogique

Le principe de fonctionnement décrit au paragraphe 3.1 reste identique. Les mesures des grandeurs électriques en sortie des modules (V_{PV} et I_{PV}) sont multipliées entre elles afin d'obtenir la puissance instantanée (figure 11). Deux intégrateurs de constantes de temps différentes, permettent d'obtenir la puissance à l'instant présent et à l'instant précédent. La comparaison de ces deux puissances est mémorisée par une bascule JK câblée en T. Un troisième circuit RC permet d'obtenir une tension de commande qui est comparée à un signal triangulaire afin d'obtenir le rapport cyclique, α , à envoyer au MOSFET.

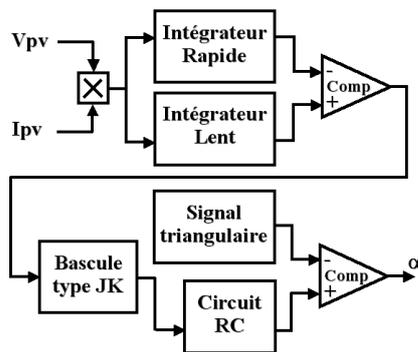


Figure 11 : Schéma de principe du circuit MPPT analogique

Les performances de ce système (stabilité et précision de convergence autour du MPP) sont étroitement liées aux valeurs des constantes de temps des deux premiers intégrateurs (τ_R et τ_L).

L'inconvénient de ce système est qu'il peut diverger lors de variations brutales (éclairage, charge). La sortie du troisième circuit RC peut être bloquée à $+V_{CC}$ ou 0 V. Cela signifie que le rapport cyclique ne va plus varier. L'une des solutions apportées par [7] est de vérifier l'état des sorties de la bascule JK (Q et Q_{barre}). En effet, en fonctionnement normal ces sorties varient entre $+V_{CC}$ et 0 V. Lors d'un défaut de la commande, l'une de ces deux sorties reste bloquée à $+V_{CC}$. Un circuit de contrôle détecte ce dysfonctionnement et remet à zéro la bascule JK ainsi que le circuit RC. Il faut alors que le système se place à nouveau au MPP. Un compromis doit donc être trouvé pour éviter des remises à zéro intempestives ou des pertes de puissance trop importantes dues à une divergence de la commande.

L'intérêt de ce circuit analogique est qu'il est constitué de composants simples et qu'il peut fonctionner à des fréquences très élevées.

4. Simulation de la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque

4.1. Présentation

Six blocs (figure 12) constituent le schéma qui est simulé avec le logiciel Matlab-Simulink :

- le générateur photovoltaïque (figure 13) qui a pour entrée l'éclairage, E et la température, T. La tension V_d (tension aux bornes de la diode du modèle équivalent de la figure 2) est considérée comme une variable interne,
- 2 blocs mesures qui sont constitués d'une résistance shunt pour le courant et d'un pont diviseur résistif pour la tension,
- un bloc associant le hacheur et la MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion). Plus précisément, le signal de commande qui est calculé à l'extérieur, est comparé à un signal triangulaire (porteuse) pour générer le rapport cyclique α ,
- une inductance et un condensateur réalisant le filtre à la sortie du hacheur,
- un bloc "commandes" dans lequel est simulé toutes les commandes du paragraphe précédent.

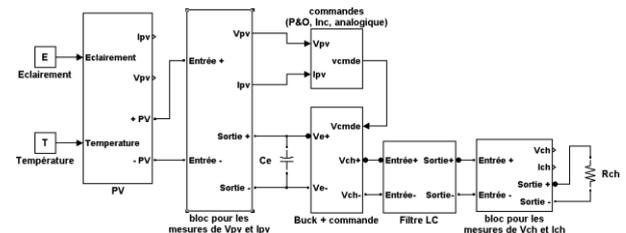


Figure 12 : Schéma utilisé dans la simulation avec Simulink

La figure 13 montre le schéma du module photovoltaïque avec la présence de la diode de protection série. L'amplitude d'une source de courant est contrôlée par le bloc "Equation diode" équivalent à $I_{CC} - I_d$. E, T et V_d sont les trois paramètres qui interviennent dans les calculs de l'annexe 2.

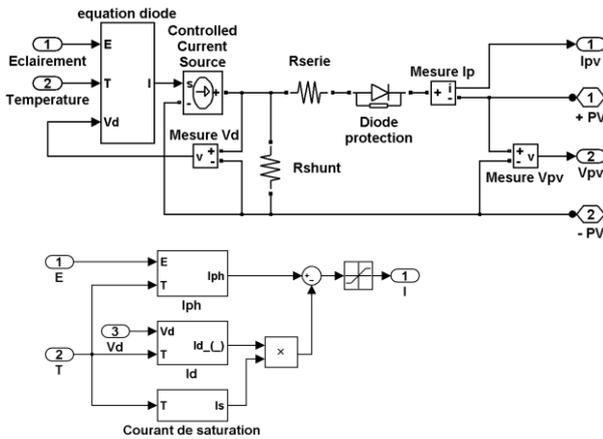


Figure 13 : Schéma simulant le module photovoltaïque

4.2. Simulation des algorithmes numériques

Les figures en annexe 3 montrent les algorithmes P&O et Inc sous Simulink. Les opérateurs logiques réalisent les comparaisons pour savoir si la commande doit augmenter ou diminuer V_{PV} (α varie d'un pas de 0,02). Un échantillonnage est réalisé à une fréquence de 500 Hz correspondant au temps de boucle des algorithmes implantés sous Labview.

Les caractéristiques de deux panneaux VLX53 mis en parallèle, ont été utilisées pour les simulations. La résistance de sortie et la température sont constantes et ont pour valeurs respectives $0,85 \Omega$ et $50^\circ C$. L'éclairement est initialement à 1 kW/m^2 , pour passer à $0,4 \text{ kW/m}^2$ à $t = 0,5 \text{ s}$ et finalement revenir à 1 kW/m^2 à $t = 0,8 \text{ s}$. La figure 14 montre les résultats des simulations (P&O sur la gauche, Inc sur la droite). Ce n'est pas directement α qui est visualisé mais $V_{cmde}(t)$. Il suffit de diviser par 10.

De la figure 6, le point optimal pour $E = 1 \text{ kW/m}^2$ et $T = 50^\circ C$, est de $I_{PVC} = 6,33 \text{ A}$, $V_{PVC} = 15,86 \text{ V}$ et $P_{PVC} = 100,4 \text{ W}$. La différence sur la valeur du rapport cyclique (qui était de 0,582) vient de la présence des résistances shunts ($0,1 \Omega$) de part et d'autre du hacheur. En modifiant la relation (3) et connaissant le MPP, α vaut :

$$\alpha = \sqrt{\frac{R_{CH} + R_{Shunt}}{R_{PVC} - R_{Shunt}}} = \sqrt{\frac{0,85 + 0,1}{15,86/6,33 - 0,1}} = 0,628$$

Ainsi, les deux algorithmes donnent des résultats satisfaisants car le point de fonctionnement optimal est trouvé pour les deux niveaux d'éclairement. Néanmoins, ces simulations ne nous permettent pas de dire quel algorithme est le plus performant.

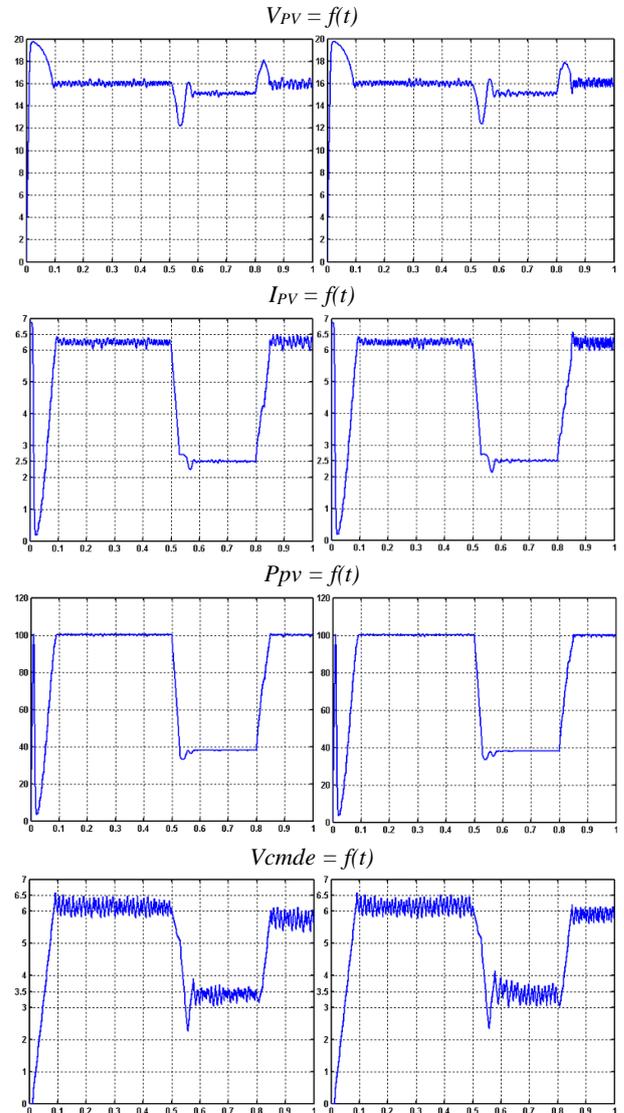


Figure 14 : Simulations pour les algorithmes P&O et Inc

4.3. Simulation de la MPPT à implantation analogique

Le schéma de la commande analogique est donné sur la figure 15. Il représente le bloc "commandes" de la figure 12 (entrées : V_{PV} et I_{PV} , sortie : V_{cmde}).

Le schéma de principe de la figure 11 a été modifié pour insérer un circuit de contrôle détectant une divergence de la commande.

La commande est en défaut lorsque sa valeur tend vers 0 V ou V_{pmax} (amplitude maximale de la porteuse, égale à 10 V). Le bloc de détection surveille un seuil haut (= 9 V) et un seuil bas (= 1 V). Si le signal de



commande dépasse un de ces seuils pendant une durée supérieure à 0,05 s, alors la sortie Q change d'état. La valeur de 0,05 s a été choisie pour montrer l'influence de ce circuit de protection lors de la simulation (figure 16).

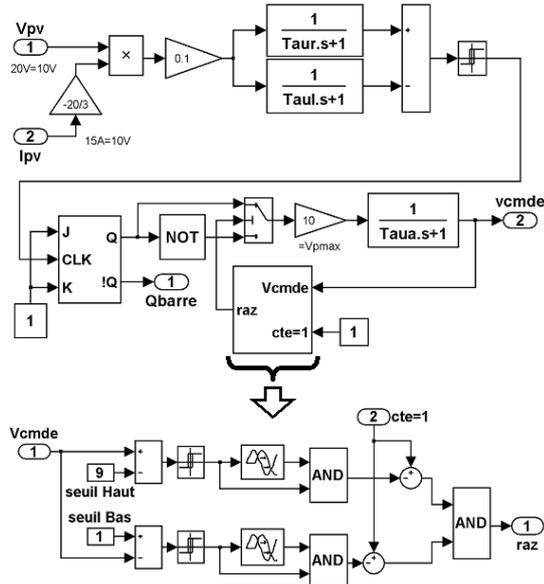


Figure 15 : Implantation analogique sous Simulink

La procédure de simulation est la même qu'au paragraphe précédent. Deux simulations ont été effectuées pour les constantes de temps suivantes :

- soit τ_r = de 0,1 ms et τ_l = 1 ms,
- soit τ_r = 1 ms et τ_l = 10 ms.

Dans les deux cas, la constante de temps du circuit RC (pour générer $V_{cmde}(t)$) est égale à 50 ms.

La dernière courbe présente le signal d'horloge de la bascule JK.

Les grandeurs électriques obtenues pour différents éclaircissements sont semblables à la simulation précédente. Les ondulations de courant ou de tension sont plus importantes dans le second cas ($\tau_r = 1$ ms, $\tau_l = 10$ ms). En effet, la plage de variation du rapport cyclique est plus importante en régime permanent. Ce phénomène est dû au signal d'horloge (CLK) qui ne varie pas aussi vite (variation plus lente des puissances mesurées).

Pour les constantes de temps les plus longues, $V_{cmde}(t)$ devient inférieure à 1 V à 0,06 s et supérieure à 9 V à 0,575 s. Un signal de remise à zéro, correspondant à un changement d'état de Q, est donc généré à 0,11 s et à 0,625 s. Cela a pour conséquence de modifier $V_{cmde}(t)$ et permettre au système de récupérer le MPP. La figure 17 montre les deux impulsions du circuit de détection, évitant ainsi au système de diverger.

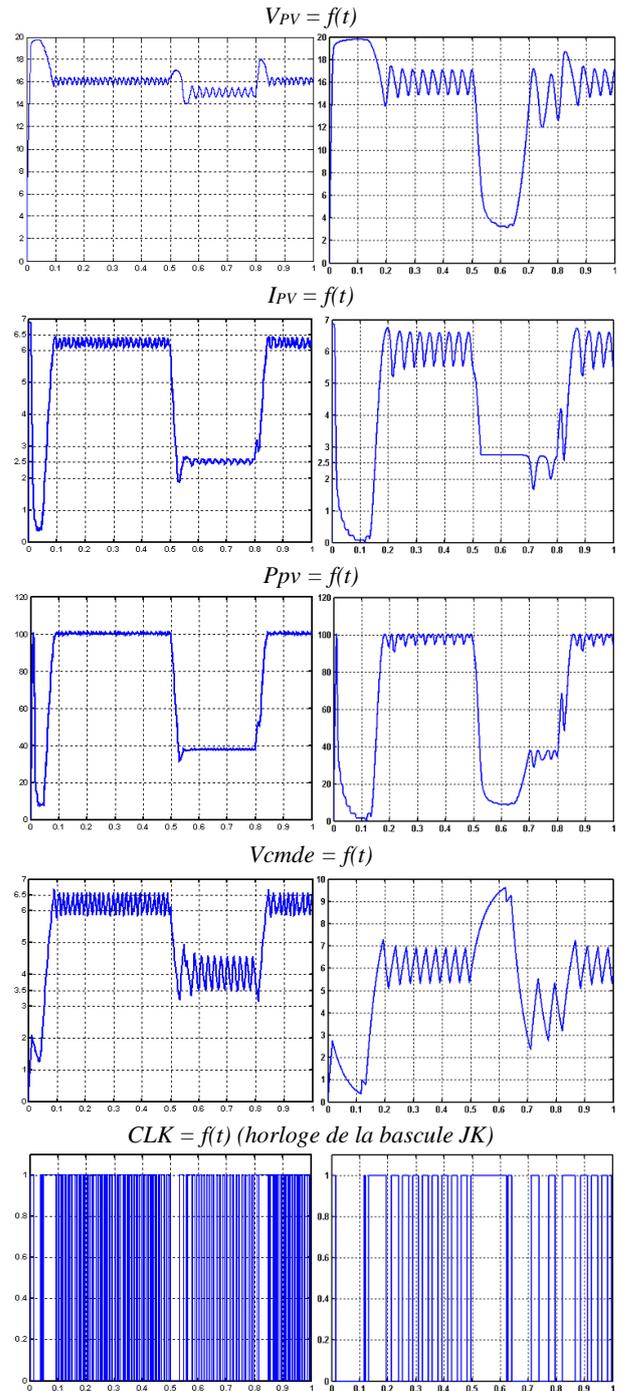


Figure 16 : Simulations pour la commande analogique avec $\tau_{RC} = 50$ ms et pour $\tau_r = 0,1$ ms, $\tau_l = 1$ ms (gauche) ou $\tau_r = 1$ ms, $\tau_l = 10$ ms (droite)

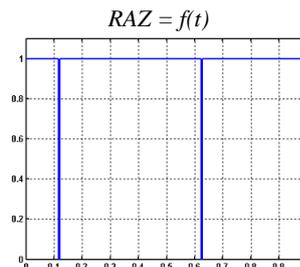


Figure 17 : Signal RAZ du circuit de détection



Le circuit analogique réalise donc sa fonction de recherche du MPP. Il faut néanmoins lui ajouter un circuit de détection afin d'améliorer ses performances. En pratique, ce circuit doit agir sur la bascule JK et le circuit RC pour les remettre à zéro comme le montre la référence [7]. Lors de la simulation, des seuils et un retard sont combinés afin de détecter les dysfonctionnements. L'action qui en découle est le basculement de la sortie Q pour que le signal de commande parte dans l'autre sens, afin de ne pas venir en butée (0 V ou V_{pmax}). Ce choix a été fait car il était plus difficile de remettre à zéro le circuit RC. Le but est de montrer la capacité du système à réagir face à un défaut.

5. Présentation de la maquette de test

Les maquettes constituant le système, sont données en annexe 4. La figure 18 représente le schéma fonctionnel liant les différentes cartes. Toutes les mesures de tension et de courant sont obtenus par des résistances. Dans tous les cas, les mesures sont stockées par le logiciel Labview, après être mises en forme et isolées par la carte d'interface.

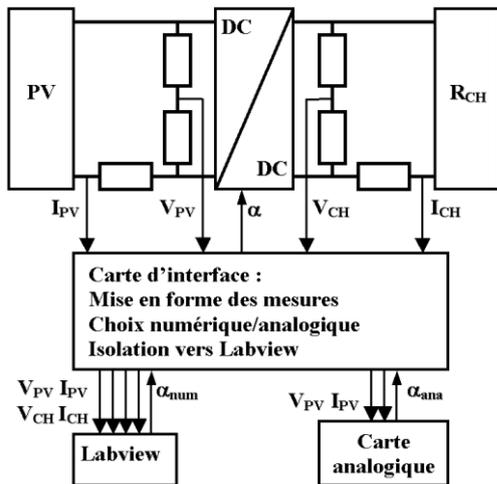


Figure 18 : Schéma fonctionnel

De plus, cette carte d'interface permet de sélectionner le rapport cyclique, α . Ce dernier peut être généré par la MPPT analogique (carte analogique) ou par l'intermédiaire des algorithmes P&O et Inc (implantés dans le logiciel Labview).

Le bloc DC/DC représente le hacheur, sa commande rapprochée (Driver IR2117), le condensateur d'entrée et le filtre LC de sortie.

Comme le montre la figure 5, le MOSFET est relié au "+" de l'entrée (côté High Side). Le Driver utilisé permet d'amplifier les signaux de commande élaborés par la commande éloignée, mais aussi, de fournir une

tension 0/+15V entre la grille et la source du transistor. C'est la technique Bootstrap qui est utilisée [12].

Les composants ont été choisis pour pouvoir fonctionner à une fréquence de 50 kHz. Néanmoins, afin d'avoir un pas de α valant 0,02 pour les algorithmes, la fréquence a été choisie égale à 20 kHz.

6. Résultats des essais

6.1. Commandes numériques (P&O, Inc)

Les résultats des essais effectués dans les conditions d'éclairage naturel sont donnés sur la figure 19. Les algorithmes P&O et Inc se trouvent respectivement à gauche et à droite. La résistance de charge, R_{CH} , vaut dans le premier cas 1,65 Ω et dans le second 1,3 Ω .

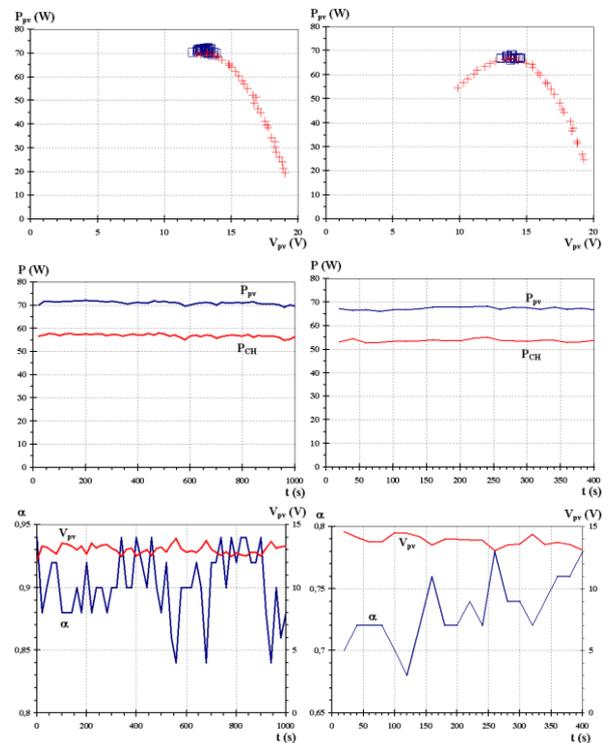


Figure 19 : Résultats pour les algorithmes P&O et Inc

La maquette de test ne dispose pas de capteurs pour la mesure de la température ou de l'éclairage. Afin de valider les algorithmes, la procédure de mesure se déroule suivant les étapes suivantes :

- génération de α par l'algorithme (P&O et Inc),
- acquisition dans le même temps d'un nombre "n" de point dans un intervalle "dt" (n et dt sont réglables),
- génération de α de sa valeur minimale (0,3) à sa valeur maximale (0,96) avec un pas de 0,02 et acquisition des mesures à chaque valeur.

L'objectif de cette procédure est de contrôler si le α calculé correspond bien au MPP. Sur les courbes $P_{PV} = f(V_{PV})$ apparaissent les points de fonctionnement (carré) des algorithmes et ceux mesurés lors de la



variation de α . Dans les conditions de fonctionnement, le MPP correspond donc bien à environ 70 W, ce qui permet de conclure sur l'efficacité des deux algorithmes.

La courbe suivante montre la puissance en amont et en aval du hacheur. Le rendement est de l'ordre de 80 %. Celui-ci peut être augmenté car actuellement, les pertes dans chaque résistance shunt ($= 0,1 \Omega$) correspondent à environ 35 % des pertes totales.

La dernière courbe montre V_{PV} et α lorsque les algorithmes fonctionnent. Les conditions extérieures évoluant très peu lors de ces tests, V_{PV} reste quasi constant.

Des mesures supplémentaires ont été effectuées en modifiant les valeurs de l'éclairement et de la résistance, afin de valider la robustesse de la commande. Les deux algorithmes ayant répondu de la même façon, il n'est pas possible, dans ces conditions de test, de dire lequel des deux est le plus performant.

6.2. Commande analogique

Afin de tester la commande analogique, deux essais ont été réalisés :

- le premier consiste à changer la valeur de la résistance de charge (voir tableau),
- le second a pour but de modifier le niveau d'éclairement (figure 20).

Tableau 1 : Mesures pour différentes valeurs de résistance

$R_{CH} (\Omega)$	0,96	1,27	1,31	1,77	2,32
$I_{PV} (A)$	5,05	4,61	4,67	4,36	3,96
$V_{PV} (V)$	11,7	13,3	13	13,98	14,8
$P_{PV} (W)$	59	61,8	61,2	61	58,4
$I_{CH} (A)$	6,95	6,22	6,12	5,27	4,51
$V_{CH} (V)$	6,66	7,92	8	9,32	10,47
$P_{CH} (W)$	46	49	48,9	49	47,3
α	0,69	0,71	0,75	0,80	0,85

La puissance en sortie du générateur photovoltaïque reste égale à environ 60 W. Le changement de la valeur de R_{CH} a pour conséquence de modifier automatiquement la valeur de α , afin de rester au MPP.

Dans le second test, les deux panneaux sont soumis à une variation d'éclairement. Plus précisément, un seul des deux va voir successivement le maximum puis le minimum d'éclairement. Les deux panneaux VLX53 sont toujours connectés en parallèle, le hacheur débite dans une résistance gardant la même valeur.

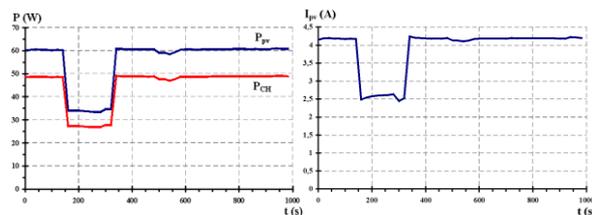


Figure 20 : Résultats pour la commande analogique lors d'une variation d'éclairement

Lors de ce test, l'éclairement est quasiment divisé par deux. Les puissances en amont et en aval du hacheur subissent la même variation. Le courant étant proportionnel à l'éclairement, est lui aussi très affecté par cette variation. Lors du rétablissement des conditions initiales, la commande se place à nouveau au même MPP.

La MPPT analogique est donc tout aussi performante que les deux algorithmes numériques.

De plus, des tests enchaînant tous les modes de commande ont été réalisés et ont montré que la puissance extraite était quasiment identique. Il faut néanmoins se placer dans le cas où les conditions extérieures soient stables (ciel sans nuages).

Pour compléter les tests et comparer les performances de ces trois commandes, des mesures devraient être faites sur une plus longue durée. De plus, seule la mise en œuvre de capteurs (pour le niveau d'éclairement et de température) serait en mesure de juger de la réelle efficacité de l'ensemble du système afin de déterminer le rendement global de la chaîne de conversion photovoltaïque.

Enfin, pour compléter cette étude, il faut améliorer le modèle sous Simulink en le comparant aux mesures. Les résultats de la commande P&O (figure 19) ont donc été utilisés :

$$I_{PV} = 5,46 \text{ A}, V_{PV} = 13 \text{ V}, P_{PV} = 71 \text{ W et } \alpha = 0,9.$$

En constatant que la valeur du courant est élevée, l'éclairement a été choisi égal à $0,9 \text{ kW/m}^2$ et la température à $50 \text{ }^\circ\text{C}$ (température nominale).

Les premières simulations ont montré une tension et une puissance plus élevées. Afin d'obtenir les courbes de la figure 21, les valeurs de la tension de la diode de protection (série) et de la résistance $R_{\text{série}}$, ont été choisies à $0,7 \text{ V}$ et $0,5 \Omega$. La simulation a ainsi donné le point suivant : $I_{PV} = 5,45 \text{ A}$, $V_{PV} = 13,45 \text{ V}$, $P_{PV} = 73,3 \text{ W}$ et $\alpha = 0,86$.

Même si le α semble un peu s'éloigner de la réalité, le modèle sous Simulink peut permettre de s'approcher de la réalité et ainsi être simulé dans tout type de chaîne de conversion photovoltaïque. Néanmoins, seules les expérimentations peuvent valider le type de commande et juger de leur performance.

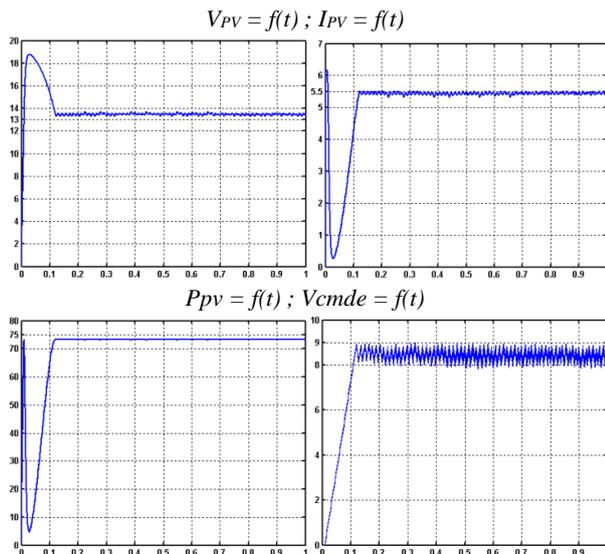


Figure 21 : Comparaison Simulations-Expérimentations

7. Conclusion

A l'origine, les générateurs photovoltaïques ont été utilisés pour des applications bien précises :

- satellites,
- sites isolés : pompage d'eau, balise, loisirs.

Les nouvelles réglementations [13], la maîtrise du processus de fabrication entraînant la diminution des coûts et l'amélioration des convertisseurs statiques associés à leur commande, permettent aujourd'hui une utilisation plus répandue de ce mode de production d'énergie électrique. Dans ce cas, cette production peut être industrielle ou domestique (les générateurs photovoltaïques peuvent être des éléments de toiture ou de façade) et l'énergie électrique ainsi créée, est envoyée au réseau de distribution (production au "fil du soleil") via un onduleur de tension monophasé.

Dans cet article, seulement deux panneaux photovoltaïques ont été utilisés limitant ainsi les éclaircissements non homogènes générant une baisse du rendement. Des recherches sont actuellement menées pour déterminer la stratégie (coût, rendement, fiabilité) à employer lorsque de nombreux modules sont utilisés.

Pour compléter la liste des techniques permettant d'optimiser le transfert de puissance des générateurs photovoltaïques, il existe la possibilité d'orienter les panneaux photovoltaïques afin que l'éclaircissement reçu par ces derniers soit optimal. Cette technique porte le nom de Maximum Power Point Tracker.

Enfin, l'intérêt de toutes ces techniques est réellement utile si V_{PVC} est éloignée de la tension nominale de la charge et si celle-ci est soumise à des variations.

Références bibliographiques

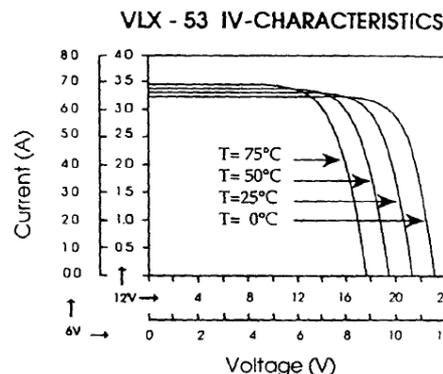
- [1] : A. Ricaud, "Modules photovoltaïques : Filières technologiques" Techniques de l'Ingénieur, Article D3940, 05/2005, 19 pages.
- [2] : A. Ricaud, "Modules photovoltaïques : Aspects technico-économiques" Techniques de l'Ingénieur, Article D3941, 05/2005, 12 pages.
- [3] : L. Protin, S. Astier, "Convertisseurs photovoltaïques", Techniques de l'Ingénieur, D3360, 08/1997, 19 pages.
- [4] : G. Walker, "Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV model", Journal of Electrical & Electronics Engineering, IEAust, vol.21, N°1, 2001, pp.49-56.
- [5] : Radu Dan Lazar, Vasile Bucelea, Ales Loidl, Lukas Formanek, Thomas Chlubna, "Optimized Design of Power Supply for CubeSat at Aalborg University", Rapport, janvier 2002, 139 pages.
- [6] : J.-P. Ferrieux, F. Forest, "Alimentations à découpage, Convertisseurs à résonance", Masson, 1994.
- [7] : M. F. Shraif, "Optimisation et mesure de chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque en énergie électrique", Thèse, LAAS Toulouse, décembre 2002.
- [8] : H. Chihchiang, S. Chihming, "Comparative study of peak power tracking techniques for solar storage system", Thirteenth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition. IEEE, New York 1998, pp. 679-685.
- [9] : H. Chihchiang, S. Chihming, "Study of maximum power tracking techniques and control DC/DC converters for photovoltaic power system", Power Electronics Specialists Conference, Volume 1, 17-22 May 1998, pp. 86-93.
- [10] : D. P. Hohm, M. E. Ropp, "Comparative study of maximum power point tracking algorithms", Progress in Photovoltaics: Research and Applications Volume 11, Part 1, 2003, pp.47-62. Editeur : JOHN WILEY & SONS LTD
- [11] : E. Koutroulis, K. Kalaitzakis, N. C. Voulgaris, "Development of a Microcontroller-Based, Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Control System", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 16, Number 1, 01/2001.
- [12] : S. Lefebvre et B. Multon, "MOSFET et IGBT : circuits de commande", Techniques de l'Ingénieur, Article D3233, 08/2003, 16 pages.
- [13] : S. Astier, "L'électricité photovoltaïque connectée au réseau : une énergie en plein essor", Revue 3EI N°39 Décembre 2004.



Annexe 1 : Caractéristiques des panneaux photovoltaïques utilisés

Données constructeurs (pour 36 cellules connectées en série) :

- Puissance crête : 53 Wc
- Tension crête : 17,2 Vc
- Courant crête : 3,08 Ac
- Courant de court-circuit (I_{SC}) : 3,33 A
- Tension en circuit ouvert (V_{OC}) : 21,3 V
- Coefficient de température en tension (k_v) : -73 mV/°C
- Coefficient de température en courant (k_i) : 2,5 mA/°C
- NOCT : 49°C (Nominal Operating Cell Temperature)



La puissance crête d'un module photovoltaïque s'exprime en Wc (Watt crête). C'est la puissance que ce module peut fournir s'il est branché sur sa charge optimale et soumis à un éclairement solaire de 1000 W/m² (spectre AM 1.5) alors que la température des cellules est de 25°C.

Annexe 2 : Equations du courant I_{PV} et de la tension V_{PV}

- P_{PV} : puissance disponible à la sortie du panneau (en W)
- V_{PV} : tension disponible à la sortie du panneau (en V)
- I_{PV} : courant disponible à la sortie du panneau (en A)
- E : Eclairement (en W/m²)
- I_{CC} : Courant de court-circuit dû à E et à la température T (en A)
- I_S : Courant de saturation (en A)
- I_d : Courant de la diode du schéma équivalent (en A)
- V_d : Tension de la diode du schéma équivalent (en V)
- T : Température courante (en °K)

R_{série} : résistance série équivalente aux diverses résistances de contacts et de connexions (en Ω). Elle a été choisie égale à 0,5 Ω.

R_{shunt} : résistance shunt en parallèle sur le générateur de courant qui caractérise les divers courants de fuite (en Ω). Elle a été choisie égale à 1000 Ω.

- n_s : nombre de cellule photovoltaïque en série
- n_p : nombre de cellule photovoltaïque en parallèle

- e = 1,602 10⁻¹⁹ C (charge de l'électron)
- k = 1,38 10⁻²³ J/K (constante de Boltzman)
- n = 1,3 (facteur de non idéalité de la jonction)
- V_g = -1,013 eV (largeur de la bande interdite)
- T_{init} = 25 °C (température de référence de la cellule photovoltaïque)
- I_{SC} = 3,33 A (courant de court-circuit)
- V_{OC} = 21,3 V (tension en circuit ouvert)
- k_v : -73 mV/°C (coefficient de température en tension)
- k_i : 2,5 mA/°C (coefficient de température en courant)

Calcul du courant I_{PV} :

$$I_{PV} = I_{CC} - I_d - I_{shunt}$$

Calcul du courant de court-circuit :

$$I_{CC} = n_p E \left[k_i (T - T_{init}) + I_{SC} \right]$$

Calcul du courant dans la diode :

$$I_d = I_S n_p \left[e^{\left(\frac{e V_d}{n k T n_s} \right)} - 1 \right]$$

avec :

$$I_S = I_{S_{init}} \left(\frac{T}{T_{init}} \right)^{\frac{3}{n}} e^{\left[\frac{e V_g}{n k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{init}} \right) \right]}$$

$$I_{S_{init}} = \frac{I_{SC}}{e^{\left(\frac{e V_{OC}}{n_p n k T_{init}} \right)} - 1}$$

Calcul du courant dans R_{shunt} :

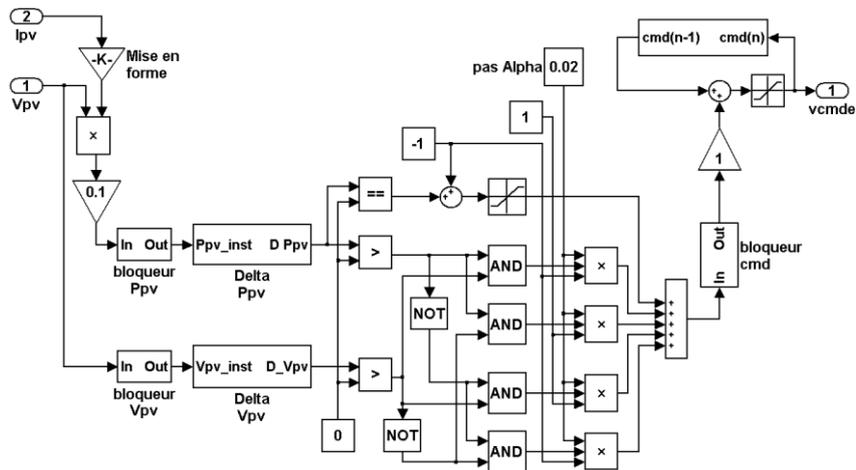
$$I_{shunt} = \frac{V_d}{R_{shunt}}$$

Calcul de la tension V_{PV} :

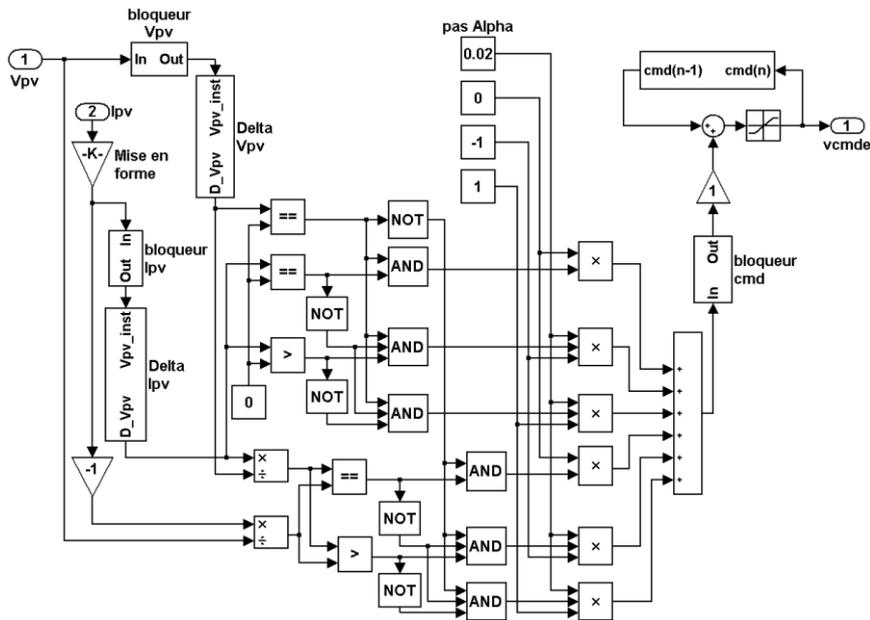
$$V_{PV} = V_d - R_{série} I_{PV}$$



Annexe 3 : Algorithmes P&O Inc

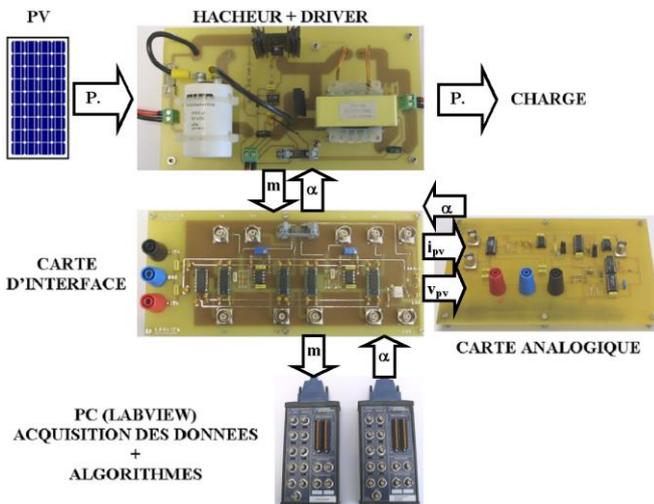


Algorithme P&O sous Simulink



Algorithme Inc sous Simulink

Annexe 4 : Ensemble des maquettes de test



Légende : "m" correspond aux mesures des tensions et des courants en amont et en aval du hacheur.



L'écoconception de produits électriques et électroniques : enjeux, outils et exemples.

Linda LESCUYER & Marc JANIN,
respectivement Directeur Général et Docteur en Ecoconception
au sein du pôle d'expertise en Ecoconception, CODDE.

Lors du sommet de RIO (1992), un constat alarmant fit réagir les états et les entreprises : chaque jour l'homme consomme ce que la terre a mis 10 000 jours à produire. Il devenait incontournable de penser conception durable des produits et services.

Dès 1996, plusieurs industriels du secteur électrique et électronique, conscients de l'importance croissante de la prise en compte des exigences environnementales dans leurs activités et des difficultés de mise en œuvre, se réunissaient afin de réfléchir au développement d'outils et de méthodes adaptés à leur secteur.

Le concept d'éco-conception, naquit avec la publication en mai 1998 de la première norme en définissant les principes : le fascicule AFNOR FD X 30-310 [5]. Il restait cependant à le rendre applicable par les concepteurs (mécaniciens, électroniciens, experts techniques) en permettant la prise en compte de l'environnement au même titre que les critères technico-économiques. Il s'agissait surtout de faire de ce concept une méthode applicable par un grand nombre d'entreprises aux pratiques de conception diverses et variées en fonction de leur taille mais aussi des produits qu'elles fabriquent. Fut ainsi développé un outil d'aide à la conception environnementale : EIME (Environmental Information and Management Explorer).

L'EIME aide les fabricants à répondre à leurs nouvelles obligations qui consistent à assumer leur part de responsabilités vis-à-vis des préoccupations environnementales, ceci depuis la parution en 2002 des Directives européennes DEEE et RoHS sur la composition et la fin de vie des équipements électriques et électroniques.

L'EIME permet en effet :

- **d'identifier, dès la conception, les points faibles d'un produit en termes d'impacts environnementaux** puis d'assister le

concepteur dans ses choix de matières, de procédés et de concepts pour éliminer ces points faibles, tout en préservant la qualité requise du produit;

- **de quantifier les progrès consentis** et de s'inscrire dans une démarche d'amélioration continue, en réduisant progressivement l'impact global du produit;
- **de faire de l'environnement un élément à part entière de la culture d'entreprise**, en mettant à la disposition des industriels un outil utilisable par des non-spécialistes de l'environnement et qui s'intègre aisément dans les procédures de conception existantes.

L'écoconception et le logiciel EIME font aujourd'hui partie intégrante de la politique de développement durable de plusieurs grandes entreprises du secteur mécanique, électrique et électronique parmi lesquelles ALCATEL, LEGRAND ou SCHNEIDER ELECTRIC.

La société CODDE ¹ [1], créée en janvier 2003 à l'initiative de la FIEEC, est reconnue comme pôle d'expertise en écoconception pour ce secteur.

1 Les impacts environnementaux des produits électriques et électroniques

Tout produit interagit avec son environnement à toutes les étapes de sa vie et génère des impacts positifs ou plus généralement négatifs :

- lors de la conception, par les choix de matières, de procédés, de concepts qui sont réalisés;
- lors de sa fabrication, par l'énergie et les matières consommées, et par les rejets émis;
- lors de sa distribution, par les moyens de transport utilisés;
- lors de son utilisation, par l'énergie et les matières consommées;
- enfin, lors de son élimination en fin de vie, par les déchets qu'il génère, par l'énergie et les

formation en Eco-conception.

¹ CODDE : Conception Développement Durable et Environnement, société spécialisé dans le conseil et la



matières consommées pour son traitement, et par l'émission de rejets associée à ce traitement.

Il est donc important d'appréhender le problème dans sa globalité afin de ne pas aboutir à un transfert de pollution d'une étape du cycle de vie à une autre. Une approche systémique doit être préférée afin d'aboutir à la réduction de l'impact global du produit.

Ce sont les orientations prises lors de la conception qui vont conditionner le comportement du produit vis-à-vis de l'environnement tout au long de sa vie. Le fabricant se doit donc de prendre en compte, dès les premières ébauches de sa réflexion, les aspects du produit qui impacteront négativement sur l'environnement.

Plusieurs grandes familles d'impacts sur l'environnement peuvent être distinguées :

- la consommation de ressources naturelles : il est souhaitable de rechercher une réduction des quantités de ressources utilisées, matières premières ou énergie.
- la pollution de l'eau ou de l'air : cet impact est lié à l'émission de molécules participantes à l'altération des phénomènes naturels. On compte parmi ces pollutions la production de gaz à effet de serre ou encore la destruction de la couche d'ozone.
- la production de déchets : les déchets de production, les produits d'emballage, ainsi que les produits en fin de vie doivent être valorisés pour réduire les volumes de matières mis en décharge, et permettre également une diminution des prélèvements de ressources vierges grâce au recyclage.

Les études réalisées au cours de ces 10 dernières années, ont mis en évidence que l'un des aspects environnementaux significatifs des produits électriques et électroniques est la consommation d'énergie au cours de leur utilisation.

Il a ainsi été montré que cette dernière peut représenter plus de 80 % des impacts environnementaux, ceci étant d'autant plus vrai que la durée d'utilisation est longue (supérieure à 15 ans) [5]. Cependant les autres impacts ne doivent pas être sous-estimés. Beaucoup d'efforts ont déjà été consentis par les fabricants pour réduire la consommation énergétique des appareils. Avec une nécessaire approche multicritères de l'environnement, ils pourront continuer sur d'autres axes de progression en fonction des

technologies disponibles.

2 Les enjeux de l'écoconception

L'écoconception d'un produit va consister à mesurer les impacts environnementaux potentiels dès la conception même du produit afin de faire des choix raisonnés permettant de limiter les impacts négatifs sur l'environnement.

Les enjeux sont grandissants avec une réglementation européenne de plus en plus drastique. La directive 2002/96/CE prévoit notamment dès le 1^{er} juillet 2006, un bannissement de six substances considérées comme dangereuses de la composition des équipements électriques et électroniques. On retiendra par exemple que le plomb, élément d'alliage incontournable des brasures Sn-Pb, fait l'objet de cette interdiction. L'écoconception permet d'anticiper ces contraintes et d'identifier une solution durable, ne risquant pas une prochaine interdiction.

Par ailleurs, on note une augmentation accrue des préoccupations environnementales des consommateurs, des marchés publics, des banques, des assureurs, etc. La gestion du risque environnemental fait désormais parti de la stratégie d'une entreprise.

Le marché toujours plus concurrentiel est aussi à la recherche d'éléments de différenciation. C'est le cas du marché automobile, où exigences réglementaires et faible croissance des parts de marché, ont incité les fabricants à concevoir puis communiquer sur le Développement durable et l'écoconception de leurs véhicules.

Ces considérations nous amènent à conclure à la nécessité d'une appropriation de ces enjeux à chaque échelon de l'entreprise, par tous les métiers, de l'électronicien qui sélectionne les technologies au marketing qui met en valeur les caractéristiques environnementales des produits. Forcé de constater néanmoins, que tous ne possèdent pas le bagage de connaissance suffisant pour mettre en œuvre les principes de l'écoconception dans leurs métiers. Des formations internes sont donc organisées afin de permettre l'appropriation du sujet.

3 La méthode EIME

3.1 Principes

La méthode EIME a été **développée pour s'adresser à un large éventail de produits dits complexes**, c'est à dire résultant de l'assemblage de matériaux mais également de composants. Aussi l'outil EIME est parfaitement adapté à tous les produits électroniques tels que les ordinateurs ou les téléphones portables mais aussi aux produits électriques comme les



transformateurs ou les disjoncteurs et les produits de l'automobile, du ferroviaire ou de l'aéronautique.

Rappelons que l'écoconception est avant tout une histoire de conception et l'EIME a été voulu **utilisable par des non-spécialistes de l'environnement**, pour **s'intégrer dans les procédures existantes** de conception des produits. Il répond ainsi aux **critères de simplicité, de souplesse** tout en garantissant une **approche complète**. C'est un outil simple sans être simpliste... Fonctionnalités de l'EIME

Le logiciel EIME a été conçu pour être utilisable sans formation particulière à l'environnement et pour être intégrable dans les procédures de conception existantes, et pour s'adapter facilement aux exigences spécifiques de l'entreprise utilisatrice.

On peut résumer le mode d'utilisation du logiciel comme suit :

1. **La description du produit se fait simplement** en accédant à une liste de composants électroniques, matériaux ou processus, qu'il est aisé de sélectionner et de placer dans une fenêtre prévue à cet effet. Il est également possible de rendre compte de la complexité du produit en matérialisant les liaisons entre ses pièces ou sous-ensembles.

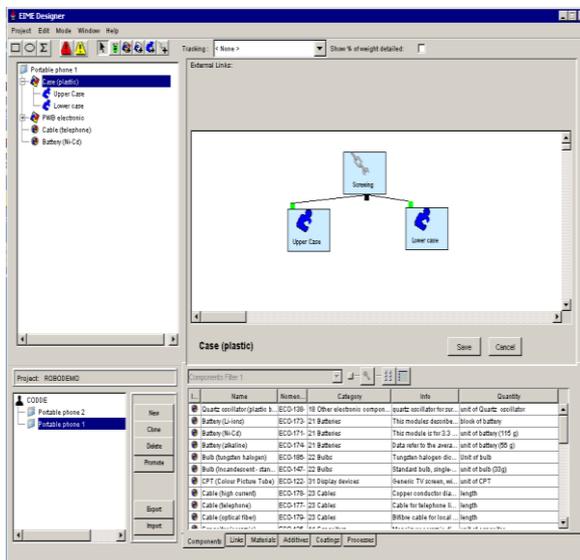


Figure 1 - Modélisation de l'architecture du produit

2. **Des messages diffusent à l'utilisateur des informations** relatives à la réglementation, aux normes ou aux exigences clients spécifiques au produit qu'il conçoit.
3. **Lors de l'évaluation d'un produit ou d'une option technique, le résultat obtenu peut être**

rapporté à des valeurs « cibles ». Dans la majorité des cas le produit est comparé à une étude de cas antérieure ce qui permet une compréhension rapide et aisée des progrès réalisés. La figure 2, représente un diagramme dans lequel est illustrée la comparaison d'un cas d'étude par rapport à un cas « cible ». Le produit le moins polluant vient se positionner au centre du diagramme.

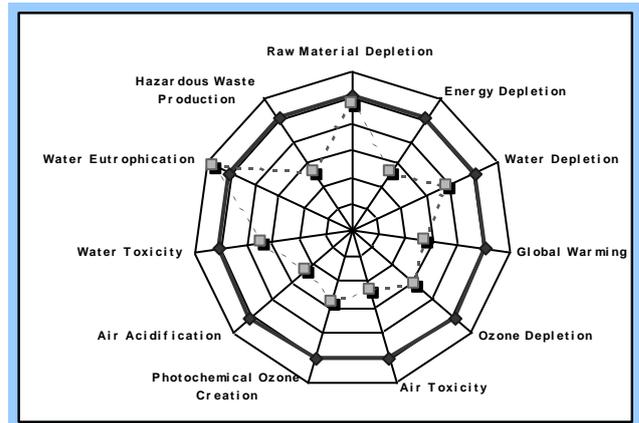


Figure 2 : Diagramme araignée de comparaison

4. **L'utilisateur peut très facilement identifier les points sensibles du produit en choisissant d'afficher les contributions relatives de chaque partie du produit aux impacts globaux sur l'environnement.** Le concepteur pourra alors hiérarchiser ses actions en travaillant en priorité sur les composants / matériaux les plus polluants.

3.2 Architecture du logiciel

La conception d'un produit fait appel à plusieurs compétences tels que l'expertise technique, l'innovation, le marketing, l'industrialisation ou les achats. Le logiciel EIME a été conçu de manière à permettre un partage des informations par l'ensemble des acteurs de la conception d'un produit. Pour ce faire, une structure de type client-serveur a été retenue afin de faciliter le partage de la base de données et des projets.

Par ailleurs, deux interfaces d'utilisation coexistent. La première, appelée « Designer », permet de réaliser les profils environnementaux des produits et de comparer différentes options technologiques sans aucune compétence particulière en environnement. Cette interface est aujourd'hui utilisée par les bureaux d'études des entreprises afin d'étudier différentes solutions techniques et de mesurer les impacts évités grâce aux options de conception retenues. Elles est



accessible tant à un mécanicien qu'à un électronicien.

La seconde appelée « Expert », doit être utilisée par un expert environnement dont le rôle sera de paramétrer le logiciel aux besoins spécifiques de l'entreprise.

Une fonctionnalité astucieuse de l'outil permet par exemple à l'aide de conditions (« si ... alors ») de générer des messages des experts à destination des concepteurs pour diffuser des exigences réglementaires ou des attentes clients et le retour d'expériences.

On distingue deux types de messages dénommés les « Warning » et les « To do » ce qui permet de différencier obligations (réglementaires) de recommandations. (de type marquage par exemple : lorsque les conditions requises sont réunies la description d'une pièce plastique d'un poids supérieur à 150 g, un message se déclenche pour rappeler que ce type de pièce devrait être marqué selon la norme ISO 11469).

L'interface Expert peut être gérée par le responsable environnement de l'entreprise ou par CODDE en fonction de la licence choisie par l'entreprise.

4 Les fondamentaux de la méthode EIME

4.1 Description du produit

Le principe retenu dans l'EIME repose sur la modélisation d'un produit à partir de briques élémentaires, dits **modules génériques**, mis à disposition de l'équipe de conception. On distingue :

- des sous-ensembles fonctionnels dits « composants »;
- des matières premières, comme les principaux métaux et alliages, les matières plastiques, le carton ou le papier ;
- des substances chimiques additionnelles et qui entrent dans la composition des produits mais dans de faibles proportions ;
- des procédés de transformation, comme par exemple, l'injection de matières plastiques, les traitements de surface ou le collage.
- des modules de liaisons que l'on appelle « liens », comme le collage, le sertissage, l'emboutissage. Ces modules n'apportent pas de matière première, ils permettent simplement de finaliser l'architecture du produit.

Chacun de ces éléments fait l'objet **d'un module** regroupant les données d'impacts d'une technologie donnée. Par exemple, un module « condensateur électrolytique » récapitule toutes les émissions de polluants ainsi que les consommations de ressources liées à la fabrication des matériaux puis l'assemblage du

composant, sa distribution et enfin son implantation sur une carte. En additionnant chaque module représentatif d'un sous-ensemble d'un équipement fini, on estime ainsi les impacts potentiels de la production du dit équipement.

L'utilisation de ces modules représente un gain de temps considérable par l'entreprise n'ayant plus besoin de rechercher les données au travers de questionnement fournisseurs.

Cependant, les impacts environnementaux d'un produit ne sont pas le simple résultat de la somme des impacts des constituants du produit. En effet, une fois fabriqué, le produit va être transporté, utilisé, maintenu et enfin éliminé. A chacune de ces étapes, on observe des consommations (matières ou énergie) et des rejets. Ces données doivent être considérées dans le calcul d'impacts.

Afin de guider l'utilisateur « Designer », trois écrans de demande d'informations ont été développés pour garantir l'exhaustivité de la prise en compte des aspects environnementaux majeurs d'un produit. Ces trois écrans correspondent respectivement à :

- La phase de distribution du produit au cours de laquelle il est nécessaire de déterminer le scénario de transport du produit. Le kilométrage et le mode de transport sont à saisir mais il est également nécessaire de matérialiser le conditionnement du produit.
- La phase d'utilisation qui consiste principalement à matérialiser les consommables du produit comme l'énergie nécessaire à son fonctionnement.
- La phase de fin de vie pour laquelle le concepteur doit choisir un scénario de traitement. Ce scénario sera ensuite utilisé par le logiciel afin de calculer le taux de recyclabilité du produit.

4.2 La base de données

L'outil EIME s'appuie sur une base de données sans cesse réactualisée par CODDE. Elle regroupe à ce jour environ 250 modules (matériaux, composants électriques ou électroniques, processus de transformation de la matière...).

Les données d'inventaire qui sont incorporées dans les modules sont issues soit :

- de bases de données existantes concernant les principaux matériaux de base (métaux, plastiques, bois, verre...), les moyens de transport, les principales sources d'énergie...;



- de collectes d'informations sur des sites de production ;
- de données bibliographiques.

Chaque module fait l'objet d'une validation sur le plan environnemental et sur le plan technique afin de garantir la représentativité des données collectées et leur comparabilité. Source et qualité des données sont mentionnées pour chaque module.

4.3 Les indicateurs environnementaux

Suite à la modélisation d'un produit ou d'un sous-ensemble, le logiciel EIME va calculer **11 indicateurs d'impacts sur l'environnement** dont :

- la contribution à l'effet de serre comptabilise, en équivalent CO₂, les émissions de gaz ayant un effet direct ou indirect sur l'effet de serre (NO₂, CH₄, CFC...),
- la contribution à la destruction de la couche d'ozone comptabilise, en équivalent CFC11, les émissions de gaz ayant un effet direct ou indirect sur la couche d'ozone (CFC, halons...),

mais aussi la consommation de ressources naturelles, la consommation d'énergie, la consommation d'eau, la création d'ozone photochimique, la contribution aux pluies acides, la contribution à l'eutrophisation des eaux, la contribution à la toxicité de l'air, la contribution à la toxicité de l'eau et la production de déchets dangereux [3].

Ces indicateurs ont été choisis parmi les méthodes les plus reconnues sur le plan international. Il est possible de consulter l'ensemble des méthodes de calculs et les sources de ces méthodes grâce au Manuel Indicateurs diffusé par la société CODDE [7].

5 Les exemples d'entreprises ayant mis en œuvre l'écoconception

La société ALCATEL [2], qui utilise le logiciel EIME depuis 1996, a publié une étude permettant de démontrer qu'une démarche d'écoconception pouvait conduire à des gains économiques notamment sur le plan industriel. Cette étude comparative entre deux éléments de refroidissement d'un commutateur a abouti à la production d'appareils équipés d'un plus petit nombre de ventilateurs plus puissants. A noter que la nouvelle architecture de sous-ensemble permet de réduire les coûts d'industrialisation du produit de part la réduction des étapes d'assemblage. De plus les économies d'énergie réalisées pendant l'utilisation du produit permettent non seulement la réduction des impacts environnementaux mais aussi une réduction de

la facture d'électricité de l'utilisateur

Plus récemment la société STIE, qui appartient au groupe Schneider Electric, témoignait des bénéfices réalisés grâce à la substitution de rivets assemblant deux pièces mécaniques par un pliage de la tôle. Cette conception a permis d'économiser 162 k€ par an pour cette gamme de produit, justifiant ainsi le temps passé à la réflexion.

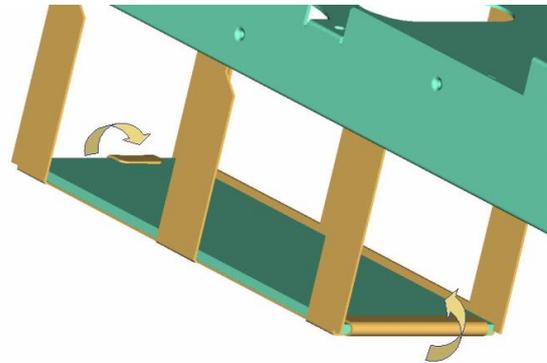


Figure 3 : Choix d'assemblage par pliage de la tôle.

Enfin, pour la société MGE UPS SYSTEMS, spécialisée dans la conception et la production d'onduleurs, les recherches en électronique sur le produit GALAXY 3000 ont permis de remplacer les composants passifs en entrée (transformateurs) par des IGBT permettant ainsi de réduire de 20 % la consommation d'énergie en phase d'utilisation et de plus de 40 % la consommation en ressources naturelles grâce au redimensionnement des câbles associés. Cet exemple et bien d'autres peuvent être consultés dans l'ouvrage publié par l'ADEME, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, « L'Ecoconception en actions » [4].

6 L'intégration de l'écoconception au cursus de formation des ingénieurs

Suite à l'apparition de nouvelles exigences réglementaires, concernant notamment le bannissement de substances dangereuses comme le plomb, le mercure ou le chrome hexavalent, la maîtrise de la composition du produit et la traçabilité de ces informations est plus que jamais d'actualité dans l'industrie électronique. On constate depuis janvier 2003, date de parution des Directives 2002/96/CE et 2002/95/CE, une augmentation significative du nombre d'entreprises qui s'informent puis forment leur personnel au sujet de l'écoconception. Les sessions de formation s'organisent autour de l'équipe projet afin de favoriser l'interaction entre les métiers et la confrontation des points de vue. Les craintes exprimées en début de séance mettent en évidence que l'absence de connaissance sur le sujet est le premier frein à la mise en œuvre de l'écoconception. Chacun ayant peur de mal faire ou ne sachant que faire.



Trop peu de formations techniques intègrent à l'heure actuelle un module Ecoconception. Les nouveaux concepteurs sont à leur entrée sur le marché de l'emploi moins sensibilisés et informés que leurs aîeux sur le thème des éco-innovations.

Certains cursus de mécanique préparent néanmoins leurs étudiants à ces nouvelles préoccupations par le biais d'une 20ème d'heures de cours sur le sujet. C'est le cas notamment de l'Université de Bretagne Sud, où Monsieur Yves GROHENS sensibilise depuis 2004 les futurs mécaniciens.

L'EIME est également un outil de formation et de sensibilisation à la problématique environnementale, grâce aux nombreuses informations intégrées dans les modules de la base de données. En utilisant un outil tel qu'EIME, il est possible de mesurer les impacts potentiels et ainsi d'associer impacts environnementaux et technologies connues.

Les étudiants de l'ENSAM de Chambéry sont formés depuis plusieurs années déjà à l'administration et l'utilisation du logiciel.

Afin de préparer le corps enseignant à cette nouvelle discipline, la société CODDE proposera en 2006, une session d'initiation à l'écoconception, permettant l'acquisition des notions élémentaires en environnement et la présentation des différents outils existants. Pour plus de renseignements, n'hésitez pas à nous contacter.[1]

Pour en savoir plus

- (1) Société CODDE – 23 Rue Galilée 75116 PARIS ; tel : 01 45 05 70 67, e-mail : codde@codde.fr

Bibliographie

- (2) DUBOTS (P.). - Une approche professionnelle pour un outil de conception de produits de moindre impact environnemental : méthodologie EIME. Conférence « Matériels Électriques Industriels et Environnement », Versailles (France) - 17/18 juin 1996.
- (3) BRINKLEY (A.), KIRBY (J. R.), CHARRON (F.). - A joint industry approach to environmental impact evaluation of electrical and electronic products. Conférence IEEE « Electronics and Environment », San Francisco (États-Unis) - 5/7 mai 1997
- (4) ADEME – l'Eco-conception en actions, www.ademe.fr (France), décembre 2003.
- (5) FD X 30-310. - Prise en compte de l'environnement dans la conception et le développement des produits. Principes généraux et application. Avant-projet du document AFNOR, décembre 1996.
- (6) PINEL (B.). - Intérêt des outils de management environnemental de type ACV pour évaluer l'impact sur l'environnement des matériels électriques de réseau. Conférence Matériels électriques industriels et environnement, Versailles (France), 17-18 juin 1996
- (7) CODDE – Manuel Indicateur version 1.7. www.codde.fr (France), août 2003



L'évolution de l'électronique de puissance en traction ferroviaire

Christian LECLERC

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

Suite de la 4^{ème} partie : Les "GTO" règnent sur les matériels français de petite et grande traction pendant une petite dizaine d'années

D.2 - Les applications des "GTO"

Nous venons de voir précédemment (*La Revue 3EI* n°41) l'arrivée, vers 1985, de GTO de forts calibres en tension et en courant "commutables", donc pouvant facilement être utilisés sur les équipements du matériel moteur, les convertisseurs auxiliaires bien sûr, mais surtout les onduleurs de tension indispensables à l'emploi du moteur asynchrone en traction et sur lesquels les thyristors n'étaient manifestement pas à l'aise dès que l'on voulait monter en puissance (la BB 10003 de 5000 kW, décrite antérieurement dans *La Revue 3EI* n° 40, l'avait montré suffisamment).

Si la SNCF avait "trouvé son bonheur" avec les excellentes chaînes de traction à moteurs synchrones autopilotés de fortes puissances (locomotives BB 26000 et rames TGV, conçues à partir de 1988), ainsi que celles à moteurs asynchrones de moyenne puissance (série des automotrices Z 20500 dont le prototype, la Z 8885, était sorti en 1985), utilisant toutes des onduleurs de courant à thyristors, il n'en n'était pas de même pour la RATP avec les matériels "métro". En ce qui concernait ce domaine de la traction de petite puissance, nous avons évoqué également (*La Revue 3EI* n° 40, p.87) les expérimentations T.C.O. et Jeumont-Schneider, en 1982 et 1983, d'onduleurs de courant de 250 kW et moteurs asynchrones sur des motrices de type MF 77 (sorti en 1978 et utilisé sur les lignes 7, 8 et 13 du réseau parisien) ; mais aussi l'installation, en 1981, par Alstom de 2 onduleurs de tension de 250 kW à thyristors immergés dans des cuves "fréon" sur la motrice M 10024 de type MF 67. C'est finalement cette expérimentation, testée en service commercial entre 1982 et 1986 qui a eu une suite puisqu'un équipement de 2^{ème} génération, utilisant alors des GTO, s'est substitué aux 2 onduleurs à thyristors en 1988.

Du côté de la SNCF, 1988 est aussi l'année où les GTO sont entrés en scène, modestement d'abord puisque sur des équipements auxiliaires, tels les onduleurs de 30 kVA des motrices et ceux de 300 kVA pour les remorques, des rames TGV-Atlantique (ainsi que leurs chargeurs de batteries de 10 et 30 kW). Mais ce n'est qu'un an après, en 1979, que la SNCF a adopté le GTO sur des équipements de traction puissants ; il s'est alors agi des rames du TGV-TransManche (dites "TMST" puis "Eurostar", par la suite).

Voyons un peu plus en détail les matériels les plus significatifs.

1988 : le prototype "métro" installé sur la M 10024 et les équipements qui en ont été issus.

Il s'agissait pour la RATP de préfigurer les chaînes de traction envisagées pour les matériels à venir, notamment les futures rames MF 88, issues du prototype articulé dit "boa" et destinées à la ligne 7 bis. Ces rames originales, à intercirculation totale, ont la particularité d'être équipées, non plus de classiques bogies mais d'essieux orientables en courbe à roues indépendantes (les 4 moteurs de 220 kW d'une rame entraînent les roues motrices par l'intermédiaire de dispositifs différentiels de type automobile) d'où un bien meilleur comportement dans les courbes serrées souvent rencontrées sur le réseau parisien. Autres matériels, plus puissants (leurs moteurs sont définis pour 300 kW) et beaucoup plus nombreux que les 9 rames MF 88 à 3 voitures chacune, les rames sur pneus MP 89 qui circulent sur la ligne 1, en version à conduite classique et sur la ligne 14 ("météor") dans leur version automatisée, sans conducteur.

La disponibilité de GTO de calibre convenable a permis à la société GEC-Alstom de remplacer, à titre expérimental toujours, les 2 onduleurs de 250 kW à thyristors conventionnels de la motrice M 10024 par un seul équipement à GTO d'une puissance de 500 kW. La *figure 262* représente l'un des 2 coffres de cet équipement installé sous caisse.



Figure 262 : Vue du coffre onduleur de l'équipement prototype GEC-Alstom de 500 kW installé sur la motrice M 10024 de la RATP ; un 2^{ème} coffre, contenant l'appareillage, est installé sous la face opposée. Cette figure montre les 3 panneaux ouverts (chacun constituant une phase) leur refroidissement est assuré par convection naturelle. (photographie extraite de la Revue GEC-Alstom n°8)

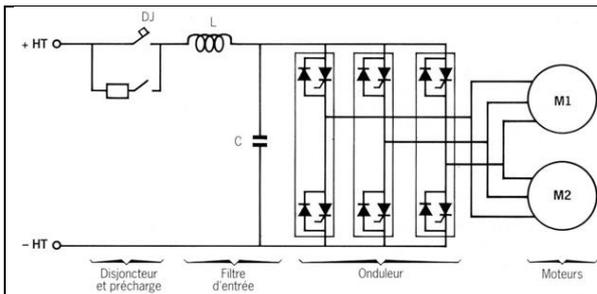


Figure 263 Schéma de principe de la chaîne de traction "métro" à moteurs asynchrones. L'onduleur de tension à GTO, d'une puissance de 500 kW à 600 kW, alimente les 2 moteurs d'une motrice (2 bogies monomoteurs) en parallèle. (schéma extrait de la Revue Technique GEC-Alsthom n° 8)

Cet onduleur, dit de 2^{ème} génération, dont le schéma, très simple, est représenté à la figure 263, alimente en parallèle les 2 moteurs asynchrones de traction à partir du 3^{ème} rail sous 750 V nominal ; le freinage par récupération est assuré jusqu'à l'arrêt sans aucune commutation électromécanique. L'équipement des rames MF 88 est issu de cet onduleur prototype ; la figure 264 qui en donne une vue générale, met bien en évidence le dispositif de refroidissement des semi-conducteurs par convection naturelle.

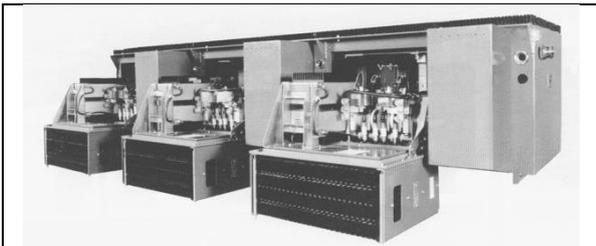


Figure 264 Vue du coffre onduleur (représenté aussi panneaux ouverts) des rames MF 88 de la RATP. Issu de l'onduleur prototype à GTO de la motrice M 10024, cet équipement permet l'alimentation de 2 moteurs de 220 kW (MF 88) ou de 300 kW (MP 89).

(photographie extraite de la Revue GEC-Alsthom n°8)

Comme il apparaît sur la figure ci-dessus, chacune des 3 phases est constituée d'un panneau pivotant supportant, en partie supérieure, les 2 GTO (de calibre 2500 V- 2200 A) et leurs diodes (connectées en anti-parallèle) ainsi que les 2 sous-ensembles allumeurs (à circuit hybride de puissance tel que représenté à la figure 261 de *La Revue 3EI* n° 41, p.72) et, en partie inférieure, le condenseur de refroidissement ; la figure 265 permet de mieux discerner ces éléments tandis que la figure 266 montre le principe de refroidissement en lui-même.

Alors que le refroidissement par immersion des semi-conducteurs dans un liquide frigorigène (tel qu'utilisé sur les nombreux matériels, surtout de la SNCF, qui ont été décrits antérieurement) utilise directement la chaleur de vaporisation du liquide, le dispositif que GEC-Alsthom a développé pour les onduleurs à GTO de puissance moyenne l'utilise indirectement, comme nous allons le constater. Les cellules des GTO et diodes à refroidir sont insérées entre des plots de cuivre, appelés évaporateurs, dans la

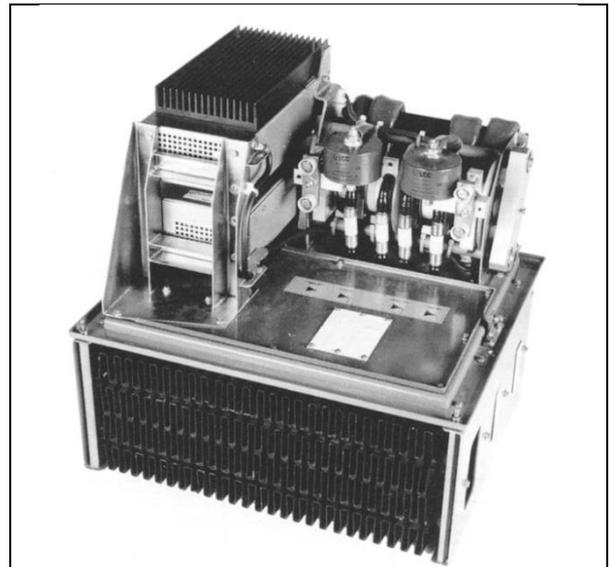


Figure 265 Détail d'un panneau onduleur à GTO de 600 kW à refroidissement par convection naturelle utilisant le dispositif GEC-Alsthom dit "SMF" (pour : système modulaire fluide).

On distingue, sur la face supérieure du panneau, les 2 GTO et leurs diodes insérés entre les plots de refroidissement (évaporateurs), l'ensemble étant mis en compression ; on remarquera, à gauche, les 2 sous-ensembles allumeurs superposés. En dessous, le condenseur (dont on aperçoit seulement les ailettes), est monté sur la face inférieure du panneau ; lequel est en position normale verticale lorsque le coffre est fermé.

(photographie extraite de la Revue GEC-Alsthom n°8)

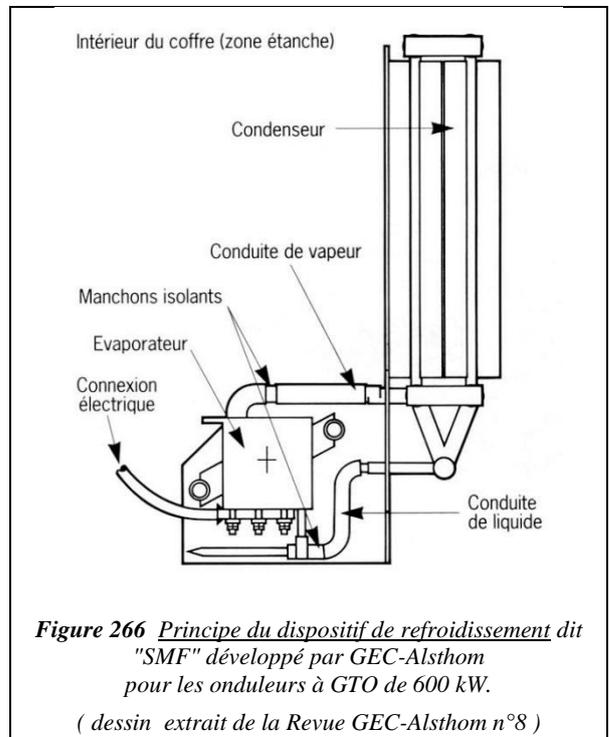


Figure 266 Principe du dispositif de refroidissement dit "SMF" développé par GEC-Alsthom pour les onduleurs à GTO de 600 kW.

(dessin extrait de la Revue GEC-Alsthom n°8)

masse desquels sont ménagés des canaux qui débouchent sur des tubulures d'entrée et de sortie raccordées au circuit condenseur ; ce raccordement doit être flexible et comporter impérativement des manchons isolants en céramique.



Quant au circuit condenseur, il est constitué d'un ensemble de tubes verticaux sur lesquels sont soudées les ailettes assurant l'échange thermique avec l'air extérieur. Les sorties et entrées des plots évaporateurs aboutissent à un dispositif collecteur qui constitue un socle de base du condenseur. Enfin, l'ensemble est partiellement rempli d'un liquide caloporteur (de type "fréon", à l'instar des cuves ou enceintes vues antérieurement).

Ce dispositif "SMF" fonctionne de la manière suivante : l'échauffement du fluide, au niveau des plots qui enserrant les cellules, provoque son évaporation ; la vapeur, sortant par les tubulures de raccordement de grand diamètre, arrive à la base du condenseur d'où elle pourra s'élever dans les tubes verticaux ; son refroidissement, à leur contact, produit leur condensation et le liquide retombe dans la partie du collecteur de base pour revenir aux plots évaporateurs par les entrées raccordées par des tubulures de plus petit diamètre, d'où une circulation naturelle du liquide selon le principe du "thermo-siphon". Cela, n'est pas sans rappeler ce qui se passait dans les très grosses enceintes de la BB 10003, équipées elles aussi de condenseurs à tubes verticaux (voir *La Revue 3EI* n°40, p. 83 et 84). En fait, il s'agit d'une extrapolation en capacité d'évacuation thermique des dispositifs dits "caloduc" parfois utilisés en électronique bas niveau.

Une fois les panneaux "SMF" refermés, tous les organes susceptibles d'être sous tension (semi-conducteurs, composants périphériques et allumeurs) sont enfermés dans le coffre onduleur étanche, à l'abri de la pollution. Cet aspect est un grand avantage que seules les enceintes à composants immergés procuraient jusqu'alors ; par ailleurs, la maintenance des dispositifs "SMF" est rendue beaucoup plus facile que celle des enceintes car le fluide frigorigène n'est manipulé en aucun cas. D'après GEC-Alsthom, cette technique de refroidissement, susceptible d'évacuer 4 kW en convection naturelle, peut aussi être étendue à des équipements de puissance supérieure à 600 kW (pouvant même atteindre 1600 kW sous 1500 V=) mais en utilisant une ventilation forcée.

Avant d'en terminer avec la partie puissance des onduleurs "métro" à GTO, il peut être intéressant, à titre documentaire, de voir l'aspect extérieur des moteurs asynchrones, à cage d'écureuil, qu'ils alimentent ; la *figure 267* montre bien la compacité propre à ce type de machines.

C'est aussi à titre documentaire qu'est donnée la *figure 268* représentant les caractéristiques effort-vitesse (en traction et freinage) des rames MF 88 et MP 89. La très forte adhérence apportée par les pneumatiques des rames MP 89 permet de presque doubler l'effort au démarrage ; ce que permettent les équipements onduleurs et moteurs asynchrones décrits ci-dessus.

Commande des onduleurs "métro" : Ces onduleurs de tension utilisent, tout naturellement, le procédé "MLI" sur le principe duquel il est inutile de revenir.

Cependant, les évolutions importantes dans le domaine des circuits électroniques "bas niveau"

(apparition des micro-contrôleurs en particulier) ont permis, entre autre, de réaliser une commande de

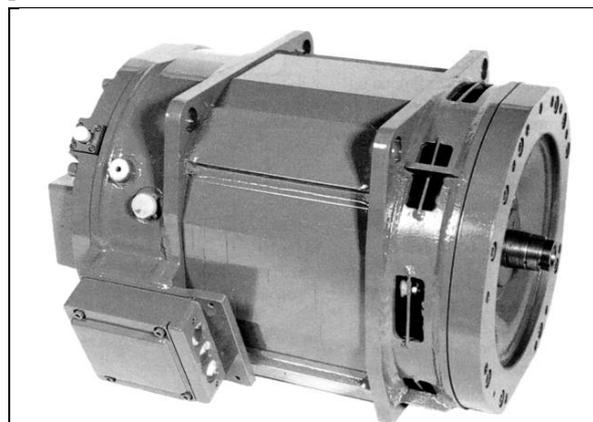


Figure 267 Vue de l'un des moteurs asynchrones de traction qui équipent les rames MF 88 du métro parisien à essieux indépendants (lesquelles circulent sur la ligne 3 bis) ; sa puissance de définition est de 220 kW à 2100 tr/min.

Une version, définie pour 300 kW, équipe les nombreuses rames MP 89 qui circulent sur les lignes 1 (conduite manuelle classique) et 14 (rames automatiques, sans conducteur) ; ils ont alors 2 bouts d'arbre car ils entraînent les 2 essieux d'un bogie classique.

(photographie extraite de la Revue GEC-Alsthom n°8)

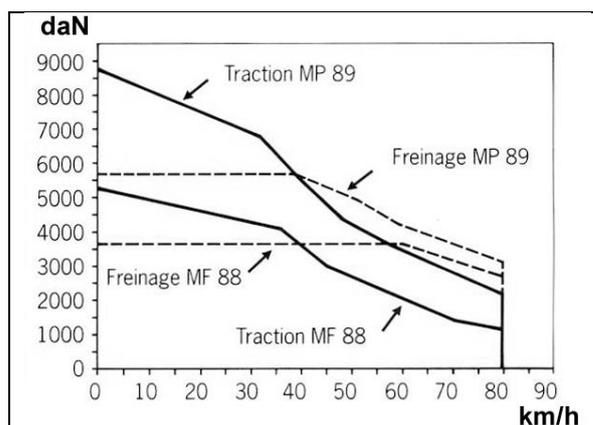
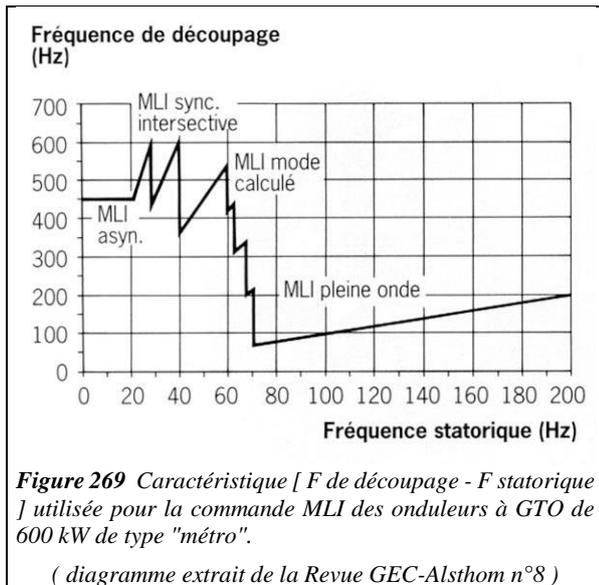


Figure 268 Caractéristiques effort-vitesse des rames MP 88 et MP 89 de la RATP. La très forte adhérence des matériels à roulement "pneumatique" (MP 89) permet de presque doubler l'effort au démarrage ; la puissance de définition des moteurs de traction est portée à 300 kW mais ils sont alimentés par les mêmes onduleurs à GTO.

(diagramme extrait de la Revue GEC-Alsthom n°8)

l'onduleur très évoluée, dite "pilotage vectoriel", à laquelle est associé à un mode de découpage MLI qui diffère selon la fréquence de sortie, donc de la vitesse. Il s'agissait, dans ce cas, d'optimiser les possibilités de commutation des bras onduleurs (nous avons vu que les commutations des GTO ne vont pas sans provoquer des pertes assez importantes, dans les circuits "snubbers" en particulier) et la nécessité de minimiser l'amplitude des composantes harmoniques du courant appelé à la ligne d'alimentation.

La caractéristique faisant apparaître les 4 modes de découpage MLI différents, utilisés successivement au cours d'une montée en vitesse d'une rame MF 88 ou MP 89, est représentée à la *figure 269*.



- les modes dits à MLI asynchrone (la F de découpage est fixe et indépendante de la F statorique), puis synchrone intersective, utilisés du démarrage jusqu'à 60 km/h (les tensions statoriques sont alors < 70 % de leur valeur max.), ont déjà été rencontrés antérieurement (Z 4212 et BB 10003 de la SNCF) car leur obtention au moyen des circuits analogiques disponibles les rendait pratiquement seuls réalisables aux époques concernées.
- le mode **MLI calculé** est employé pour l'obtention de formes d'onde définies préalablement par calcul afin de minimiser (et ce avec des valeurs de fréquence de découpage relativement faibles) les composantes harmoniques des rangs inférieurs, particulièrement nocifs, en cas de situation anormale, pour les circuits de voie à 50 Hz encore utilisés sur les lignes du métro parisien ; les valeurs des angles de découpe nécessaires à l'obtention des formes de tensions statoriques requises sont mémorisées dans les circuits de commande.
- enfin, le mode "pleine onde" bien connu, procurant les tensions statoriques d'amplitude maximale avec la fréquence de découpage la plus faible, permet, d'après le constructeur de l'onduleur, d'obtenir un rendement > 99 %.

On constate aussi que la fréquence de découpage maximale de 600 Hz est très peu employée (évacuation des pertes oblige). En complément, la *figure 270* montre l'allure des courants statoriques pour les 4 modes de découpage MLI cités ci-dessus ; cette figure diffère très peu de celle rencontrée à propos de la BB 10003 (voir *La Revue 3EI* n°40, p. 81).

Abordons maintenant, mais très succinctement, la méthode de commande de l'onduleur, autrement dit son pilotage, propre à donner aux moteurs asynchrones des caractéristiques effort-vitesse adaptées à la traction.

Il s'agit, comme amplement dit et développé antérieurement, de jouer judicieusement sur les 2 seuls moyens de réglage dont on dispose, à savoir la tension et la fréquence des sorties triphasées de l'onduleur.

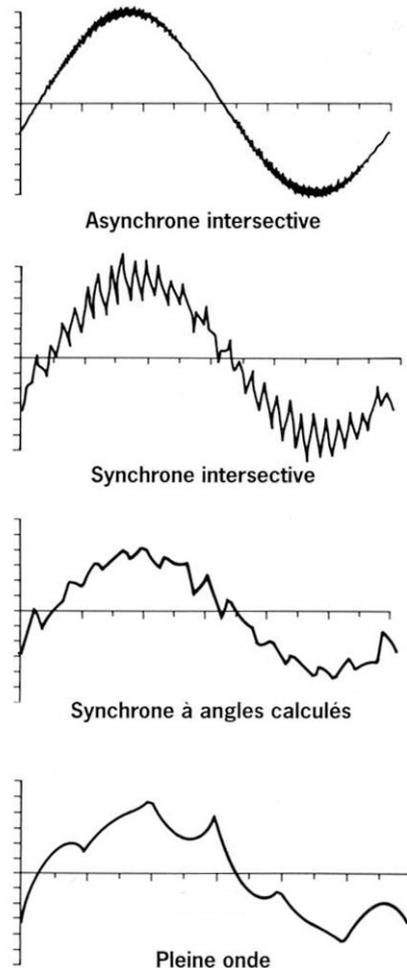


Figure 270 Chronogrammes des courants statoriques obtenus selon les 4 modes de découpe MLI successifs
(diagramme extrait de la Revue GEC-Alstom n°8)

Les réalisations expérimentales décrites jusqu'à présent (Z 4212 et BB 10003 de la SNCF) faisaient appel au contrôle du couple par le flux (réglé très imparfaitement par le rapport U/F) et le glissement (action sur la fréquence) ; malheureusement ces 2 grandeurs ne sont pas indépendantes mais s'influencent réciproquement. La Z 4212 utilisait toutefois une consigne de courant statorique comme consigne de couple mais des correcteurs, définis expérimentalement, devaient s'interposer (sur la BB 10003, on a utilisé des "boucles de flux", incorporées de construction dans les moteurs, pour améliorer le contrôle de ce flux précisément). N'utilisant, conjointement à la variation de fréquence statorique, que les amplitudes des courants et tensions statoriques, sans tenir compte de leur phase, la commande était dite "scalaire".

Les difficultés rencontrées pour parvenir à faire fonctionner à peu près convenablement ces engins expérimentaux, en particulier lors des régimes transitoires (en particulier les coupures brèves de la traction, suivies d'une reprise "au vol" sur un moteur encore fluxé), ont aussi été évoquées.

Il était donc indispensable, pour que le moteur asynchrone soit adopté définitivement en traction, d'utiliser un mode de contrôle des onduleurs qui maîtrise beaucoup mieux ces aléas et, pour ce faire, prenne en compte le comportement électrique interne du moteur au lieu de "l'approximer".

Sachant que le couple est en fait déterminé par le produit vectoriel du flux et du courant statorique, un mode de pilotage, dit tout naturellement "vectoriel", a donc pu être envisagé dès que l'on a été en mesure de fournir au moteur asynchrone des ondes de tensions et courants de composantes fondamentales pratiquement sinusoïdales et dont on a pu en contrôler l'amplitude et la phase avec une grande précision. Mais encore fallait-il donner à l'onduleur de tension des signaux de commandes convenables.

Le principe de ce mode de pilotage repose sur la transformation mathématique des grandeurs physiques alternatives triphasées (2 courants et 2 tensions), mesurées au stator, en grandeurs vectorielles continues définies dans un repère tournant à 2 axes en quadrature attaché au rotor et dont l'axe "direct" porte le flux et la composante "Isd" du courant (courant magnétisant).

Seul un calculateur numérique puissant et rapide pouvait donc, à partir de ces mesures : extraire les grandeurs vectorielles nécessaires à la détermination du couple instantané réel (flux et composante en quadrature "Isq" du courant), comparer le couple ainsi calculé à une consigne et, après corrections appropriées (dites découplage, dissociant le flux et la composante "Isq" vis à vis de la variation de l'amplitude des tensions statoriques), générer (par traitement inverse) les ordres de commande de l'amplitude et de la phase de la tension de sortie de l'onduleur.

Ce n'est qu'à l'arrivée des circuits micro-électroniques indispensables (micro-contrôleurs, coprocesseurs mathématiques, convertisseurs analogiques / numériques rapides nécessaires aux mesures, etc...) que la commande vectorielle des moteurs asynchrones a pu réellement se développer.

La description détaillée de la méthode utilisée ne sera pas faite présentement mais on peut se référer aux nombreux articles spécialisés (écrits par des universitaires ou des constructeurs) la traitant plus ou moins simplement et plus ou moins concrètement. On citera, en particulier, les articles parus dans *La Revue 3EI* n°34 - p.14, ainsi que dans le n°37 - p.6.

La commande vectorielle donne la possibilité, tant recherchée, de faire fonctionner un moteur asynchrone à l'image d'un moteur à courant continu à excitation séparée ; comme pour ce moteur, on contrôle bien le couple par l'excitation (ici le flux, qui n'est plus fixe mais calé sur l'axe "direct" d'un repère tournant) et par le courant (ici la composante du courant statorique en quadrature avec le flux tient lieu de courant d'induit). Cette similitude a aussi été mise à profit dans l'industrie, déjà principale utilisatrice de moteurs asynchrones alimentés directement par le réseau. Le poids économique des équipements industriels a beaucoup incité les constructeurs à développer les chaînes asynchrones (moteurs-onduleurs de tension-commande

vectorielle) qui sont maintenant devenues indispensables dans les domaines où une vitesse variable à très bon comportement dynamique est nécessaire. Les équipements spécifiques à la traction, de bien moindre diffusion mais cependant de plus grande exigence en ce qui concerne les aspects masse, volume, évacuation thermique et fiabilité, ont, par la suite et tout naturellement, beaucoup profité de cet important développement industriel.

Mais dès 1988 GEC-Alsthom a développé, pour les besoins "métro" notamment, une commande vectorielle de base, modulaire (à cartes standardisées), adaptée aux spécificités de la traction et que l'on rencontrera ultérieurement sur l'ensemble des matériels asynchrones de ce constructeur (rames TMST, BB 36000, notamment pour ce qui concerne les équipements à GTO). La *figure 271*, montre l'association de cette commande (dite "AGATE" pour : Advanced GEC-Alsthom Traction Electronics) avec l'onduleur MLI à GTO de 300 kW installé sur les rames MF 88 et MP 89 de la RATP.

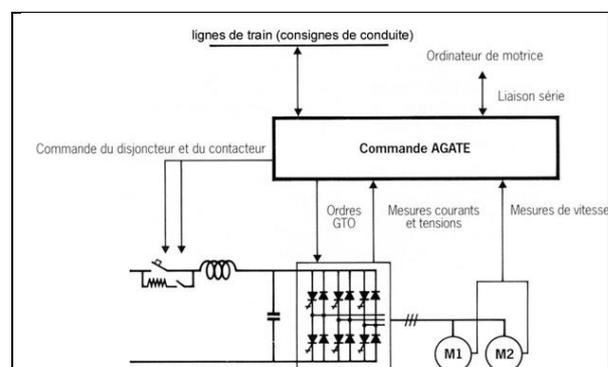


Figure 271 Association de la commande vectorielle "AGATE", de GEC-Alsthom, à l'onduleur MLI de 300 kW à GTO des rames MF 88 et MP 89 du métro parisien.

(*extrait de la Revue Technique GEC-Alsthom n°8*)

Le constructeur mettait alors l'accent sur les grandes qualités de la commande vectorielle qu'il avait développée ; si, aujourd'hui, elles peuvent sembler très ordinaires en traction ferroviaire, elles n'étaient pas évidentes à obtenir à l'époque.

Citons GEC-Alsthom (*Revue Technique* n° 8) :

- réponse très rapide du flux et du couple (typiquement moins d'une seconde pour un moteur défluxé) avec un contrôle optimal du courant
- bonnes performances dynamiques du contrôle du couple dans toute la plage de vitesse
- surintensités maîtrisables évitant l'arrêt de l'onduleur en cas de décollement de pantographe (frotteur dans le cas des rames "métro")
- reprise de l'effort, suite à une coupure brève de la traction, sans attendre la disparition du flux dans le moteur (la tension de l'onduleur est adaptée à la fém du moteur)."

Les divers intervenants des expérimentations SNCF (Z 4212 et surtout BB 10003) n'avaient pu, moins de 10 ans avant, faire état d'un tel palmarès ; les principes de la commande vectorielle étaient pourtant déjà "dans l'air" mais les composants permettant de la

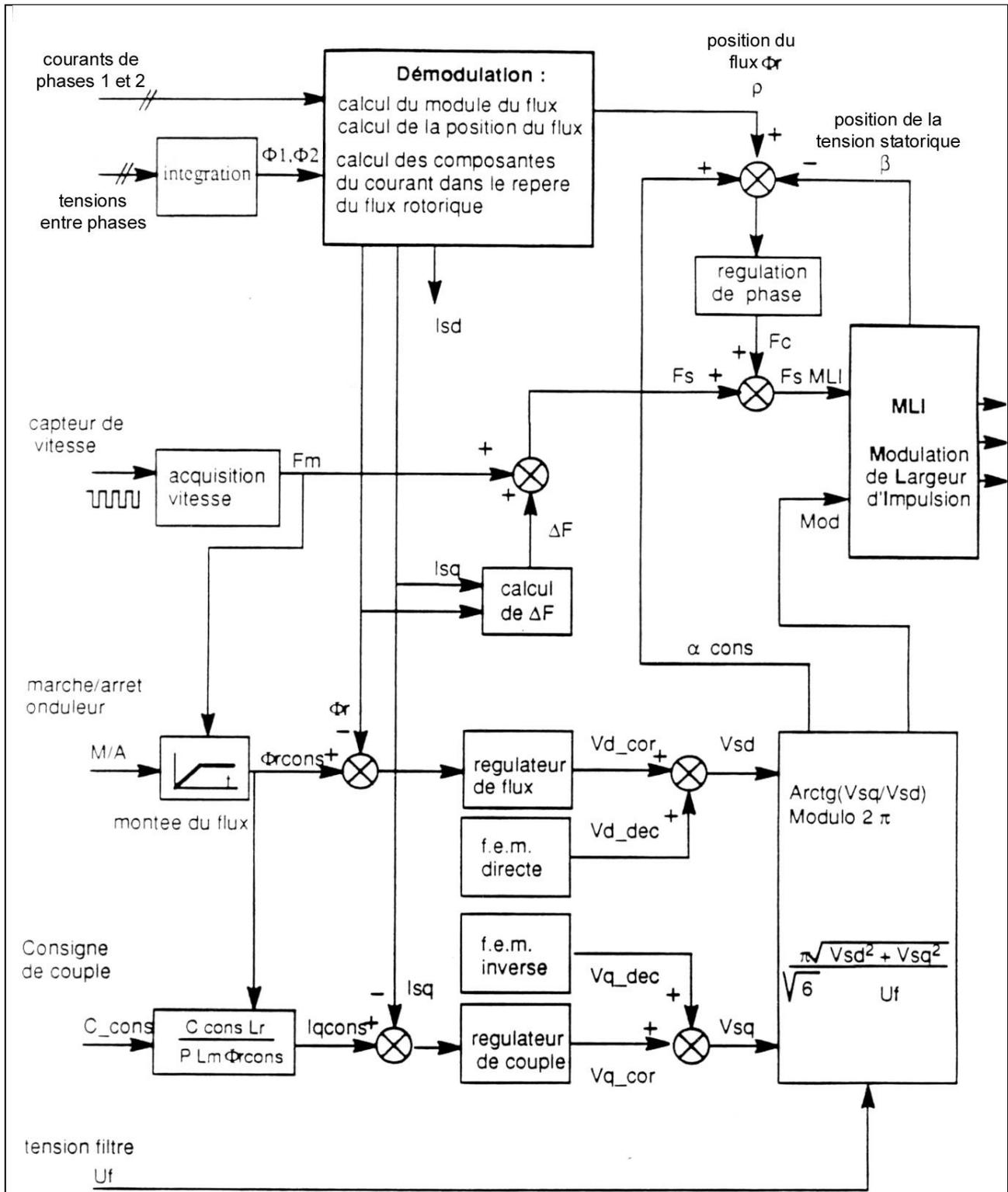


Figure 272 *Diagramme fonctionnel de la commande vectorielle "AGATE" développée par GEC-Alsthom pour le pilotage d'un onduleur de tension, à découpage MLI, alimentant un moteur asynchrone de traction. Cet ensemble modulaire, mettant en œuvre des cartes standardisées (utilisant, entre autre, des micro-contrôleurs), a tout d'abord été utilisé pour la commande des onduleurs à GTO des matériels "métro" de la RATP ; il a, par la suite, été installé sur des matériels de forte puissance à onduleurs à GTO également (TGV TransManche, locomotives BB 36000 entre autres).*

(extrait d'une note GEC-Alsthom Villeurbanne "chaînes de traction à moteurs asynchrones et onduleurs de tension" - février 1991)

réaliser en équipement embarqué sur du matériel de traction n'étaient pas encore disponibles. La figure 272, ci-dessus, présente le principe de la régulation vectorielle, spécifique à la traction, mise au point par

GEC-Alsthom. La détermination du flux, s'appuyant sur une mesure (boucle de flux interne au moteur) ou sur un calcul à partir des caractéristiques du moteur (cas de la commande AGATE des TGV TransManche, par



exemple), doit tenir compte des chutes de tension dans les résistances des enroulements statoriques, lesquelles varient évidemment avec la température. Ces chutes résistives ne peuvent pas être négligées devant les tensions d'alimentation, tout particulièrement aux faibles vitesses de démarrage où ces dernières sont nécessairement réduites ; cette fonction correctrice particulière n'apparaît pas sur le diagramme fonctionnel de la *figure 272*. On y trouve cependant les corrections de "découplage" (V_{d_dec} et V_{q_dec}) appliquées aux composantes directe et en quadrature de la tension statorique (V_{sd} et V_{sq}) ; impliquant les fém internes, leur calcul utilise les valeurs des diverses inductances et résistances propres au moteur et donc connues pour un type donné.

Il est évident que lorsque le découpage MLI de l'onduleur a atteint sa limite et que l'on passe en régime pleine onde ; les tensions statoriques sont au maximum et le flux décroît avec l'accroissement de la fréquence, donc de la vitesse. L'amplitude et la phase des tensions ne pouvant plus être contrôlées, la régulation du couple ne peut agir que sur l'amplitude des courants statoriques par variation du glissement et l'on retrouve une commande du type "scalaire"

1989 : les rames TGV TransManche ou "Eurostar"

C'est fin 1989 que le matériel nécessaire au trafic international à grande vitesse, entre la France, la Belgique et la France via le tunnel sous la Manche, a été commandé par les 3 administrations ferroviaires concernées (SNCF, SNCB et British Rail) à plusieurs constructeurs européens (Alstom et De Dietrich en France, GEC en Angleterre et ACEC en Belgique) ; Alstom et les branches transport de GEC et des ACEC ayant ensuite très rapidement fusionné sous le sigle GEC-Alstom.

Le matériel commandé consistait en 31 rames de 18 remorques encadrées par 2 motrices de 6 MW chacune (sous 25 kV). La photographie de la *figure 273* représente, en premier plan, l'une des motrices de ces rames au "design" assez différent, à l'époque, des TGV de la SNCF et qui découle en partie des exigences du gabarit des lignes britanniques.



Figure 273 Vue d'une rame tricourant TGV TransManche du parc "Eurostar". La rame complète de 18 remorques encadrées par 2 motrices a une longueur d'environ 400 m, sa masse en charge est de 816 tonnes ; la puissance totale de 12 MW, développée seulement sous 25 kV, permet une vitesse maximale à 300 km/h.

(cliché SNCF extrait de la RGCF, 2ème partie, mars 2002)

Afin de pouvoir obtenir une puissance de plus de 6 MW sans dépasser la charge maximale de 17 t par essieu, imposée par la SNCF pour les circulations sur ses lignes à grande vitesse, il a été nécessaire de revenir à la configuration à 3 bogies moteurs par extrémité adoptée sur les premières rames TGV (PSE) de la SNCF, donc avec 12 moteurs pour une rame, mais avec une puissance pratiquement doublée. A cette époque, la SNCF recevait ses rames TGV Atlantique de 8 MW, à 8 moteurs synchrones autopilotés ; ces machines sont autoventilées et pèsent 1450 kg. Bien que de puissance (ramenée au niveau d'un seul moteur) très comparable, c'est une chaîne de traction à moteurs asynchrones et onduleurs de tension qui a été choisie pour les rames TransManche ; l'arrivée des GTO de type "grande traction", capables de commuter 3000 A sous 4500 V, et les qualités de la commande vectorielle, désormais "de rigueur", ont permis de sauter le pas et d'entrer dans l'ère asynchrone pour les matériels puissants.

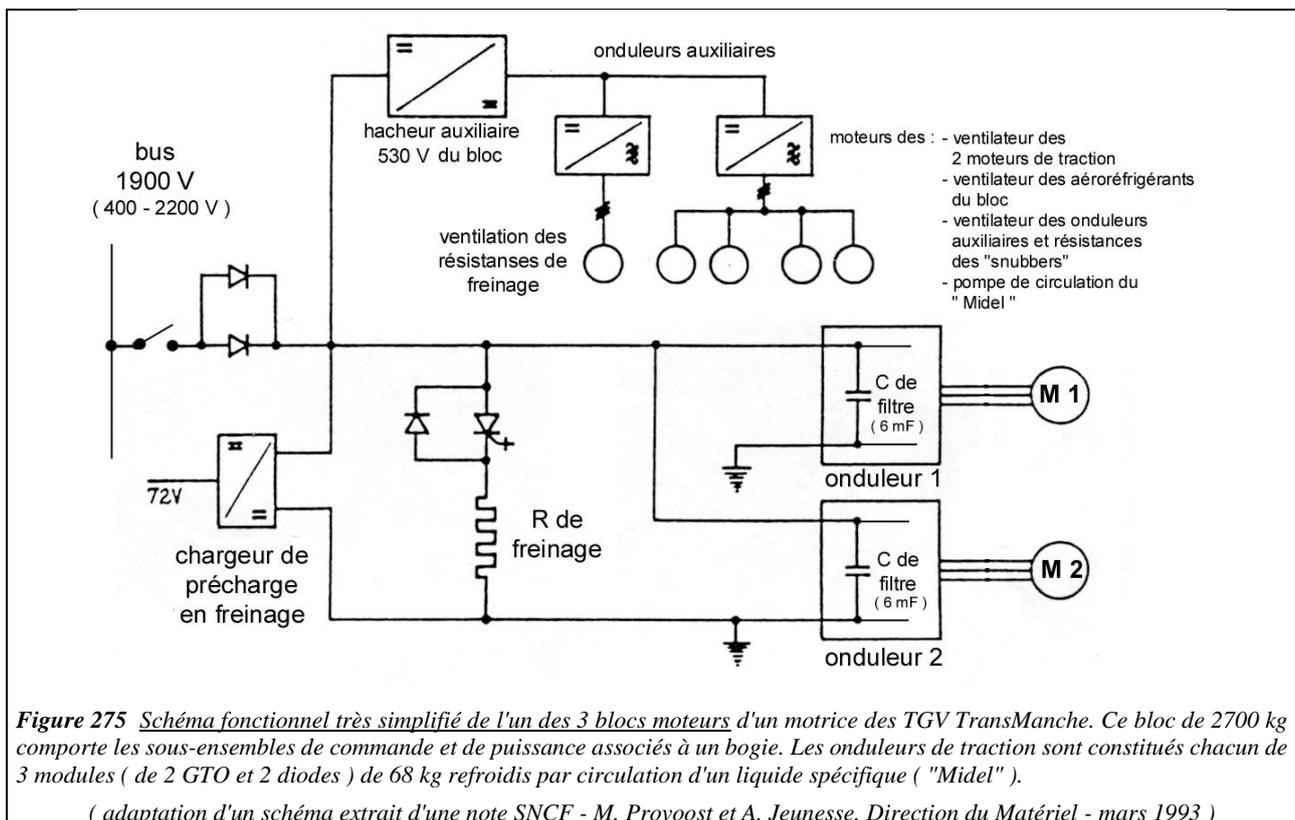
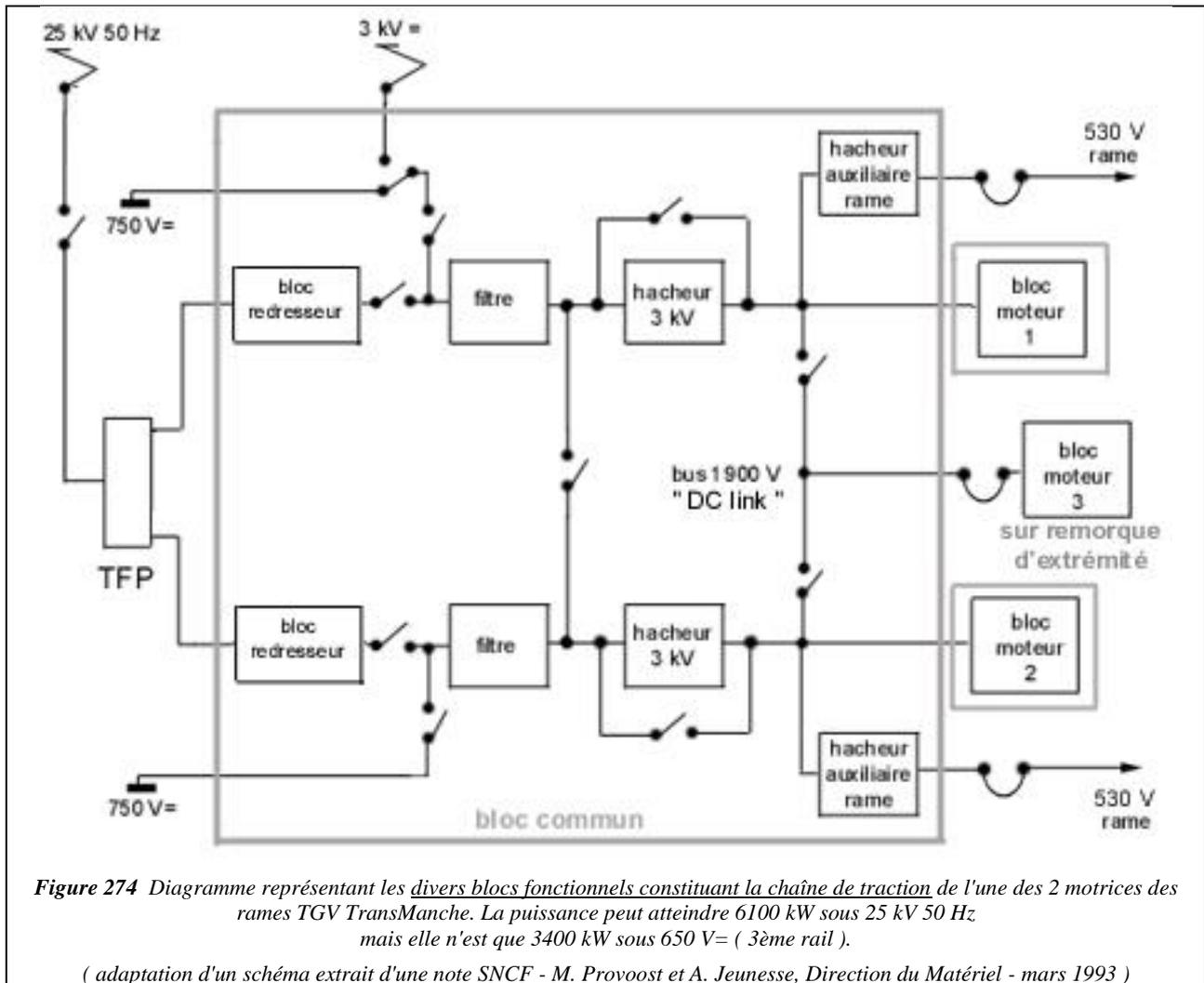
Les moteurs de traction des rames TransManche, fabriqués en Angleterre par la société Brush, sont des machines asynchrones à 6 pôles, définies pour 1020 kW à 4000 tr/mn et, pesant 1285 kg, sont un peu plus légers que leur "cousins" synchrones des rames Atlantique (lesquels nécessitent, par ailleurs, un circuit d'alimentation de l'excitation) mais ils nécessitent une ventilation forcée ; ils n'ont pas de "boucle de flux".

Contrairement à ce que nous venons de voir précédemment à propos des onduleurs à GTO de 600 kW des matériels "métro" qui alimentent 2 moteurs en parallèle (ce qui exige, malgré tout, un faible écart entre les diamètres des roues des 2 essieux respectifs), le choix s'est porté sur une alimentation des moteurs par des onduleurs individuels de 1000 kW ; à la fois pour des raisons fonctionnelles et pour limiter les conséquences d'une avarie survenant à un onduleur (un seul moteur est neutralisé au lieu de 2).

C'est d'ailleurs le souci d'une disponibilité maximale des équipements qui a conduit à réduire les équipements non "redondés" aux seuls transformateur (sous 25 kV) et filtre d'entrée sous 3 kV. L'absence d'une ligne 25 kV de toiture, résultant apparemment d'une exigence britannique, va cependant à l'encontre de ce principe car elle empêche l'alimentation d'une motrice en cas d'avarie à son pantographe ou à son disjoncteur.

La nécessité de fonctionner sous les 3 tensions rencontrées au long d'un parcours Paris-Londres ou Bruxelles-Londres :

- 25 kV 50 Hz sur la ligne à grande vitesse Nord de la SNCF et son prolongement
- 3000 V= sur les lignes belges (SNCB)
- 750 V= sur le 3ème rail de la ligne anglaise, entre le tunnel et Londres (BR, à l'époque), cette tension, typiquement "métro", pouvant d'ailleurs descendre exceptionnellement jusqu'à 400 V. La ligne à grande vitesse entre Londres et le tunnel, alimentée en 25 kV 50 Hz, n'ayant été mise en service que très récemment et que partiellement à ce jour.



Les puissances maximales respectives, correspondant à ces 3 types de courant sont : 12200, 5700 et 3400 kW (pour 650 V au 3ème rail britannique). Cette diversité dans les tensions a conduit à un schéma assez complexe où les contacteurs permettant de passer d'une configuration à une autre sont nombreux. Le schéma fonctionnel des équipements d'une motrice, représenté à la *figure 274*, donne une idée des dispositions adoptées.

Les 3 blocs moteurs à onduleurs de tension sont alimentés par une tension continue d'une valeur nominale de 1900 V (susceptible d'atteindre, selon le type de courant utilisé, les valeurs extrêmes de 400 ou 2200 V) ; cette tension alimente aussi 2 hacheurs auxiliaires délivrant 530 V à tous les auxiliaires de la rame (sauf ceux des blocs moteurs qui sont alimentés par leur propre hacheur auxiliaire). Le terme "bus" 1900 V, utilisé pour désigner cette alimentation principale découle du terme anglais "DC link".

On voit, comme déjà évoqué plus haut, que pratiquement tous les équipements sont doublés (y compris les frotteurs 750 V, installés sur chacun des bogies). Le nombre de contacteurs permettant les diverses configurations et les redondances en cas d'avarie est donc important ; il faut leur ajouter les contacteurs d'isolement (non représentés) qui sont montés en entrée de chacun des 3 blocs moteurs. Tous les éléments d'alimentation du "bus 1900 V" (redresseurs, filtres, hacheurs et certains convertisseurs auxiliaires, tels les onduleurs des compresseurs d'air et les chargeurs de batteries, non représentés) sont installés dans un bloc, dit "bloc commun", de 6,4 tonnes.

Quant aux 3 blocs moteurs, alimentant chacun les 2 moteurs d'un bogie, 2 sont installés sur la motrice tandis que le 3ème se trouve sur la remorque d'extrémité motorisée. Ces ensembles de 2700 kg, indépendants l'un de l'autre, contiennent les 2 onduleurs de tension de 1000 kW à GTO et divers convertisseurs auxiliaires dont un dispositif, alimenté par la batterie, de pré-charge des condensateurs du filtre indispensable pour amorcer le freinage en cas de disparition ou de valeur insuffisante de la tension du "bus 1900 V". En effet, l'exigence d'un freinage dit "de sécurité" en traction asynchrone, réclame en permanence une tension suffisante en entrée de l'onduleur pour pouvoir "fluxer" le moteur utilisé alors en hypersynchrone ; les 2 onduleurs débitent alors en parallèle, via un hacheur de réglage, dans des résistances communes. La diversité des tensions d'alimentation et le haut niveau de sécurité requis ont pratiquement interdit le freinage par récupération sur les rames TransManche. La *figure 275* représente les divers éléments d'un bloc moteur.

Les onduleurs sont, bien sûr, commandés selon le mode vectoriel (commande du type AGATE de GEC-Alsthom) jusqu'à la vitesse d'environ 195 km/h (sous 1900 V) où le découpage MLI passe en mode pleine onde. On procède à une montée en fréquence selon un assez grand nombre de modes de découpage successifs : asynchrone intersectif, synchrones intersectifs, calculés, puis enfin pleine onde. Selon la

tension d'alimentation et l'optimisation de la commande qui en découle, le passage en pleine onde se fait entre 80 et 120 Hz ; on atteint alors la zone dite d'équi-puissance de la caractéristique effort-vitesse. Pour les modes de découpage MLI, la fréquence maximale utilisée est de 600 Hz ; il s'agit de la limite permise par les GTO de 4500 V - 3000 A nécessaires pour obtenir 1000 kW sous la tension nominale de 1900 V.

En 25 kV-50 Hz, la tension de 1900 V d'alimentation des 2 "DC link" est fournie par 2 ensembles redresseurs dont le schéma de principe de l'un d'eux est donné à la *figure 276*, un pont à diodes et un pont mixte à thyristors conventionnels ont leurs sorties redressées connectées en série pour alimenter un filtre LC ; les 2 filtres sont ensuite utilisés en commun (en situation normale) pour les 3 blocs moteurs.

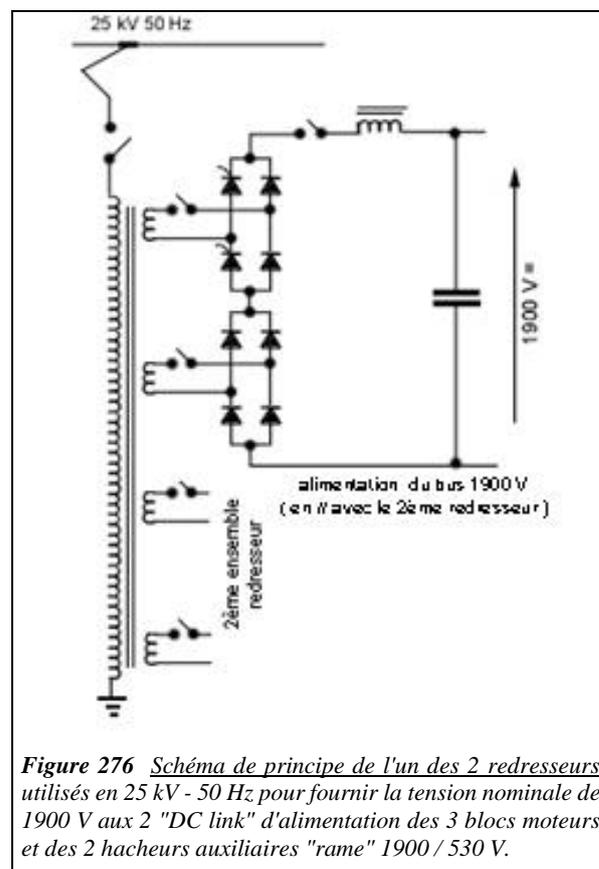


Figure 276 Schéma de principe de l'un des 2 redresseurs utilisés en 25 kV - 50 Hz pour fournir la tension nominale de 1900 V aux 2 "DC link" d'alimentation des 3 blocs moteurs et des 2 hacheurs auxiliaires "rame" 1900 / 530 V.

Par ailleurs, chacun des 2 enroulements secondaires possède un circuit LC, non représenté ($L=3,3$ mH et $C=0,4$ mF), dit "AFP" (amélioration du facteur de puissance), mis en service par un interrupteur statique constitué de 4 thyristors (connectés en série-parallèle).

En complément à la *figure 275*, la *figure 277* ci-après, représente le schéma de principe des 2 onduleurs de 1000 kW à GTO de chacun des 3 blocs moteurs avec le dispositif de freinage sur résistance constitué d'un dispositif de réglage de la résistance et d'un convertisseur 72 / 1900 V de pré-charge des condensateurs d'entrée (6 mF au total), indispensable à l'amorçage du freinage en absence, ou insuffisance, de la tension du bus 1900 V.

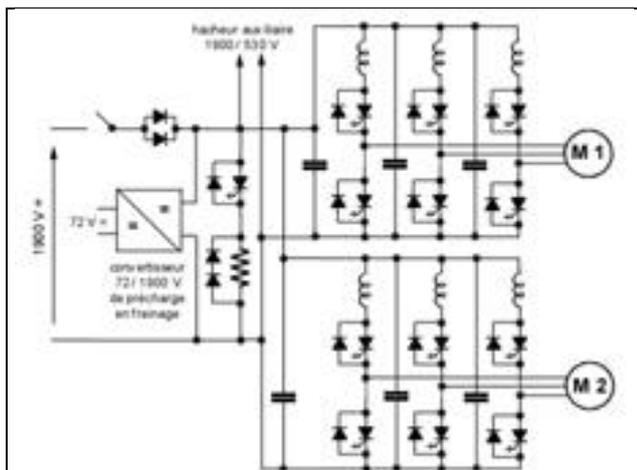


Figure 277 Schéma des 2 onduleurs de tension à GTO de 1000 kW, installés dans chacun des 3 blocs moteurs d'une motrice. Chacune des 3 phases d'un onduleur possède son propre condensateur de 1 mF en entrée ainsi qu'une self de limitation en di/dt de 10 μ H. La résistance de freinage est "modulée" par un hacheur, également à GTO.

Pour ce qui concerne les équipements onduleurs de tension, les cellules des 2 GTO et de leurs diodes antiparallèles constituant l'un des 3 bras d'un onduleur, sont assemblés sous la forme d'un module "embroachable" de 68 kg qui comporte également une partie des circuits snubbers (la résistance de forte puissance étant à l'extérieur) ainsi que l'électronique de commande (allumeurs) et de contrôle ; il y a donc 3 modules pour un onduleur de 1000 kW. Ils sont de conception très différente de ce qui a déjà été rencontré

sur les matériels SNCF de par le mode de refroidissement utilisé ; ce dernier, jusqu'alors non utilisé à la SNCF, a été développé par l'usine GEC-Alsthom de Manchester qui a construit l'ensemble des équipements de puissance.

Il consiste en une circulation forcée d'huile ("Midel") au travers de plots (disposition assez comparable à celle des panneaux "SMF" des onduleurs de 700 kW de la RATP, vus précédemment) entre lesquels sont insérées les cellules. Une pompe force le liquide à circuler dans des aéro-réfrigérants, extérieurs aux blocs, où il se refroidit. Le fait que les modules soient "embrochables" implique la présence de coupleurs hydrauliques assez spéciaux qui se ferment automatiquement lors de l'extraction afin de retenir la totalité du liquide contenu dans le module.

Les figures 278 et 279 illustrent assez bien les dispositions inhabituelles qui ont été mises en œuvre.

Sur la vue arrière du module (à gauche de la figure 278), on voit, de chaque côté de la partie basse, les 2 raccords hydrauliques évoqués plus haut. Les broches de forte et moyenne puissance, plus classiques, occupent tout le panneau arrière tandis que les flancs sont occupés par les circuits électroniques de commande et contrôle des GTO.

En premier plan de la face avant du module, représentée à droite, on remarque les 2 collecteurs de liquide sur lesquels sont raccordées les tubulures isolantes flexibles d'entrée et sortie de chacun des 5 plots de refroidissement.

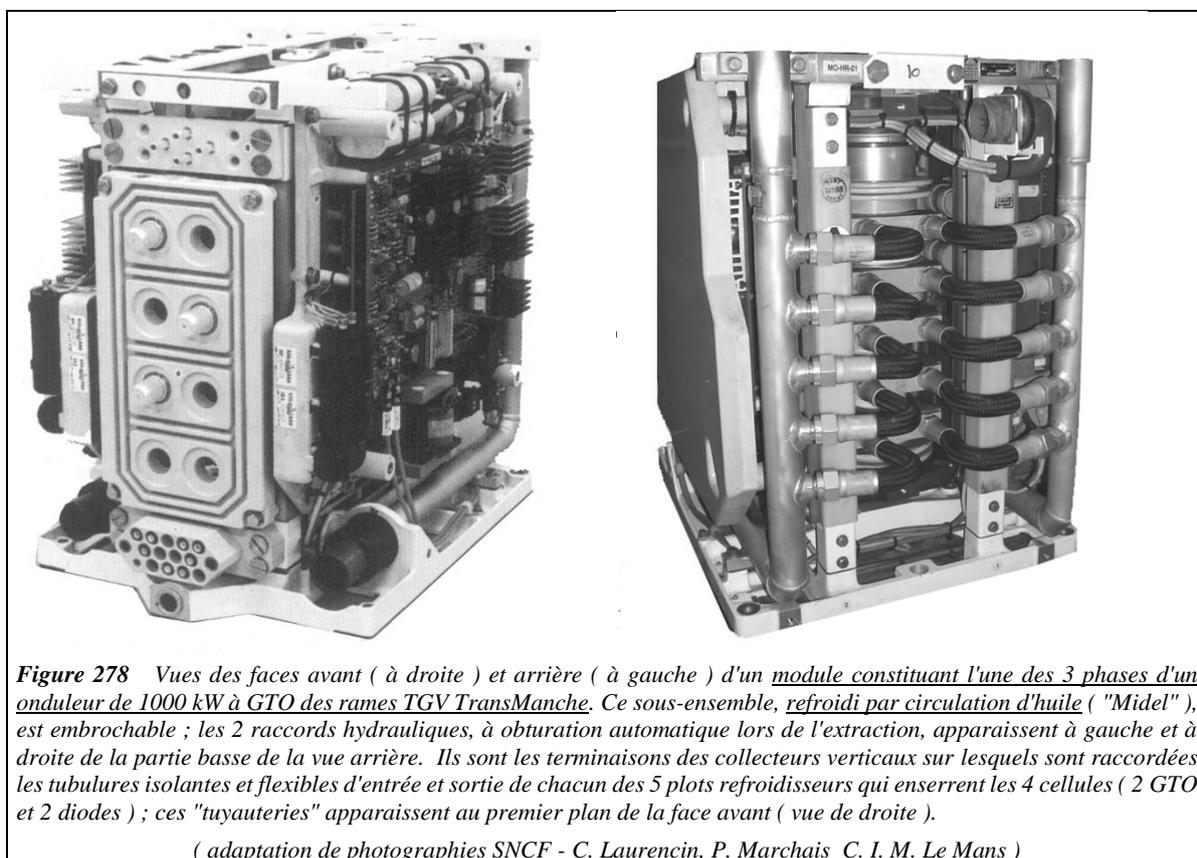


Figure 278 Vues des faces avant (à droite) et arrière (à gauche) d'un module constituant l'une des 3 phases d'un onduleur de 1000 kW à GTO des rames TGV TransManche. Ce sous-ensemble, refroidi par circulation d'huile ("Midel"), est embrochable ; les 2 raccords hydrauliques, à obturation automatique lors de l'extraction, apparaissent à gauche et à droite de la partie basse de la vue arrière. Ils sont les terminaisons des collecteurs verticaux sur lesquels sont raccordées les tubulures isolantes et flexibles d'entrée et sortie de chacun des 5 plots refroidisseurs qui enserrnent les 4 cellules (2 GTO et 2 diodes) ; ces "tuyauteries" apparaissent au premier plan de la face avant (vue de droite).

(adaptation de photographies SNCF - C. Laurencin, P. Marchais C. I. M. Le Mans)



Quant à la *figure 279*, ci-dessous, elle montre le détail du montage de compression des 4 cellules (les GTO, de grand diamètre et dont on voit les câbles de gâchette, sont montés de part et d'autre des diodes) entre 5 plots de refroidissement dont les tubulures isolantes, d'entrée et sortie du liquide de refroidissement, apparaissent en arrière plan.

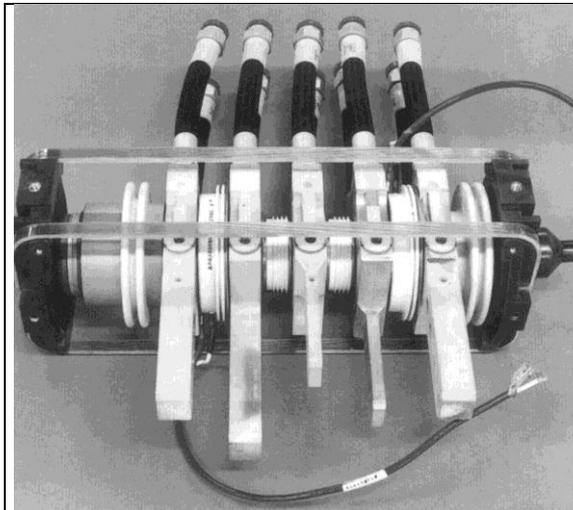


Figure 279 *Vue de détail de l'empilage des semi-conducteurs d'une phase onduleur constituée par le module dont les faces, avant et arrière, sont vues sur la figure 278. Les 2 sangles isolantes (en "fibre de verre") maintiennent l'ensemble en compression.
(photographie SNCF - Direction du Matériel)*

On remarquera aussi les 2 sangles, en matériau isolant fibreux, très résistant à l'allongement et à la rupture, qui maintiennent l'empilage en compression ; elles se substituent ainsi aux tirants et canons isolants utilisés traditionnellement et constituent également une originalité.

Du côté des équipements auxiliaires, les multiples convertisseurs ont été réalisés par les Ateliers de Constructions Electriques de Charleroi (ACEC). S'ils sont, en grande partie, issus fonctionnellement de leurs homologues installés sur les rames TGV Atlantique de la SNCF, ils en diffèrent de par leur mode de construction et surtout par leurs circuits de commande qui font, ici, appel aux micro-contrôleurs et EPROM. Cela est vrai pour les divers chargeurs de batteries de 10 et 30 kW, à double résonance et à GTO et pour les gros onduleurs de 300 kVA, eux aussi à GTO.

Mais, en ce qui concerne les très nombreux onduleurs de 30 kVA d'alimentation en triphasé des nombreux moteurs auxiliaires des blocs communs et blocs moteurs, ainsi que des 4 compresseurs d'air (la plupart à vitesse variable), ils sont issus des excellents onduleurs à transistors des locomotives BB 26000 mais dont la puissance a été portée à 40 kVA sans aucune difficulté.

L'alimentation de ces convertisseurs, sauf ceux des blocs moteurs, est assurée conjointement, au moyen de circuits "OU" à 2 diodes, par les 2 lignes 530 V qui parcourent la rame d'une motrice à l'autre, tel que le laisse entrevoir la *figure 274*.

Une particularité des rames TransManche réside dans la présence d'un retour des lignes 530 V entièrement câblé et non par les rails comme sur la plupart des autres matériels ; les risques de perturbation des circuits de signalisation en cas d'éventuelle anomalie de la voie (rail cassé par exemple) sont ainsi considérablement réduits.

A titre indicatif, le tableau ci-dessous fait le recensement des divers convertisseurs auxiliaires (onduleurs et chargeurs) et indique leur répartition sur la rame.

	Ond.de 40 kVA	Ond. de 300 kVA	Charg. de 10 kW	Charg. de 30 kW
sur les 2 blocs communs	8		2	
sur les 6 blocs moteurs	12			
sur R 1 et R 18 (motorisées)	4		4	
sur R 3 et R 16				2
sur R 5 et R 14		2		
sur R 7 et R 12				2
sur R 8 et R 11		2		
total	24	4	6	4

Les 31 rames TGV TransManche ont été livrées aux 3 réseaux utilisateurs dans les années 1993-1994. Ce furent les premiers matériels puissants à moteurs asynchrones mis en service à la SNCF. Les GTO, mais aussi et l'on pourrait presque dire surtout, les circuits micro-électroniques nécessaires au contrôle "fin" du moteur, ont enfin permis à ce type de machine d'être utilisé en traction de manière fort satisfaisante et performante. Le besoin de fonctionner sous 3 tensions différentes et de circuler sur des lignes équipées des divers systèmes de signalisation propres à chaque réseau (5 systèmes ont ainsi dû être "juxtaposés"), ont bien sûr conduit à une complexité dont la présente description, pourtant limitée aux équipements de puissance, a pu en donner un aperçu. Par la suite, 9 rames ont été adaptées pour fonctionner aussi en 1500 V= afin d'accéder aux lignes alpines de la SNCF.

Puis, il faudra ensuite attendre 1998 pour que la SNCF commande à la société ALSTOM la série des locomotives tri-courant BB 36000 de 5,6 MW, à 4 moteurs asynchrones de 1400 kW alimentés par des équipements (redresseurs, hacheurs et onduleurs) à GTO de 4500 V - 4000 A. Ces machines ne sont pas inconnues des lecteurs de *La Revue 3EI* puisqu'elles ont fait l'objet d'un article écrit par M. A.Jeunesse et M.Debruyne (voir le n°19, p.23) ; un petit complément leur sera tout de même consacré au prochain épisode en guise de clôture de la "période GTO", somme toute assez brève.

Bibliographie

- "Chaînes de traction à moteurs asynchrones et onduleurs de tension" - GEC Alsthom (établissement de Villeurbanne), février 1991
- Revue Technique GEC-Alsthom n°8 - février 1992
- "Développements récents de la traction triphasée à la SNCF" M. Provoost et A.Jeunesse - mars 1993
- Revue Générale des Chemins de Fer (2ème partie) - mars 2002

Vente au numéro

(liste complète sur le site www.see.asso.fr)

2004

- 01 - D : Les nanotechnologies
R : Imagerie pour les sciences du vivant
- 02 - D : Les composants de puissance
R : Influence de l'évolution de l'électronique
- 03 - D : Les systèmes de navigation maritime et fluviale
R : Electricité
- 04 - D : La supervision : outils et applications
R : L'Ultra Large Bande
- 05 - D : Les applications industrielles de l'induction
R : Le marquage dans l'industrie
- 6-7-D : Exploitation intelligente des senseurs dans les systèmes complexes
- 08 - D (1) : La foudre - D (2) : La compatibilité électromagnétique (CEM)
R : Le stockage de l'énergie au service du transport
- 09 - D : Méthodes et techniques optiques pour l'industrie
R : La transmission d'énergie sans fil
- 10 - D : Les véhicules propres
R : Les radiocommunications et leurs différentes formes
- 11 - D : L'Electrotechnique du futur
R (1) : L'éclairage - R (2) : La sûreté de fonctionnement

2005

- 01 - D : La logistique dans les transports (1^{ère} partie)
R : Les véhicules propres
- 02 - D : Logistique et transport (2^e partie)
R (1) : L'électrotechnique du futur - R (2) : Le développement du réseau de transport en France
- 03 - D : Les radars
R : L'éclairage (2^{ème} partie)
- 04 - D : Très courte ou très longue portée
R : La foudre
- 05 - D : L'énergie éolienne
R : Les systèmes complexes
- 6-7 - D : Les antennes
R : L'électromagnétisme
- 08 - D : Les infrastructures critiques
R (1) : E-Learning - R (2) Mesures de permittivité en temps réel
- 09 - D : "MES et B2M : la norme ISA 95 incontournable"
R (1) : Sûreté du système électrique français
R (2) : ESPI 3D
- 10 - D : Téléméasures : domaine technique essentiel des essais en vol
R (1) : EGNOS - R (2) : La cyber-sécurité
- 11 - D : Sûreté de fonctionnement des systèmes à forte composante logicielle
R : Les applications industrielles des logiciels libres



Pour une vision complète sur l'État de l'Art, l'évolution des techniques, leur développement et leurs applications.

Retrouvez toutes les collections de la REE sur le site <http://www.see.asso.fr>

- 10 numéros par an (dont 1 numéro double)
- 10 "dossiers thématiques" et des "repères" de qualité, conçus pour ceux et par ceux qui font la profession
- des articles scientifiques et techniques
- des entretiens
- des analyses pertinentes

Bon de commande à retourner à : SEE/REE - Services Adhésions -
17 rue de l'Amiral Hamelin - 75783 Paris cedex 16 - FRANCE - Fax : 33 (0) 1 56 90 37 19

Nom
Prénom
Société N° VAT**
Fonction
Adresse
Tél
E-mail

	2004	2005	Autres
			N° Année
Je commande les numéros et/ou la série complète des années			

* Je règle la somme totale de _____ € par
 chèque à l'ordre de la SEE
 prélèvement sur carte bancaire (Eurocard/Mastercard, American Express, Visa, Carte bleue, Diners Club International)
 N° (16 chiffres) [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] []
 Date d'expiration : [] [] [] [] [] []
 Date, signature et cachet



* cocher la case ** obligatoire pour les pays de l'UE

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

Tarif public au 1^{er} janvier 2006

Quantités	Prix unitaire TTC (TVA 2,10 %)	
	France	Hors UE
1 ex	18 €	20 €
3 à 5 ex	16 €	18 €
à partir de 5 ex	14 €	16 €
à partir de 10 ex	11 €	13 €

Hors UE ajouter les frais de port soit, 1,5 € par exemplaire commandé.

