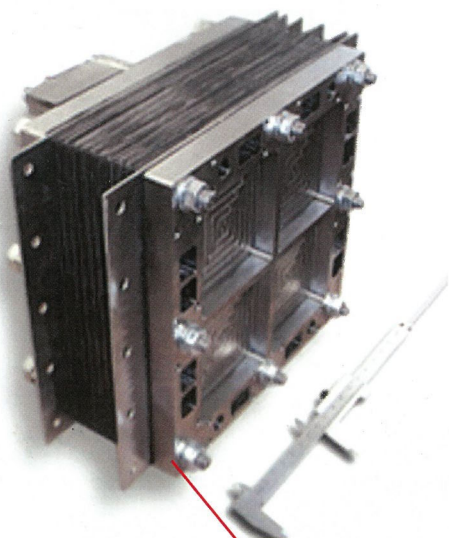
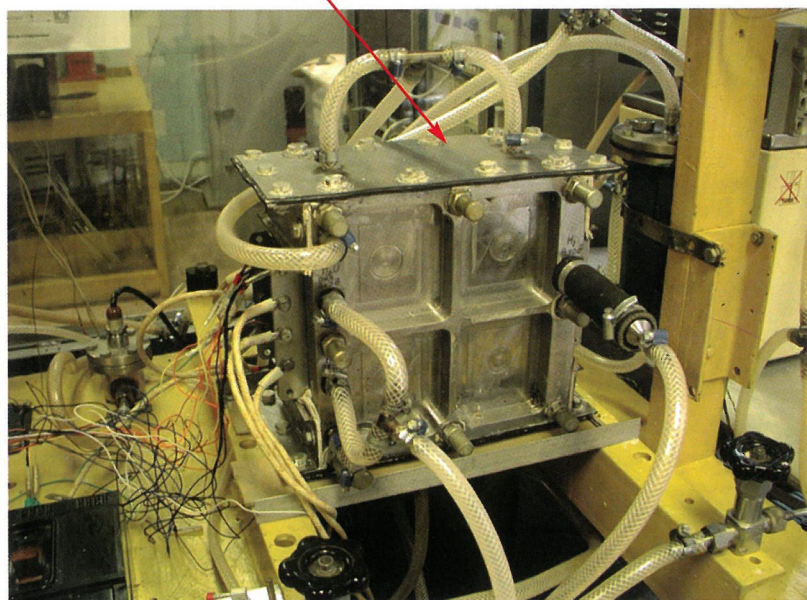
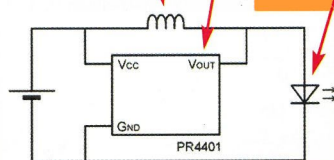
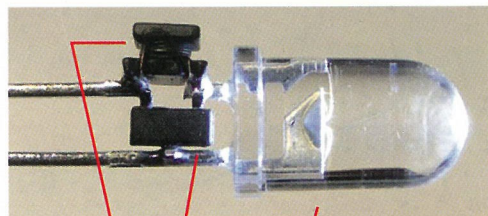




Moteur synchrone de propulsion (Alstom)



*Pile à combustible à électrolyte polymère solide
(Centre de Recherche RRC "Kurchatov Institute" - Russie)*



*Led blanche et
son convertisseur*

**Piles
à
combustibles**

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° 55 - Décembre 2008



Journées Electrotechniques du club EEA



Systèmes Electriques pour véhicules du Futur

Lille 11-12 Mars 2009



Organisatrice: Betty LEMAIRE-SEMAIL

Comité d'organisation: Alain BOUSCAYROL, Jean-François SERGENT,



- **Systèmes de traction**

Véhicules non autonomes

Alimentation, stockage, conversion, motorisation

Véhicules autonomes

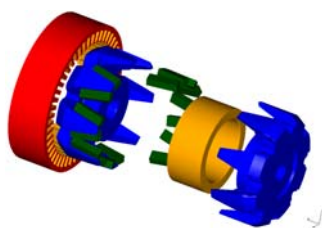
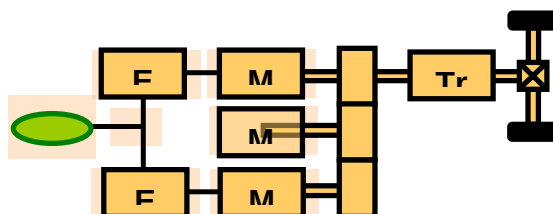
Véhicules électriques et hybrides

- **Systèmes auxiliaires**

Direction, Amortissement, Réseau de bord...

- **Expériences d'enseignement**

Simulation « systèmes », plate-forme « traction »...



Site d'accueil :

Polytech'Lille

Soutiens potentiels:

USTL, L2EP, Région



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

L'équipe de la Revue 3EI vient de perdre l'un de ses membres et amis.

Ingénieur des Mines, agrégé de physique, **Jean-Claude BOUDENOT** dirigeait l'activité de recherche en nanotechnologies du département Recherche et Développement du groupe Thalès ; il enseignait également la physique en école d'ingénieur.

Passionné par l'histoire de la physique et la pédagogie, Jean-Claude faisait partager avec talent sa passion aux auditeurs de ses conférences et aux lecteurs de ses ouvrages et articles consacrés à l'histoire des sciences.

Malgré une charge de travail impressionnante, il accompagna l'équipe de publication de la Revue 3EI pendant quelques années, au cours desquelles il écrira, pour la revue : l'histoire de l'électron, Thalès et l'origine de la science grecque, Shannon et la naissance de la théorie de l'information, Michel Faraday et le développement de l'électricité et bien sûr de très nombreux articles pour la REE, Revue de la SEE

Jean-Claude BOUDENOT vient de nous quitter, vaincu par la maladie contre laquelle il a lutté jusqu'au dernier jour, travaillant encore, sur des articles destinés à la manifestation célébrant les 125 ans de la SEE, la veille de son décès.

L'Equipe de la Revue 3EI, très touchée par la disparition de cet ami, tient à lui rendre hommage et transmettre toutes ses pensées et condoléances à son épouse et à sa famille.

Vous constaterez que le rédacteur en chef est dorénavant Marie-Michèle Le Bihan ; François Boucher continue à effectuer les mêmes tâches administratives et de recherches d'articles qu'auparavant et nous l'en remercions vivement car sans le concours qu'il apporte à la face cachée et souvent ingrate de la revue, celle-ci n'existerait pas.

Dans ce numéro, vous trouverez les derniers articles proposés par l'équipe de l'académie de Toulouse, prolongeant le plaisir de la lecture du numéro de Septembre.

Les membres du comité de rédaction qui ont assuré la recherche d'articles sur le thème de **la pile à combustible** ont été particulièrement efficaces et ce thème occupera les numéros de Décembre et Mars, nous envisageons un numéro de Juin sur la cogénération, avant de laisser à l'académie d'Aix Marseille le soin de traiter le numéro académique.

Notre stock d'articles hors thèmes commence à s'épuiser ; nous sommes certains que vous avez beaucoup d'idées pour le remplir à nouveau et nous comptons sur vous pour nous envoyer des articles pédagogiques : fiches de TP, TD, cours... Nous serions très intéressés par des articles présentant des études de systèmes avec une approche pluridisciplinaire.

La réforme du BTS Electrotechnique est lancée, les productions pour répondre au nouveau référentiel doivent être nombreuses, nous vous invitons à nous envoyer les vôtres afin d'alimenter les articles hors thème qui, rappelons-le, occupent la moitié de la revue. Il est évident que des exemples d'expériences sur l'organisation de chantier sont vivement attendus par l'ensemble des collègues.

Pour que cette revue qui contribue à la transmission des connaissances puisse continuer de paraître, nous avons toujours besoin de votre aide. Nous comptons sur vous pour saisir toutes les occasions pour faire connaître et faire vivre notre revue. Une attention particulière doit être portée à l'information en direction des jeunes collègues que nous souhaiterions voir abonnés en plus grand nombre.

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

Vous pouvez également nous faire parvenir vos idées, vos réactions, vos suggestions à l'adresse e-mail revue3ei.cour@voila.fr

Bonne lecture.

Le Comité de Publication de la Revue 3EI

La Revue 3EI

Comité de publication

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



Lignes et réseaux électriques

J.-C. SABONNADIÈRE, N. HADJSAÏD

Collection Sciences et technologies de l'énergie électrique,
dirigée par Bernard Multon

Editions Hermès Lavoisier



Les lignes et les réseaux électriques sont une partie du génie électrique qui prend aujourd'hui une importance accrue grâce aux nouveaux métiers générés par la libéralisation du marché de l'énergie. Cet ouvrage conçu de façon pédagogique est constitué de quatre volumes :

- Le premier volume :

LIGNES D'ENERGIE ELECTRIQUE présente les lignes et les réseaux et leur fonctionnement (réglage de la tension, propagation sur les lignes longues, lignes à haute tension continue, régimes transitoires, etc.).

- Le deuxième volume :

METHODE D'ANALYSE DES RESEAUX ELECTRIQUES décrit les méthodes mathématiques et les outils de modélisation utilisés pour l'analyse du fonctionnement des grands réseaux maillés (matrices de réseau, calcul des courants de court-circuit, répartition de la puissance, régimes transitoires, stabilité, etc.).

- le troisième volume :

FONCTIONNEMENT DANS LE CADRE DE LA LIBERALISATION DES MARCHÉS analyse les nouveaux concepts induits par la libéralisation des marchés de l'énergie et en particulier celui de l'électricité (contrats entre producteurs et consommateurs, bourses de l'énergie, gestionnaires des réseaux, régulateurs, échanges financiers, capacités de transport disponibles, etc.).

- le quatrième volume :

EXERCICES ET PROBLEMES rassemble des exercices corrigés (ou non) sur les volumes précédents et en particulier les deux premiers.

Pour tout renseignement complémentaire contacter



Lavoisier

14, rue de Provigny

F-94236 CACHAN CEDEX

e-mail : info@Lavoisier.fr

Téléphone : 01 47 40 67 00

VENTE AU NUMÉRO TARIF 2008/2009

- | | | |
|---------|----|---|
| 1994-95 | 1 | La machine asynchrone (reproduction Xérox) |
| | 2 | Association machine asynchrone et convertisseur statique |
| | 3 | La machine synchrone (reproduction Xérox) |
| 1995-96 | 4 | Influence des convertisseurs statiques sur les réseaux |
| | 5 | L'électrothermie |
| | 6 | Première approche sur les réseaux |
| 1996-97 | 7 | La machine à courant continu |
| | 8 | La conversion d'énergie |
| | 9 | Les composants inductifs et capacitifs en électronique de puissance |
| | 10 | Pratiques pédagogiques et réalités industrielles |
| 1997-98 | 11 | Le transformateur |
| | 12 | Les capteurs |
| | 13 | Le génie électrique dans l'armement |
| | 14 | Pratiques pédagogiques et réalités industrielles |
| 1998-99 | 15 | Les aimants et électroaimants |
| | 16 | L'automatique en électrotechnique |
| | 17 | L'appareillage haute tension |
| | 18 | Pratiques pédagogiques et réalités industrielles |
| 1999-00 | 19 | La traction électrique ferroviaire |
| | 20 | Energies renouvelables |
| | 21 | Moteurs électriques pour applications de grandes séries |
| | 22 | Pratiques pédagogiques et réalités industrielles |
| 2000-01 | 23 | Les automatismes industriels |
| | 24 | L'éclairage |
| | 25 | L'Etat de l'Art en électronique de puissance |
| | 26 | Pratiques pédagogiques et réalités industrielles |
| 2001-02 | 27 | Métrologie : mesures et estimations |
| | 28 | Convertisseurs propres |
| | 29 | Les alimentations et convertisseurs embarqués |
| | 30 | Pratiques pédagogiques et réalités industrielles |
| 2002-03 | 31 | Mesures dans les systèmes électrotechniques |
| | 32 | Applications des micro-ondes de puissance |
| | 33 | L'électronique dans l'automobile |
| | 34 | Applications pédagogiques et réalités industrielles |
| 2003-04 | 35 | L'outil informatique dans l'enseignement |
| | 36 | La problématique de l'énergie, la place de l'électricité |
| | 37 | Applications pédagogiques et réalités industrielles |
| | 38 | Applications pédagogiques et réalités industrielles |
| 2004-05 | 39 | La production décentralisée d'électricité |
| | 40 | La production centralisée d'électricité |
| | 41 | Matériaux magnétiques pour convertisseurs d'énergie |
| | 42 | Pratiques pédagogiques et réalités industrielles |
| 2005-06 | 43 | Les réseaux électriques embarqués |
| | 44 | Réseaux de transport d'énergie |
| | 45 | Réseaux piézo électriques |
| | 46 | Applications pédagogiques et réalités industrielles |
| 2006-07 | 47 | Matériaux électro actifs |
| | 48 | Stockage de l'énergie - 1 ^{ère} partie |
| | 49 | Stockage de l'énergie - 2 ^{ème} partie |
| | 50 | Pratiques pédagogiques de l'académie de Lille |
| 2007-08 | 51 | Gisements d'économie d'énergie - 1 ^{ère} partie |
| | 52 | Gisements d'économie d'énergie - 2 ^{ème} partie |
| | 53 | FPGA (Field-Programmable Gate Array) |
| | 54 | Pratiques pédagogiques de l'académie de Toulouse |

RECUEILS DES JOURNÉES 3 E.I.

- 3 E1'95** Moteurs synchrones et leurs applications industrielles
- 3 E1'97** Convertisseurs statiques
- 3 E1'99** Contrôle et commande des systèmes électrotechniques
- 3 E1'03** L'éclairage et chauffage par induction (CD-Rom)

France : 30 € Prix unitaire Etranger : 35 € Prix unitaire

La série complète des 54 n° : 450 € (CEE) - 550 € (hors UE)
Avec copie du numéro "0"

**Tarifs en vigueur au 1^{er} décembre 2008**

UE (TVA 2,10 % incluse)				HORS UE			
1 Vol.	2 Vol.	3 Vol.	4 Vol.	1 Vol.	2 Vol.	3 Vol.	4 Vol.
12 €	24 €	30 €	40 €	14 €	28 €	35 €	46 €

BON DE COMMANDE

A retourner à la SEE - La Revue 3E.I. - 17 rue de l'Amiral Hamelin - 75783 Paris cedex 16 - France
Fax : 33 (0)1 56 90 37 19

Nom

Prénom :

Société :

Fonction:

Adresse :

Code postal Ville :

Tél. | | | | | | | | e-mail souhaitable :

☐ Oui. Je commande les numéros :

Et /ou la série complète des années :

☐ Je règle la somme de : _____ €

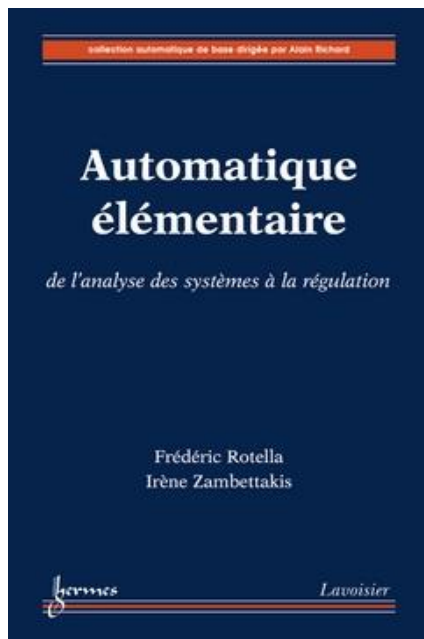
par : ☐ chèque à l'ordre de la SEE

☐ Prélèvement sur carte bancaire (Visa, Eurocard/Mastercard, American Express)

N° Carte | | | | | | | | | | Date de validité | | | | |

Date de souscription ■ | ■ | ■ | ■

Date, signature, cachet (s'il y a lieu) :



Automatique élémentaire : de l'analyse des systèmes à la régulation

ROTELLA Frédéric, ZAMBETTAKIS Irène

Editions Hermès Lavoisier

Cet ouvrage est issu de réflexions pédagogiques sur l'enseignement de l'automatique. Son originalité réside dans la présentation des méthodes de base pour l'analyse et la commande des systèmes continus par une approche opérationnelle simple. Ce point de vue permet d'obtenir les résultats usuels sans utiliser le formalisme de la transformée de Laplace. Automatique élémentaire insiste particulièrement sur les notions de linéarisation et d'opérateur de transfert. L'optimisation des paramètres, les méthodes simples d'identification de modèles linéaires ainsi que le réglage des régulateurs PID sont largement développés. Afin d'envisager la conception de la commande des systèmes à plusieurs entrées, certaines pistes basées sur la notion d'état sont également proposées. Tout au long de l'ouvrage, des exemples pratiques illustrent les méthodes. Certains sont traités sous forme de travaux pratiques jusqu'à la mise en oeuvre de la commande. Cela permet de souligner que l'automatique est avant tout une science tournée vers l'application des techniques qu'elle regroupe.



La microrobotique : applications à la micromanipulation

RÉGNIER Stéphane, CHAILLET Nicolas

Editions Hermès Lavoisier

La microrobotique est un domaine récent et en plein essor dont les applications sont nombreuses et variées : Industrie, médical, instrumentation de laboratoire, etc. Cet ouvrage présente pour la première fois en détail et en français ce secteur de la robotique qui concerne la manipulation des objets de dimensions micrométriques.

À ces dimensions, le comportement des objets est sensiblement différent de celui, mieux connu, des échelles supérieures. Cet effet d'échelle conduit à mettre en oeuvre des solutions parfois radicalement différentes de celles plus habituellement utilisées.

Ce livre détaille le comportement des objets aux échelles micrométriques et les solutions robotique adaptées, en termes d'actionneurs, préhenseurs, manipulateurs, perception de l'environnement et de microtechnologie.

Cet ouvrage, assorti d'exercices applicatifs corrigés, permettra aux ingénieurs, étudiants et chercheurs de se familiariser avec ce domaine récent et de contribuer à son développement par leurs actions scientifiques

Les piles à combustibles : historique et principes généraux

Pierre MILLET¹, Michel GUYMONT¹, Serguey GRIGORIEV²

¹ Institut de Chimie Moléculaire et des Matériaux, UMR CNRS n° 8182, Université Paris Sud, bâtiment 410, 91405 Orsay Cedex France

² Hydrogen Energy and Plasma Technology Institute of Russian Research Center "Kurchatov Institute", Kurchatov sq. 1, 123182 Moscow, Russia

Résumé : Cet article présente le concept de Pile à Combustible. Après un bref rappel historique, les aspects énergétiques, thermodynamiques et chimiques seront étudiés. Un panorama des différentes technologies permettra de conclure sur les limitations actuelles mais aussi sur les perspectives de développements futurs.

1. Rappels préalables sur les cellules électrochimiques

L'électrochimie, c'est le mariage de la chimie et de l'électricité, c'est-à-dire l'art de faire de la chimie (fabriquer de nouvelles molécules) à l'aide de l'électricité (dans un réacteur électrochimique [1]) ou inversement, l'art de produire de l'électricité à partir d'une réaction chimique (à l'aide de générateurs électrochimiques [2]).

Les piles à combustible (PàC) dont il est plus spécifiquement question ici sont un exemple (parmi d'autres) de générateur électrochimique. Bien que différents comburants puissent être utilisés pour des applications particulières (par exemple le chlore ou l'acide nitrique), dans la plupart des cas, l'oxydant est l'oxygène, pur ou dans l'air. Les combustibles sont liquides (méthanol, éthanol, formaldéhyde) ou gazeux (hydrogène, mais aussi CO, des hydrocarbures tels que l'éthylène, le propane, le butane, etc). Dans cet article, la discussion sera limitée aux piles à combustible hydrogène (H_2) – oxygène (O_2).

Mais qu'il s'agisse de réacteur ou de générateur électrochimique, la cellule de base est souvent la même (figure 1). Elle est constituée de deux électrodes (une anode et une cathode formées d'un support métallique bon marché recouvert en surface par une couche catalytique) face à face, baignant dans une solution électrolytique (un conducteur ionique formé d'ions dissous dans un solvant).

Lorsque les processus électrochimiques qui se produisent aux interfaces électrode – électrolyte mettent en jeu des gaz (comme c'est le cas dans une PàC H_2 - O_2), il est nécessaire d'introduire un séparateur dans l'espace intermédiaire, de façon à éviter la recombinaison des produits de la réaction (cas d'un réacteur) ou la réaction directe entre réactifs (cas d'une PàC).

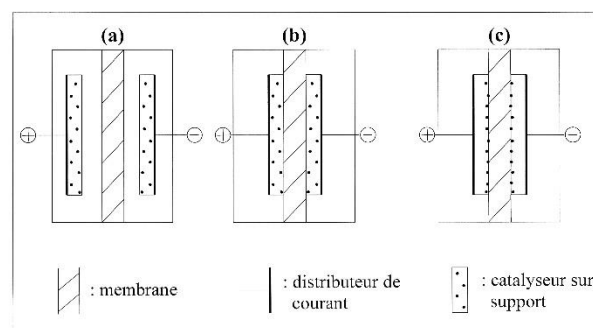


Figure 1 : trois principaux types de cellules électrochimiques.

Ce séparateur peut être de deux types : (i) un diaphragme poreux imprégnée de solution électrolytique ; (ii) un matériau polymère à conduction ionique sélective. Dans la configuration (a) de la figure 1, les électrodes sont massives et il existe un espace plus ou moins important entre électrode et séparateur. Dans la configuration (b), les électrodes sont poreuses et plaquées contre le séparateur. Dans la configuration (c), les électrodes sont déposées sur le séparateur et l'électrolyte est solide.

Les membranes échangeuses de protons (PEM) constituent un exemple moderne d'électrolyte solide. Elles sont formées d'un copolymère du téflon (tétrafluoroéthène) et de divers monomères de perfluorosulfonate. La membrane polymère la plus utilisée aujourd'hui est le NafionTM (Dupont de Nemours, USA), obtenue à partir d'éthyl-propyl-vinyl éther et de perfluoro-sulfonylfluorure (figure 2). Le groupe HSO_3^- est en fait composé de SO_3^- lié à la chaîne fluorocarbonée et de H^+ libres, assurant la conductivité ionique. Bien que la chaîne principale (téflon) soit hydrophobe, l'acide sulfonique, étant ionique, est hydrophile. La membrane peut absorber de grandes quantités d'eau (jusqu'à 50% en masse), ce qui permet la libération des H^+ et la rend conductrice ionique.

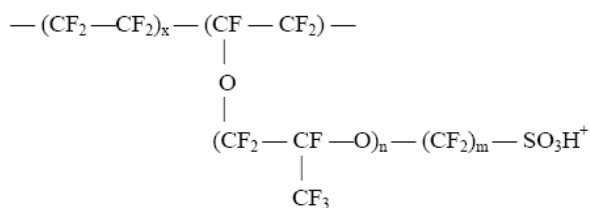


Figure 2 : Formule chimique générale des matériaux polymère perfluorosulfonés.

2. Bref historique de la technologie pile à combustible [3-6]

En 1839, W. Grove construisit un « accumulateur voltaïque gazeux » constitué de deux électrodes de platine (métal chimiquement inattaquable) trempant dans une solution électrolytique liquide (une solution aqueuse d'acide sulfurique H_2SO_4). L'une de ces électrodes baignait dans une atmosphère d'hydrogène gazeux et l'autre, dans une atmosphère d'oxygène gazeux. L'accumulateur ainsi constitué possédait une force électromotrice de l'ordre du volt, et, sous passage du courant, de l'eau se formait à l'électrode à O_2 .

Pendant une centaine d'années, peu de progrès furent accomplis. Puis, à la suite d'expériences démarrées en 1937, F. Bacon breveta à la fin des années 1950 une pile à combustible $\text{H}_2\text{—O}_2$ de 6 kW de puissance, munie d'un électrolyte liquide alcalin et d'électrodes de nickel (Ni) poreuses.

L'essor technologique des piles à combustible est étroitement lié à la conquête spatiale. Dans les années 1950, les ingénieurs de la NASA s'intéressèrent à nouveau aux piles à combustible $\text{H}_2\text{—O}_2$, au détriment des accumulateurs conventionnels (trop lourds) et de l'énergie nucléaire (trop dangereuse), et plus particulièrement aux piles à électrolyte solide, l'absence de pesanteur rendant impossible l'utilisation d'électrolytes liquides. Au début des années 1960, la société américaine General Electric Co. construisit une pile $\text{H}_2\text{—O}_2$ à électrolyte polymère solide acide (SPFC : *Solid Polymer Fuel Cell*) de 1kW de puissance, destinée au programme spatial Gemini. Sept véhicules spatiaux Gemini ont été équipés chacun de deux modules de 1kW. Cette technologie fut ensuite abandonnée à cause de la mauvaise tenue de l'électrolyte polymère solide utilisé (une membrane polystyrène sulfonique) au profit de la technologie alcaline (AFC : *Alkaline Fuel Cell*), utilisant un séparateur poreux imprégné par un électrolyte liquide alcalin. Cette dernière fut utilisée dans les vols Apollo. Elle est encore en usage aujourd'hui dans les navettes spatiales.

A la fin des années soixante, l'apparition de matériaux polymères perfluorosulfonés à conduction protonique performants (NafionTM) vinrent de nouveau modifier le paysage technologique des PàC. A la fin des années 1980 apparurent les premières applications terrestres. Après les piles à combustibles Perry (USA)-Ballard (Canada) utilisées dans les sous-marins (fournissant une alimentation en O_2), le premiers bus de démonstration fonctionnant à l'hydrogène (combustible : H_2 comprimé) construit par la Société Ballard voit le jour en 1993. Depuis lors, les problèmes économiques et environnementaux liés à l'utilisation massive de combustibles fossiles ont favorisé le développement des SPFC, notamment pour des applications de transport.

3. La pile à combustible : un convertisseur d'énergie

On appelle *pile à combustible* (PàC) (en anglais : *fuel cell*) un dispositif électrochimique qui transforme *directement* l'énergie chimique contenue dans un système « Combustible + Oxydant (Comburant) » en énergie électrique, réalisant ainsi la conversion :

Energie chimique $\xrightarrow{1}$ Energie électrique

On parle de combustion « froide », c'est-à-dire d'une réaction limitant la production de chaleur. A titre de comparaison, le procédé de loin le plus employé actuellement pour utiliser l'énergie chimique d'une réaction de combustion consiste à brûler le combustible dans l'air et à transformer la chaleur de réaction produite en énergie électrique ou mécanique. Il y a alors au moins deux conversions successives :

Energie chimique $\xrightarrow{1}$ Energie thermique $\xrightarrow{2}$
Energie mécanique (mouvement)

voire trois conversions successives si l'on passe par une turbine qui convertit le mouvement en énergie électrique :

Energie chimique $\xrightarrow{1}$ Energie thermique $\xrightarrow{2}$
Energie mécanique $\xrightarrow{3}$ Energie électrique

Chacune de ces conversions n'a pas un rendement idéal de 100 %. Et plus il y a d'étapes de conversion, plus le rendement global (défini comme le produit des rendements partiels) est faible. On a donc intérêt à diminuer le nombre de conversions afin d'augmenter le rendement de l'ensemble.

Mais il y a pire. Le second principe de la thermodynamique, qui domine toutes ces questions de transformation d'énergie, a pour conséquence que la conversion de la chaleur (énergie thermique) en tout autre forme (non thermique) d'énergie ne peut pas se faire complètement. Tout système qui, par sa

transformation, reçoit de la chaleur d'une « source » chaude (caractérisée par sa température T_c) ne peut la convertir intégralement et est obligé d'en reverser une partie vers un « puits » plus froid (à une température T_f inférieure à T_c). Autrement dit, un *moteur thermique* (qui convertit la chaleur en énergie mécanique ou électrique) ne peut fonctionner qu'entre (au moins) deux températures T_c et T_f . Le rendement d'une telle machine thermique est le rapport η du travail obtenu à la chaleur fournie.

Un théorème de thermodynamique, le *théorème de Carnot*, donne l'expression du rendement maximum possible, $\eta_{\max}$, d'un moteur thermique quelconque :

$$\eta_{\max} = \frac{T_c - T_f}{T_c}$$

où les températures sont en kelvins. On voit que le rendement est d'autant plus faible que la différence des deux températures est petite. Compte tenu du fait que le puits froid est très généralement à la température ambiante, le rendement est en général très inférieur à 100 %. Cela constitue une faiblesse inhérente à toute conversion d'énergie à partir de chaleur. Tout rendement réel d'une machine thermique est encore davantage inférieur à cette valeur.

TABLEAU 1 : Les rendements pratiques de plusieurs dispositifs de conversion d'énergie.

Energie initiale	Energie finale	Système	Rendement pratique
chimique (pétrole)	Mécanique (mouvement)	véhicule à moteur thermique	15 à 30 %
chimique (charbon, gaz)	électrique	centrale thermique	30 à 45 %
Nucléaire	électrique	centrale nucléaire	30 à 35 %
mécanique (vent)	électrique	éolienne	20 à 30 %
mécanique (gravité)	électrique	turbine hydraulique	80 %
Chimique	électrique	pile à combustible	30 à 80 %

Ne passant pas par la forme d'énergie « chaleur », les piles à combustible n'ont pas limitation théorique à leur rendement. Et, de fait, leurs rendements pratiques, loin toutefois du rendement théorique, sont parmi les plus élevés de tous les procédés d'obtention d'énergie électrique. A titre de comparaison, quelques valeurs actuelles de rendements pratiques obtenus sur divers

dispositifs de conversion sont données dans le Tableau 1.

Les trois derniers systèmes n'utilisent pas la conversion de la chaleur. Il n'y a pas de limitation théorique à leur rendement.

Comparaison avec un accumulateur conventionnel

Comme un accumulateur (par exemple une batterie au plomb utilisée dans les voitures), une PàC est un générateur d'électricité : elle a un électrolyte et deux électrodes, et engendre un courant électrique continu par des réactions électrochimiques. Mais il y a des différences importantes. Une PàC nécessite un apport continu de combustible et d'oxydant. Ses électrodes ne subissent pas de modifications chimiques. Elle ne peut être déchargée (tant que les apports en carburant et en comburant ne cessent pas).

4. Aspects thermodynamiques

Prenons comme exemple une PàC Oxygène/Hydrogène dont le principe de fonctionnement est rappelé sur la figure 3.

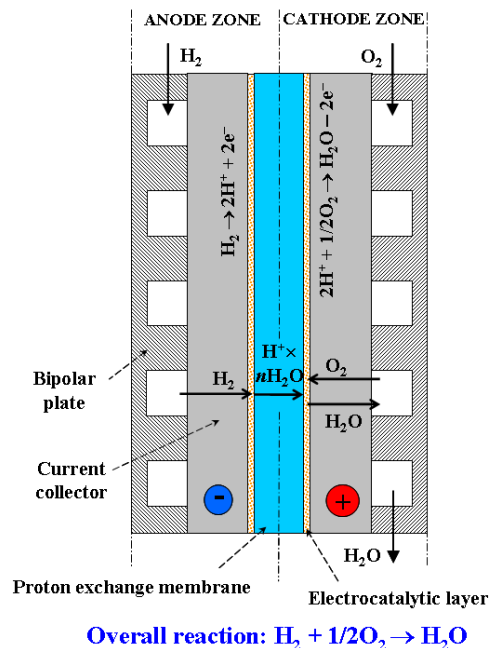
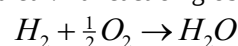
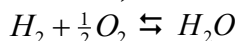


Figure 3 : schéma de principe d'une PàC à électrolyte polymère solide.

En cours de fonctionnement, il se produit une réaction d'oxydoréduction électrochimique contrôlée entre O_2 et H_2 , qui donne de l'eau comme dans la combustion ordinaire de H_2 (réaction chimique non contrôlée), mais qui produit aussi de l'électricité et de la chaleur. La réaction globale est :



Il y a transformation directe d'énergie chimique (mesurée par la variation d'enthalpie libre molaire ΔG du système en J.mol^{-1}), en énergie électrique. La quantité d'énergie électrique récupérée dépend de l'intensité du courant électrique qui circule dans la pile en fonctionnement : l'énergie électrique maximum est obtenue lorsque le courant est quasi nul, c'est-à-dire lorsque la réaction globale est équilibrée (transformation dite *réversible*) :



Un théorème de thermodynamique énonce qu'à une température et une pression donnée, la diminution de l'enthalpie libre ΔG d'un système fournit un travail W (autre qu'un travail de dilatation/contraction) à l'extérieur. On sait calculer et/ou mesurer les variations d'enthalpie libre ΔG des réactions. Ce travail W (compté négativement, car c'est une énergie perdue par le système) est égal à ΔG si l'évolution du système est *réversible*, et *inférieur en valeur absolue* à ΔG si l'évolution du système est *irréversible* (cas pratique) :

$$|\Delta G| \geq |W|$$

Sans les valeurs absolues, la formule générale s'écrit : $\Delta G \leq W$. Elle est valable dans tous les cas. Si le système est une pile ou un accumulateur, ce travail W est un travail électrique. Pour une évolution réversible (courant quasi nul), il vaut :

$$|W| = nFE_{\text{eq}}$$

où E_{eq} est la force électromotrice de la pile, n est le nombre de moles d'électrons échangés dans la réaction, et F est une constante (le *faraday*) : c'est la quantité d'électricité exprimée en coulombs d'une mole d'électrons ($F = \mathcal{N}e_0 = 6,022 \times 10^{23} \times 1,602 \times 10^{-19} = 96485 \text{ C.mol}^{-1}$).

Si un courant traverse la cellule, l'évolution n'est plus réversible. Le travail obtenu peut toujours être écrit $|W| = nFE$, mais la fem E est inférieure à la valeur d'équilibre E_{eq} .

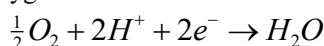
Dans la pile à O_2/H_2 , on a à 25°C (et sous la pression normale) : $\Delta G = -237 \text{ kJ/mole H}_2$; on en déduit

$$E_{\text{eq}} = -\frac{\Delta G}{nF} = 1,23 \text{ V}$$

A l'électrode négative (anode), il y a oxydation de l'hydrogène selon la demi-réaction (pour une pile acide) :



A l'électrode positive (cathode), il y a réduction de l'oxygène selon la demi-réaction



On voit que $n = 2$. Les deux électrodes sont séparées par un électrolyte conducteur pour les protons H^+ et non conducteur pour les électrons qui passent par le circuit extérieur.

Le courant I et la tension E de la pile varient selon la charge électrique. La tension diminue depuis la valeur 1,23 V sous courant nul jusqu'à zéro (pile en court-circuit). La puissance (le produit $E.I$) varie aussi. Son maximum est obtenu pour des densités de courant voisines de 1 A.cm^{-2} .

Le rendement maximum de la pile est obtenu dans les conditions réversibles : si ΔH est la chaleur à pression constante de la réaction (variation d'enthalpie),

$$\eta_{\text{max}} = \frac{\Delta G}{\Delta H}$$

Ce rendement est très élevé. Pour la pile à O_2/H_2 , $\Delta H = -286 \text{ kJ/mole H}_2$ à 25°C , et donc

$$\eta_{\text{max}} = 83\%$$

5. Aspects cinétiques

Le rendement énergétique d'une PàC diminue d'autant plus que le courant I débité par la pile est important. Un exemple type de caractéristique courant – tension est représenté sur la figure 4.

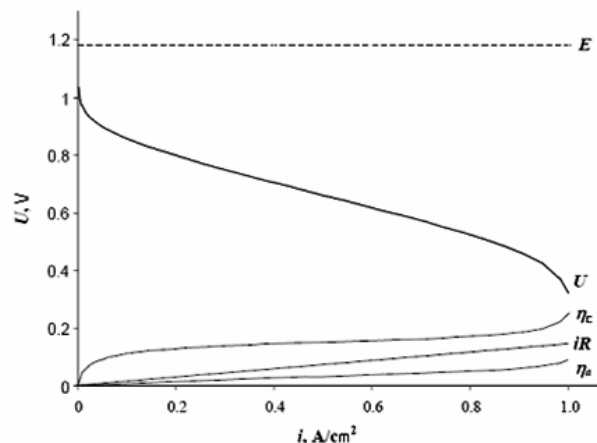


Figure 4 : Caractéristique courant – tension d'une pile à combustible.

L'expression générale entre tension de pile (U en Volt) et densité de courant (i en A.cm^{-2}) s'écrit sous la forme :

$$U(i) = E - iR - \eta_a(i) - \eta_c(i)$$

avec :

$E = E^0 + (RT/nF) \ln(P_{\text{O}_2}P_{\text{H}_2})$: force électromotrice (fem en Volt) ou tension de pile en circuit ouvert,

E^0 : fem standard en Volt,

R and F : respectivement constante des gaz parfaits et constante de Faraday,

T : température absolue en K,

n : nombre d'électrons impliqués dans la réaction électrochimique élémentaire,

P_{O_2} and P_{H_2} : pressions partielles d' O_2 et d' H_2 en bars,

R : résistance électrique de la membrane polymère,

η_a and η_c : respectivement surtensions anodique et cathodique, fonction de la densité de courant. Une surtension (en Volt) désigne la différence entre le potentiel de travail et le potentiel d'équilibre d'une électrode. C'est une fonction de la densité de courant i .

Sur la figure 4, la caractéristique de la PàC en débit (courbe U) est la somme algébrique de chacun des termes de l'équation précédente.

6. Conditions pratiques de fonctionnement des piles à combustible

La mise au point des piles à combustible est délicate. Outre avoir un bon rendement, elles doivent remplir un certain nombre de conditions.

1) elles doivent avoir une grande durée de vie, avec des vitesses de réaction aux électrodes suffisamment élevées, pour assurer des densités de courant (en ampères/cm²) élevées en même temps qu'une faible « polarisation », c'est-à-dire de faibles surtensions.

2) l'électrolyte doit avoir une bonne conductibilité ionique et sa composition doit rester stable pendant toute la durée du fonctionnement. Ceci implique qu'il ne doit pas entrer en réaction avec le combustible, l'oxydant, ou les produits de la réaction. Il ne doit pas non plus corroder les électrodes, ni les autres parties de la pile.

3) les PàC doivent permettre l'arrivée continue des corps actifs (gaz ou liquides) vers la surface utile des électrodes, ainsi que l'évacuation des produits de la réaction hors des piles.

4) si possible, elles doivent avoir un faible encombrement et être légères.

Il est difficile de satisfaire toutes ces exigences et en même temps de fournir un rendement élevé. Une activité électrochimique élevée des électrodes est assurée par des catalyseurs des réactions, une température élevée, et des électrodes à grande surface (ou divisées : composées de poudres).

Une température de fonctionnement comprise entre 400 et 1000°C est utilisée dans les *piles à combustible à haute température*. On y utilise comme combustible des corps inactifs électrochimiquement, (hydrocarbures, CO) ou souillés par des impuretés. L'électrolyte est constitué de carbonates fondus ou d'hydroxydes fondus, ou de solides ayant une conductivité ionique suffisante. L'inconvénient de ces piles est la dépense d'énergie nécessaire pour obtenir les températures élevées et les maintenir malgré les pertes thermiques.

Les *piles à combustible à moyenne température* (180 à 250°C) fonctionnent avec des électrolytes aqueux sous des pressions allant de 5 à 50 atm. La pile historique de Bacon en fait partie. Certaines ont comme électrolyte de l'acide phosphorique concentré. Les combustibles sont des hydrocarbures gazeux.

Les *piles à basse température*, les plus étudiées, fonctionnent à des températures inférieures à 100°C. Pour assurer des vitesses élevées de réaction on utilise des catalyseurs très actifs. Mais ces catalyseurs sont très sensibles aux impuretés. Les combustibles et oxydants doivent être très purs. Les piles à hydrogène-oxygène de basse température actuelles ont une densité de courant allant jusqu'à 300 mA/cm² et une puissance unitaire jusqu'à 200 W/kg. Celles fonctionnant à l'alcool ont de moins bonnes qualités.

Lorsque les réactifs sont des gaz, on utilise des électrodes poreuses (souvent du nickel) à deux couches : le côté en contact avec l'électrolyte est une couche mince finement poreuse (couche d'arrêt) alors que l'autre côté, vers lequel est amené le gaz, est la couche de travail, plus épaisse et parsemée de pores de gros diamètre.

7. Les différents types de piles à combustible

Le tableau suivant récapitule les principaux types de PàC utilisés et/ou étudiés actuellement.

Les PàC à électrolyte solide sont plus faciles à transporter et en général moins soumises à la corrosion. Elles ont des durées de vie sensiblement supérieures aux piles à électrolyte liquide. On a fait fonctionner une PEMFC pendant plus de 50 000 heures.

TABLEAU 2 : Divers types de piles à combustible étudiés actuellement.

Type de PàC	Electrolyte	Température d'emploi	Electrodes	Emploi
Membrane échangeuse de protons (PEMFC)	Membrane mince (< 50 µm) (conduction par H ⁺)	60 à 80°C	Pt sur C, ou Pt-Ru si le gaz H ₂ fourni contient un peu de CO	Véhicules, générateurs stationnaires, générateurs portables (10 mW à 250 kW)
Alcaline (AFC)	KOH retenue dans de l'amiante (conduction par OH ⁻) 35-50% masse KOH 85 % masse KOH	< 120°C 250°C	Pt/C, Ni, Ag, métaux nobles, oxydes.	Programme spatial depuis les années 1960, transports (1 à 100 kW)
Acide phosphorique (PAFC)	H ₃ PO ₄ retenu par SiC (conduction par H ⁺)	150 à 220°C	Pt/C	Générateurs stationnaires (200 kW à 10 MW)
Carbonates fondus (MCFC)	Carbonates de Li, Na, K fondus, retenus dans une matrice céramique de LiAlO ₂ (conduction par ions carbonate CO ₃ ²⁻)	600 à 700°C	Ni, NiO (à de telles températures, la catalyse n'est pas nécessaire)	Générateurs stationnaires de grande puissance (200 kW à 10 MW)
Oxyde solide (SOFC)	Oxydes non poreux : ZrO ₂ stabilisée par Y ₂ O ₃ (conduction par ions O ²⁻)	800 à 1000°C	Ni/ZrO ₂	Générateurs stationnaires (1kW à 1MW)

Avantages généraux des PàC

- possibilité de rendements élevés.
- promesse de faibles émissions. Les PàC hydrogène/air n'ont pas d'émissions, sauf l'eau produite et l'air non utilisé. Cependant, l'hydrogène n'est pas un combustible directement accessible, et les diverses fabrications d'hydrogène peuvent donner aussi du CO₂ ou du CO, toutefois en faibles quantités.

- l'utilisation de l'hydrogène comme combustible obtenu par électrolyse de l'eau ou issu de sources nationales (biomasse, éthanol, charbon, nucléaire, solaire, etc.) autres que du pétrole ou du gaz importé réduit beaucoup la dépendance énergétique. Mais ceci demande l'établissement d'une solide infrastructure.

- simplicité et promesse de bas coûts. Les PàC, encore chères aujourd'hui (à cause des métaux précieux utilisés, et du coût de certains électrolytes, comme le NafionTM), pourront être construits industriellement en grande série.

- il n'y a pas de parties mobiles, ce qui permettra une grande durée de vie.

- par assemblage modulaire de plusieurs PàC, on peut obtenir de grandes puissances.

- les PàC sont silencieuses.

- on peut leur donner des formes et des dimensions variées.

Voyons maintenant plus en détail les différents types de PàC, et surtout leurs inconvénients.

8. La pile AFC (Alkaline Fuel Cell)

Ce type de pile a d'abord été mis au point pour les applications spatiales (figure 5). Il présente un inconvénient majeur : il est nécessaire d'éliminer le CO₂ de l'air (qui apporte le comburant O₂) avant admission dans la pile car sinon, il se forme un carbonate insoluble avec l'électrolyte (la potasse KOH).

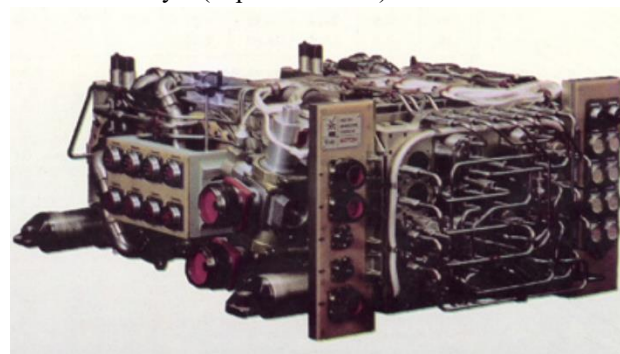


Figure 5 : PàC alcaline de type "Foton" (5 kW) développée par Ural Electrochemical Integrated Plant (Russie) pour applications spatiales.

9. La pile PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)

Cette PàC est actuellement celle sur laquelle sont concentrés les plus gros efforts de développement (figure 6). Ces efforts visent à augmenter les performances et à diminuer le coût de la pile et de ses périphériques. Les investissements sont considérables de la part de plusieurs constructeurs automobiles. Elles présentent plusieurs inconvénients :

1) le platine, catalyseur aux deux électrodes pour les réactions d'oxydation de H_2 et de réduction de O_2 , est cher. On a diminué la quantité déposée sur les électrodes (qui est actuellement d'environ $0,02 \text{ mg/cm}^2$, soit au total plus de 10 g pour un véhicule) ; de plus le platine est très sensible au CO au-dessus d'environ 10 ppm. Si H_2 a été obtenu par *reformage* (procédé consistant à oxyder du méthane par de la vapeur d'eau en présence de Ni catalytique à environ 880°C sous pression : $CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$), il contient justement du CO qu'il est coûteux d'éliminer complètement (par perméation à travers une feuille de palladium). En outre, il y a du CO dans l'air. Une solution consisterait à utiliser un catalyseur mélangé au platine pour oxyder CO en CO_2 (cher).

2) la chaleur de réaction de la pile doit être évacuée par une circulation d'eau, ce qui oblige à installer un échangeur thermique beaucoup plus grand que les radiateurs actuels. Ou alors, il faudrait pouvoir faire fonctionner la pile vers $130\text{-}150^\circ\text{C}$, mais pour cela, il est nécessaire de trouver un autre électrolyte...

3) il faut humidifier la membrane électrolyte pour qu'elle puisse conduire les protons. Cette eau, ainsi que celle produite par la réaction, pose des problèmes lorsque le climat est très froid (gel) ou très chaud (sécheresse).

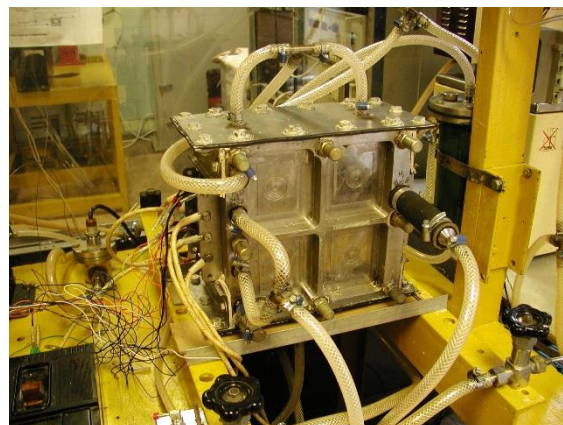
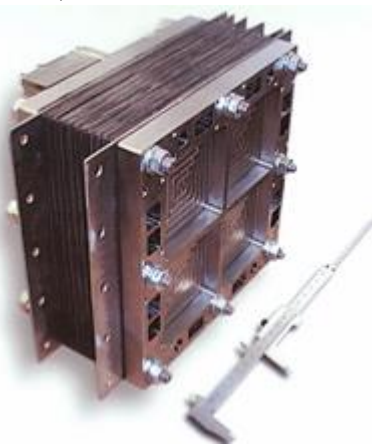


Figure 6 : PàC à électrolyte polymère solide développée et testée au centre de recherche RRC "Kurchatov Institute" (Russie).

La pile PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell)

Inconvénient : l'électrolyte (H_3PO_4) est corrosif il possède un point de fusion élevé qui oblige à maintenir la pile à une température élevée (200°C).

La pile SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)

Les électrodes sont des mélanges de métaux et d'oxydes (*cermets*). Electrode positive : $La-Sr-MnO_2$; électrode négative : $Ni-ZrO_2$; électrolyte solide : conducteur ionique $ZrO_2/Y_2O_3-CeO_3$. Il existe d'autres variantes.

Fonctionnant à haute température (700 à 1000°C), elle peut être couplée avec une turbine thermique qui produit sa propre électricité thermique. Au total, le rendement électrochimique+thermique peut dépasser 80 %.

10. Limitations actuelles et perspectives

Actuellement les PàC H_2-O_2 sont limitées (notamment pour les applications de transport) (i) par des températures de fonctionnement trop basses ($< 100^\circ\text{C}$) ; (ii) par des problèmes de fiabilité ; (iii) par des limitations en terme de durée de vie ; (iv) par un coût encore trop important. Les PàC étant des co-générateurs d'électricité et de chaleur, pour maintenir une PàC de plusieurs dizaines de kW (puissance nécessaire aux applications de transport) à une température inférieure à 100°C , il est nécessaire de multiplier par un facteur trois la capacité d'échange thermique des radiateurs actuellement utilisés. Pour éviter ce surcoût (et ce surpoids), la recherche porte sur des matériaux polymères fonctionnant aux alentours de 150°C . Les problèmes de fiabilité et de durée de vie pourront être améliorés par la mise au point de procédures automatisées de fabrication. En ce qui concerne le coût

(lié en partie à l'utilisation de platine comme catalyseur à l'anode et à la cathode), de nombreuses recherches sont menées pour trouver des catalyseurs exempts de métaux nobles donc moins onéreux.

11. Futurs domaines d'application

A l'avenir, les PàC H_2-O_2 pourront être utilisées dans différents domaines d'activité :

1) les transports : les véhicules de transport (automobiles, avions) sont actuellement les principaux pollueurs. Le pétrole et ses dérivés (essence, kérosène) sont encore les combustibles les moins chers, mais la pollution grandissante va fatalement imposer une source d'énergie propre. L'hydrogène peut être utilisé comme combustible dans une combustion avec l'air, mais, nous l'avons vu, le rendement est limité. Les PàC par contre n'ont pas cette limitation, et on peut espérer améliorer de plus en plus leur rendement. Dès 2004, presque tous les constructeurs étudiaient des prototypes mixtes (essence/PàC) ou complètement électriques (de type PEMFC).

2) les générateurs portables (applications nomades) : téléphone mobile (puissance consommée : environ 100 mW), ordinateur portable (environ 30 W), générateur électrique portable (de l'ordre de 1 kW). Actuellement, les meilleurs accumulateurs (lithium-ion) ne permettent qu'une autonomie insuffisante (environ 3h à un ordinateur portable). Une PàC, couplée à un accumulateur pour les pointes de consommation, est à l'étude : l'autonomie ne sera limitée que par la taille du réservoir de combustible (hydrogène, méthanol).

3) les générateurs stationnaires de puissance : dans ce domaine, plusieurs types de PàC sont utilisés (voir Tableau 2). Il n'y a pas la contrainte du transport. Toutefois, la technologie basée sur les membranes échangeuses de protons semble s'imposer progressivement.

12. L'hydrogène, futur vecteur énergétique

Du fait de leur simplicité d'emploi et de leurs divers avantages pratiques (peu ou pas de pièces mobiles, fonctionnement silencieux), il semble de plus en plus probable que les piles à combustible H_2-O_2 seront les premières technologies de l'hydrogène à être largement commercialisées, couvrant un large domaine d'applications allant des générateurs de puissance fixes jusqu'au transport automobile.

Bibliographie

- [1] P. Millet, *Le réacteur électrochimique*, Les Techniques de l'Ingénieur, J 4802, 2008
- [2] P. Stevens, F. Novel-Cattin, A. Hammou, C. Lamy, M. Cassir, *Piles à combustible*, Les Techniques de l'Ingénieur, D 3340, 2005
- [3] T. Alleau « Les piles à combustible », dans J.L. Bobin, E. Huffer & H. Nifenecker éd., *Energies de demain*, EDP Sciences, Les Ulis, France, 2005.
- [4] M. Prigent « Les piles à combustible, état des développements et des recherches », Institut français du pétrole, Rueil-Malmaison, France, 1999.
- [5] Divers auteurs dans le numéro de *Pour la Science* 263, septembre 1999.
- [6] F. Barbir « PEM Fuel Cells », Elsevier Academic Press, New York, 2005.

Caractérisation des piles à combustible par spectroscopie d'impédance électrochimique

Pierre MILLET¹, Michel GUYMONT¹, Serguey GRIGORIEV²

¹ Institut de Chimie Moléculaire et des Matériaux, UMR CNRS n° 8182, Université Paris Sud, bâtiment 410, 91405 Orsay Cedex France

² Hydrogen Energy and Plasma Technology Institute of Russian Research Center "Kurchatov Institute", Kurchatov sq. 1, 123182 Moscow, Russia

Résumé : Cet article traite de la caractérisation des piles à combustibles (PàC) par spectrométrie d'impédance électrochimique. Après la présentation de la technique expérimentale et l'introduction des différentes impédances élémentaires nécessaires à la modélisation de la PàC par un circuit électrique équivalent, des diagrammes d'impédances expérimentaux sont présentés puis analysés. En fin d'article, l'analyse d'une PàC commerciale de plus forte puissance permettra d'illustrer cette technique de caractérisation sur un cas concret.

1. Introduction

Une pile à combustible (PàC) est un générateur électrochimique mettant en œuvre deux interfaces métal-électrolyte [1]. Les réactifs chimiques (carburant et comburant gazeux) sont consommés de façon continue au fur et à mesure que la pile débite. Dans cet article, nous nous intéressons principalement à la PàC hydrogène-oxygène (H_2-O_2). L'analyse par spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE) consiste à mesurer l'impédance complexe de la pile en fonction de la fréquence de la tension excitatrice. Elle permet en principe d'obtenir un certain nombre d'informations quantitatives sur le fonctionnement des PàC tels que (i) le détail des processus électrochimiques aux interfaces et les constantes cinétiques des différentes étapes microscopiques; (ii) la variation de la conductivité ionique dans l'électrolyte polymère en fonction de la température, de la teneur en eau et du mode de transport ionique; (iii) le détail des mécanismes associés au transport des réactifs gazeux vers la zone réactionnelle. Pour l'ingénieur, la SIE est un outil précieux permettant de caractériser et d'optimiser le fonctionnement des PàC, voire de diagnostiquer les causes de dysfonctionnement.

2. Techniques expérimentales

Spectroscopie d'impédance électrochimique

Les impédances électrochimiques sont des impédances électriques. Elles sont mesurées à l'aide d'un appareil particulier appelé impédancemètre (ou analyseur de fonctions de transfert) couplé à un potentiostat (figure 1). Ce dernier permet de fixer le potentiel d'une électrode particulière dite « de travail » par rapport à une seconde électrode dite « de référence », et de collecter le courant via une troisième électrode dite « contre électrode ». Il est ainsi possible de mesurer séparément l'impédance de chacune des

deux électrodes de la PàC de façon à les étudier séparément. En court-circuitant électrodes de référence et contre électrode, il est aussi possible de mesurer l'impédance totale de la PàC, de façon à obtenir une caractérisation globale de la pile en fonctionnement. En pratique, ces appareils sont limités en intensité (1 A en général pour la recherche à l'échelle du laboratoire et jusqu'à plusieurs dizaines d'A pour des systèmes spécialisés). Plus la surface active de la PàC est grande, plus l'intensité qu'elle débite est importante et plus le domaine de potentiel accessible aux mesures est limité aux faibles surtensions.

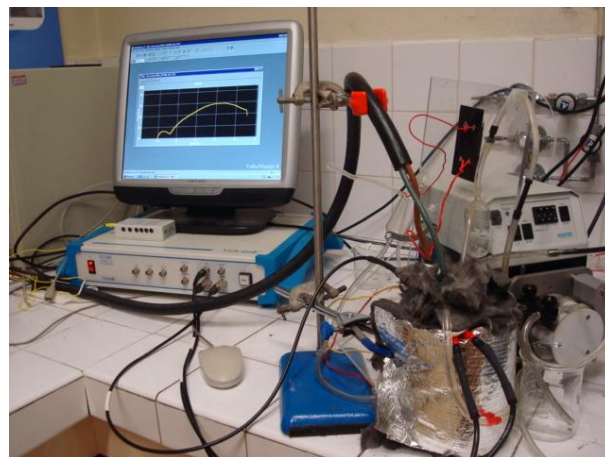


Figure 1 : équipement permettant d'effectuer des mesures d'impédance sur une PàC avec au premier plan la pile H_2/O_2 calorifugée et au fond l'analyseur harmonique et son PC.

Analyse harmonique

Les impédances électrochimiques traduisent, dans le plan complexe, l'amortissement (ou gain) et le déphasage entre une perturbation de type potentiel électrique et une réponse de type en courant, en fonction de la fréquence f en Hz. Dans la très grande majorité des cas, l'analyse harmonique est utilisée. Une perturbation

harmonique (monochromatique) en tension est appliquée et la réponse de même fréquence en courant est mesurée. Stricto sensu, les interfaces électrochimiques ne peuvent pas être assimilées à des systèmes linéaires et invariants dans le temps (SLIT). Ainsi, les relations courant-tension mesurées aux interfaces électrode-électrolyte sont assez fortement non-linéaires : il s'agit en fait de relations exponentielles qui suivent la loi dite de Butler – Volmer (du nom de deux électrochimistes célèbres). En pratique, la linéarisation est obtenue en limitant l'amplitude de la tension excitatrice. Dans la majorité des cas, des amplitudes de l'ordre de 5 à 20 mV maximum sont utilisées et l'interface électrochimique est assimilée à un SLIT, c'est-à-dire un système régi par des équations intégral-différentielles linéaires à coefficients constants. A un signal d'entrée $[A \cos 2\pi ft]$ correspond un signal de sortie $[B \cos (2\pi ft - \phi)]$ de même fréquence f , modulé en amplitude (le rapport B/A , qui est une fonction de f , est le gain de la fonction de transfert) et déphasé (l'angle de phase ϕ est le déphasage). Il suffit donc en pratique de mesurer, pour chaque fréquence f d'intérêt, le rapport des amplitudes crête du signal d'entrée et du signal de sortie, ainsi que le déphasage, pour avoir un relevé point par point de la fonction de transfert.

Analyse non-harmonique

Des techniques non-harmoniques peuvent être utilisées dans certains cas spécifiques pour mesurer l'impédance d'un système électrochimique. Tout d'abord, des analyseurs à bruit blanc (méthode stochastique) peuvent être utilisés pour réduire la durée des mesures [2]. Dans d'autres cas encore plus particuliers, par exemple lorsque les processus électrochimiques sont le siège de phénomènes très fortement non-linéaires tels que l'hystérésis [3], l'analyse harmonique est à proscrire et les diagrammes d'impédance peuvent être obtenus à partir de perturbations de type échelon (Heaviside). En pratique, les « échelons » délivrés par les potentiostats sont des fonctions exponentielles à temps de montée fini, du type : $E(t) = A \cdot [1 - \exp(-t/\tau)]$ (1)

De tels signaux ($\tau \approx 10^{-4}$ s) sont nécessaires pour exciter la capacité de double couche [4]. Un échantillonnage correct requiert donc des cadences d'échantillonnage d'un point toutes les 0.1 msec, et l'utilisation d'un échantillonneur performant (oscilloscope numérique). La partie du signal aux temps longs varie de façon plus monotone. Elle est mesurée à une cadence plus faible puis interpolée. L'impédance non-harmonique est ensuite obtenue en prenant le rapport des transformées de Fourier discrètes des deux signaux. Un exemple de signaux temporels bruts d'acquisition (bruités) est donné sur la figure 2. L'impédance est obtenue selon :

$$Z(\omega) = \frac{TF \{E(t)\}}{TF \{I(t)\}}$$

avec $\omega = 2\pi f$.

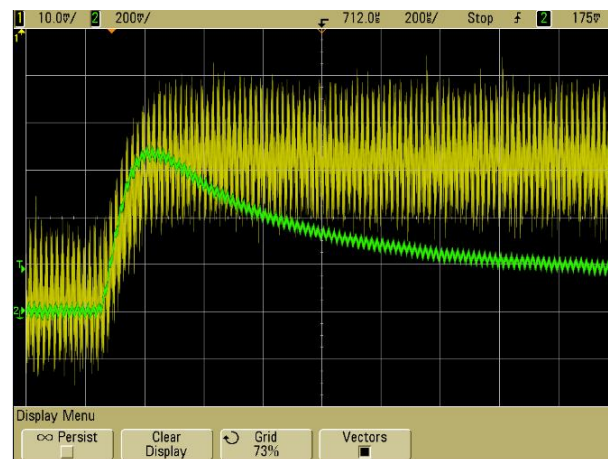


Figure 2 : échelon de tension $E(t)$ (jaune) de 10 mV d'amplitude et réponse chrono-ampérométrique $I(t)$ (vert) aux temps courts d'une électrode de palladium de 0.5 cm² dans H₂SO₄ 0.1 M.

Représentation paramétrique des impédances

Les impédances électriques sont en général représentées sous forme de diagrammes de Bode : d'une part le module de l'impédance $|Z(\omega)|$ en fonction de la fréquence et d'autre part la phase ϕ en fonction de la fréquence. Les électrochimistes utilisent plutôt les diagrammes dits 'de Nyquist' pour représenter les impédances électrochimiques. Il s'agit d'une représentation paramétrique en fréquence sur laquelle l'inverse de la partie imaginaire de l'impédance $-Im\{Z(\omega)\}$ est tracée en fonction de la partie réelle $+Re\{Z(\omega)\}$ (figure 3). Soit $Z(\omega_0)$ l'impédance mesurée à la pulsation particulière ω_0 . La correspondance entre diagramme de Bode et de Nyquist s'écrit :

$$|Z(\omega)| = \sqrt{[Re\{Z(\omega)\}]^2 + [Im\{Z(\omega)\}]^2}$$

$$\phi = \text{Arctg} \left(\frac{Im\{Z(\omega)\}}{Re\{Z(\omega)\}} \right) \quad (2)$$

En pratique, les intensités (I en A) sont converties en densités de courant (i en A.cm⁻²) en divisant leur valeur par l'aire active de l'électrode exprimée en cm². Cela permet de comparer les performances obtenues avec des cellules de surfaces différentes. De ce fait, les impédances s'expriment en V.A⁻¹.cm² c'est-à-dire en Ω.cm² (figure 3). Il est à noter que l'information (les valeurs d'impédance) se trouve étalée sur plusieurs décades de fréquence, allant typiquement de 100 kHz à quelques mHz. La limite basse fréquence de l'impédance donne la valeur de la pente de la caractéristique courant-tension stationnaire au point de mesure.

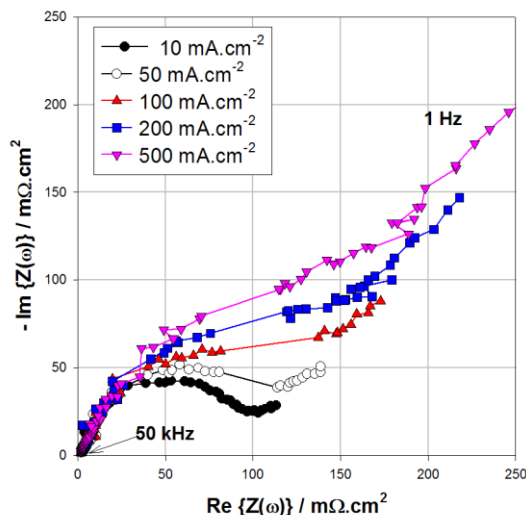
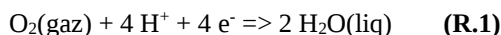


Figure 3 : diagrammes d'impédances en coordonnées de Nyquist, mesurés sur une négative en palladium de 0,5 cm² dans H₂SO₄ 0,1 M, à différentes densités de courant.

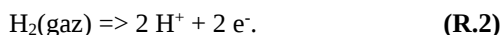
3. Description détaillée d'une cellule élémentaire de PàC H₂-O₂

Réactions électrochimiques

Une PàC est constituée de deux électrodes. Celle ayant le potentiel électrique le plus élevé est appelé « électrode positive » ou « positive ». Elle est le siège d'une réaction de réduction :



Celle ayant le potentiel électrique le plus bas est appelé « électrode négative » ou « négative ». Elle est le siège d'une réaction d'oxydation :



Il est à noter que les protons qui se déplacent à travers la membrane de l'anode vers la cathode par migration ionique sont solvatés, c'est-à-dire accompagnés d'un cortège de molécules de solvation. Selon les matériaux polymères utilisés, ce nombre varie entre 1 et 5. Cela signifie donc que pour un bon fonctionnement de la pile, de l'eau doit être fournie à l'anode (alimentation par de l'hydrogène hydraté après barbotage dans un humidificateur de gaz) et que de l'eau liquide doit être évacuée à la cathode (celle issue de la réduction de l'oxygène et celle qui accompagne des protons). Enfin, rappelons qu'une PàC en fonctionnement est un co-générateur de chaleur et d'électricité, et que la chaleur produite doit être évacuée de façon à ce que la pile fonctionne dans un domaine de température stable (entre 80°C et 100°C pour une PàC PEM).

Schéma de principe d'une cellule élémentaire

En pratique, une PàC est constituée de l'empilement en série de n cellules élémentaires, n pouvant être égal à plusieurs centaines. Le schéma de principe d'une cellule

élémentaire de PàC H₂-O₂ à électrolyte polymère solide est représenté sur la figure suivante (4-a). Le cœur de pile est constitué par ce qui est parfois appelé un assemblage membrane électrode ou AME (figure 4-b). L'AME est monté entre deux plaques bipolaires (ou distributrices) métalliques qui empêchent le mélange des gaz entre cellules, tout en assurant la conduction électronique transversale. Ces plaques bipolaires sont munies de canaux par lesquels circulent les fluides.

L'AME est constituée de deux couches catalytiques (nanoparticules de platine déposées sur du noir de carbone, épaisseur type de l'ordre de quelques microns) déposées de part et d'autre d'un film polymère à conduction protonique (épaisseur type allant de 50 à 200 microns). De part et d'autre sont ensuite pressées deux électrodes à diffusion gazeuse. Leur rôle consiste à favoriser les phénomènes de transport entre les couches catalytiques et les plaques bipolaires. En particulier, côté cathodique (positive de la pile), de l'eau liquide formée à l'interface doit être évacuée vers les plaques bipolaires. L'eau liquide formée ne doit pas empêcher l'arrivée de l'oxygène gazeux à la cathode sous peine d'arrêt de fonctionnement de la pile. Un agent hydrophobe tel que le polytétrafluoréthylène (PTFE) est ajouté pour faciliter l'évacuation de l'eau.

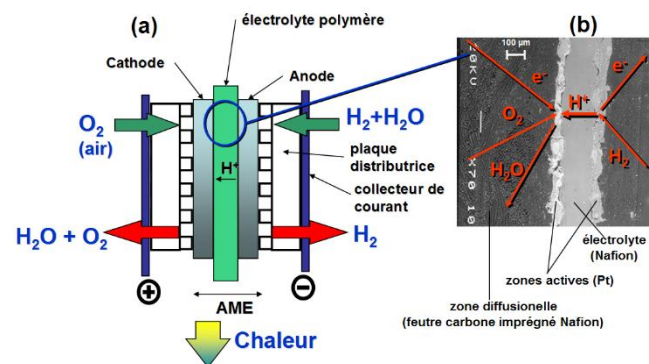


Figure 4 : (a) schéma de principe d'une PàC H₂-O₂; (b) micrographie d'une AME de PàC obtenue par microscopie électronique à transmission.

4. Impédance individuelle des différents constituants de la PàC

La membrane polymère

Dans une PàC à électrolyte polymère solide, on utilise une feuille (membrane) de matériau polymère comme électrolyte. D'un point de vue chimique, il s'agit d'un matériau perfluorosulfoné à conduction protonique, copolymère du tétrafluoréthylène et d'un perfluorovinyléther, présentant une bonne stabilité chimique dans les conditions de fonctionnement (température, contact avec de l'oxygène). Le plus utilisé est probablement le Nafion® de la société nord-américaine duPont de Nemours. D'une manière générale, la conduction ionique suit la loi d'ohm. La

membrane d'épaisseur e et de surface S est donc caractérisée par une conductivité ionique intrinsèque ρ_M et son impédance Z_M est purement résistive, c'est-à-dire indépendante de la pulsation $\omega = 2\pi f$ de la tension excitatrice (ω est la pulsation en rad.s^{-1} et f désigne la fréquence en Hz) :

$$Z_M = R_M = \rho_M \frac{e}{S} \quad (3)$$

Les interfaces électrode-électrolyte

Une interface électrode-électrolyte est le lieu où se produisent les processus électrochimiques proprement dits : réactions chimiques induites par des transferts électroniques entre électrode et électrolyte. En régime stationnaire (courant constant), lorsqu'une interface électrochimique est excitée par une tension surimposée de faible amplitude, sa réponse peut être considérée comme linéaire. L'impédance du processus de transfert de charge est donc de type ohmique. On lui associe une résistance d'activation R_{act} en Ω , indépendante de la pulsation ω . Mais il faut également prendre en compte le fait qu'il s'agit d'une interface chargée, assimilable à une capacité plane C (en Farad) dite « capacité de double couche » (du nom de la structure de l'interface où se trouvent en vis-à-vis, de part et d'autre du plan d'interface, un ensemble d'électrons dans le métal et un ensemble d'ions adsorbés côté électrolyte). L'impédance complète de l'interface électrode – électrolyte peut donc être représentée par la mise en parallèle d'une capacité C d'impédance $Z_C = 1/(j\omega C)$ où $j = \sqrt{-1}$ et d'une résistance d'activation R_{act} .

La couche de diffusion gazeuse

Dans le cas spécifique de la PàC, où les réactifs (H_2 et O_2) sont amenés aux interfaces par diffusion gazeuse, une impédance supplémentaire peut apparaître dans certaines conditions opératoires. On parle d'impédance de diffusion ou impédance de Warburg (du nom de celui qui a proposé son expression pour la première fois) notée schématiquement par la lettre W . L'expression analytique de ce type d'impédance est obtenue en résolvant l'équation de transport (loi de Fick) avec les conditions aux limites propres à la géométrie de la PàC. On obtient (voir Annexe) :

$$Z_W(p) = - \left(\frac{\partial E}{\partial C} \right) \frac{1}{F \sqrt{2 \omega D}} [1 - j] \quad (4)$$

Pour toute fréquence, $\text{Re}\{Z(\omega)\} = - \text{Im}\{Z(\omega)\}$; le graphe de l'impédance est une droite à 45° dans le plan complexe.

5. Circuit électrique équivalent associé à une cellule de PàC

Processus à étapes multiples et impédances élémentaires

Le passage du courant dans la pile à combustible en débit correspond à un processus à étapes multiples : (i) oxydation de H_2 à l'anode (négative) avec formation de H^+ et transfert d'électron vers l'électrode ; (ii) transport de charge dans le circuit (électron dans les phases métalliques et ions dans l'électrolyte) ; (iii) réduction de O_2 à la cathode (positive) avec transfert d'électron depuis l'électrode, consommation de protons et formation d'eau. Chacune de ses étapes possède une cinétique propre donc une impédance propre (voir § précédent). L'impédance totale de la PàC, mesurée expérimentalement à l'aide d'un impédancemètre, résulte de ces impédances individuelles connectées en série ou en parallèle. L'impédance globale de deux impédances individuelles connectées en série est la somme de ces impédances individuelles. L'admittance globale de deux impédances individuelles connectées en parallèle est la somme des admittances individuelles.

Circuit simplifié

Les électrochimistes utilisent en général des analogies électriques pour représenter les systèmes qu'ils étudient. En première approximation (figure 5), chacune des deux électrodes de la PàC offre une réponse similaire [5]. Les deux résistances d'activation et les deux capacités d'interface de l'anode et de la cathode ne sont pas mesurables individuellement.

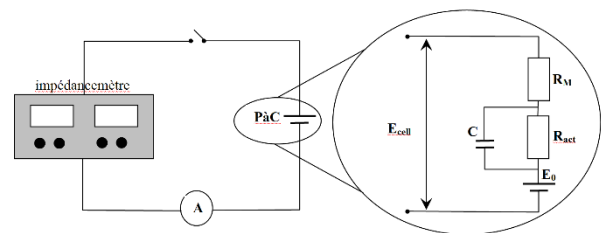


Figure 5 : principe de mesure de l'impédance d'une PàC et schéma électrique équivalent simplifié.

L'impédance correspondante s'écrit :

$$Z(\omega) = R_M + \frac{1}{\frac{1}{R_{act}} - \frac{\omega C}{j}} = R_M + \frac{R_{act}}{1 + j \omega C R_{act}}$$

Après réarrangement, on obtient :

$$Z(\omega) = R_M + \frac{R_{act}}{1 + (\omega C R_{act})^2} - j \frac{\omega C R_{act}^2}{1 + (\omega C R_{act})^2} \quad (5)$$

Il s'agit, dans le plan complexe de Nyquist $\{+Re ; -Im\}$, de l'équation d'un demi-cercle de rayon R_{act} situé le long de l'axe des réels et translaté de la valeur R_M . La pulsation caractéristique ω_c au sommet du demi-cercle vaut $1/(C.R_{act})$: sa détermination permet de remonter à la valeur de C .

Ainsi, il est possible de mesurer directement sur le diagramme expérimental les valeurs des différents paramètres microscopiques R_M , R_{act} et C .

Circuit complet

Dans le cas où la diffusion gazeuse des réactifs dans les électrodes de diffusion doit être prise en compte (fonctionnement de la pile à forte densité de courant, faible pression d'alimentation en gaz, pile 'noyée' par une mauvaise évacuation de l'eau formée à la cathode), il est nécessaire d'introduire une impédance de diffusion en série avec la résistance d'activation (figure 6) [5].

L'impédance totale de diffusion de la pile s'obtient en combinant l'impédance de diffusion de chaque électrode [6] :

$$Z_W(\omega) = \frac{\sigma}{(\omega)^{\frac{1}{2}}} - j \frac{\sigma}{(\omega)^{\frac{1}{2}}} \\ \text{avec } \sigma = \frac{RT}{\sqrt{2} (nF)^2 A} \left(\frac{1}{C_O \sqrt{D_O}} + \frac{1}{C_R \sqrt{D_R}} \right) \quad (6)$$

A = surface de l'électrode en cm^2

D = coefficient de diffusion en $cm^2.s^{-1}$ est espèces oxydées et réduites

C = concentration molaire en $mol.cm^{-3}$ des espèces oxydées et réduites

T = température absolue (K)

$R = 8,314 J.K^{-1}.mol^{-1}$ (constante des gaz parfaits)

$F = 96500 C.mol^{-1}$ (Faraday)

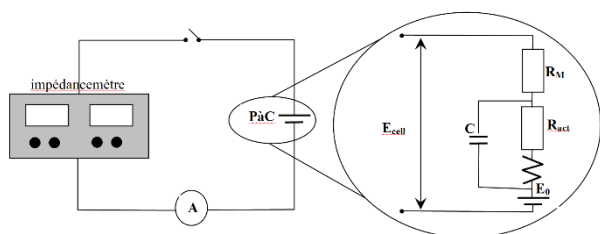


Figure 6 et schéma électrique équivalent complet de l'impédance d'une PàC.

Le diagramme d'impédance de la PàC est alors modifié par rapport au cas simplifié précédent. A basse fréquence, l'arc de cercle cesse de reboucler sur l'axe des réels et on voit apparaître un segment linéaire caractéristique à 45° dans le plan de Nyquist (voir Annexe). Les valeurs d'impédance mesurées le long de ce segment en fonction de la fréquence permettent dans certains cas de remonter à la valeur des coefficients de diffusion gazeuse. En pratique, les arcs de cercle mesurés expérimentalement ne sont pas toujours

parfaitement circulaires. Ils présentent assez souvent une forme écrasée qui provient de ce que les interfaces électrode-électrolyte ne sont pas parfaitement planes et que les lignes de courant ne sont pas totalement homogènes au niveau microscopique.

6. Diagrammes d'impédance expérimentaux et interprétation

Les résultats suivants ont été obtenus avec une monocellule de PàC de $2.5 cm^2$ d'aire active (figure 1).

Courbes de polarisation et limitations cinétiques

Une caractéristique courant – tension type mesurée sur la pile de laboratoire est représentée sur la figure 7. Trois régimes différents sont observés :

à faible densité de courant, la tension de pile chute fortement du fait des polarisations induites par les processus de transfert de charge aux interfaces (domaine a sur figure 7).

aux densités de courant intermédiaires, la tension de pile varie linéairement avec la densité de courant du fait des chutes ohmiques (domaine b sur figure 7).

aux fortes densités de courant, la tension de pile chute de nouveau fortement, du fait des polarisations liées aux problèmes d'apport en gaz aux interfaces (domaine c sur figure 7).

Selon les domaines, les diagrammes d'impédance apportent des informations différentes sur les limitations cinétiques de la PàC. Plus la pente de la caractéristique courant-tension est faible, plus l'impédance de la cellule est faible et inversement.

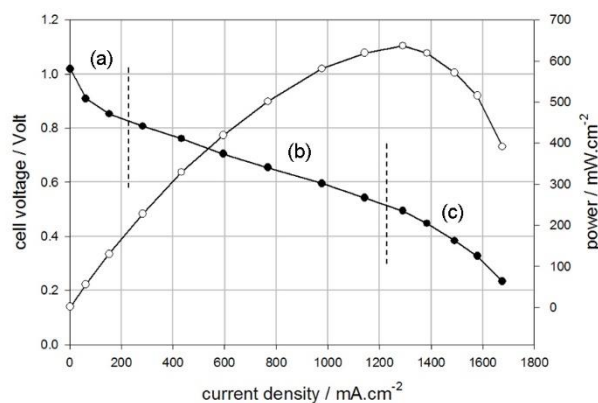


Figure 7 : tension de pile (●) et puissance de pile (○) en fonction de la densité de courant.

PàC d'une seule cellule de $7 cm^2$. $P_{H_2} = P_{O_2} = 3 b$. $T = 80^\circ C$.

Rôle des processus de transfert de charge aux électrodes

Aux faibles densités de courant, les diagrammes d'impédance révèlent des arcs de cercle dont le diamètre dépend du potentiel de la pile (figure 8).

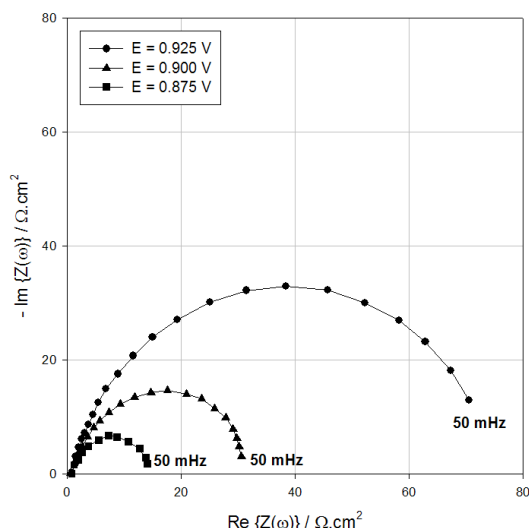


Figure 8 : rôle de la tension de pile sur la forme des diagrammes d'impédance. $T = 25^{\circ}\text{C}$; Nafion 117 ; $P = 1 \text{ atm}$.

On se trouve dans le cas de l'impédance modèle de la figure 5. Il peut être montré expérimentalement que l'impédance stationnaire (valeur de Z à faible fréquence) est due à la cinétique de réduction de l'oxygène par transfert de charge à la cathode. Par comparaison, la cinétique d'oxydation de l'hydrogène à l'anode est beaucoup plus rapide.

Rôle de l'hydratation de la membrane polymère

Les diagrammes d'impédance mesurés sur la même PàC, à différentes tensions de pile, sont tracés sur la figure 9.

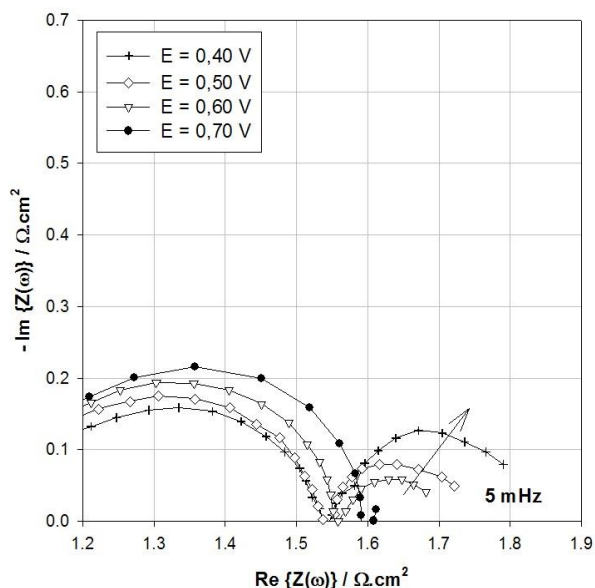


Figure 9 : rôle du potentiel à forte densité de courant sur la forme des diagrammes d'impédance.

A forte densité de courant (faible tension de pile), un second arc de cercle est parfois observé en basse fréquence. Il est relié à la teneur en eau dans la membrane. L'augmentation de son diamètre au fur et à mesure que la densité de courant augmente traduit le fait que la résistance de la membrane augmente avec la

densité de courant, du fait des difficultés croissantes pour l'hydrater correctement et donc d'une hydratation insuffisante de l'hydrogène envoyé à l'anode. Il s'agit d'une limitation liée à la vitesse de diffusion de l'eau dans le matériau polymère. On se trouve dans un cas intermédiaire entre les impédances modèles des figures 5 et 6.

Rôle de la chute ohmique dans la membrane

Plus l'épaisseur de la membrane polymère est élevée, plus l'impédance de la PàC (à une même valeur de potentiel de 0,7 V) est grande (figure 10). Cela traduit le fait que l'impédance de la PàC augmente puisque la résistance de la membrane augmente avec l'épaisseur (équation 3). On se trouve dans le cas de l'impédance modèle de la figure 5.

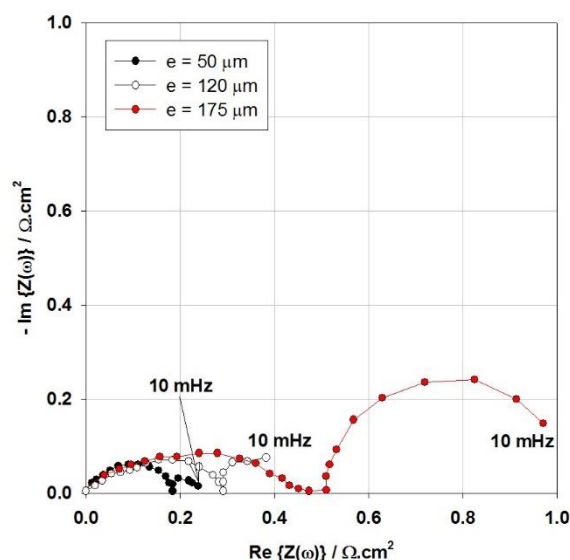


Figure 10 : rôle de l'épaisseur de la membrane sur la forme des diagrammes d'impédance.

$E = 0,40 \text{ V}$; $T = 25^{\circ}\text{C}$; $P = 1 \text{ atm}$.

7. Caractérisation de PàC commerciales de plus forte puissance

Une pile à combustible H_2/O_2 commerciale destinée aux applications pédagogiques dans les lycées techniques et l'enseignement supérieur [7] est représentée sur la figure 11. Elle est constituée d'un empilement modulable allant jusqu'à 10 cellules élémentaires d'environ 50 cm^2 d'aire active chacune. Sa puissance maximale est de 110 W pour une tension de 6 V. Les pressions recommandées pour un fonctionnement optimal sont de 1 à 2 bar pour H_2 et pour O_2 . Elle fonctionne soit avec de l'oxygène, soit avec de l'air à la positive. Le bâti expérimental représenté sur la figure 12 permet la mesure des caractéristiques courant-tension stationnaires en fonction de la température, de la pression des gaz et de leur humidification.

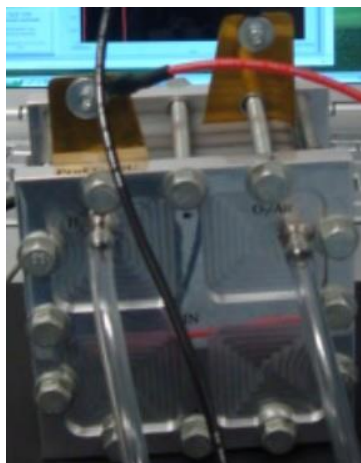


Figure 11 : pile à combustible H_2/O_2 de 110 W (source CETH). Dimensions : 13 x 13 x 7 cm ; Poids : 2 Kg.

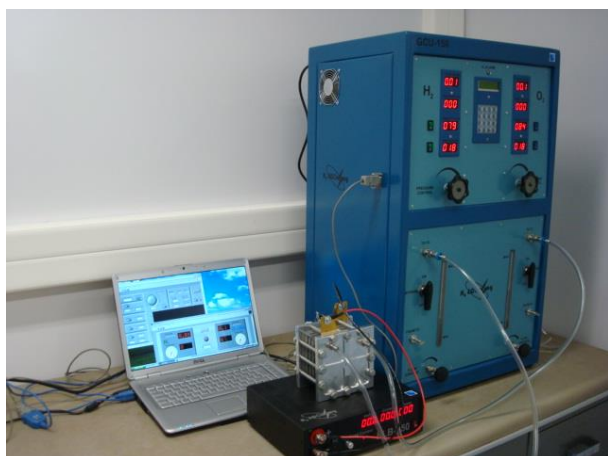


Figure 12 : bâti expérimental permettant la mesure des caractéristiques courant-tension d'une PàC. (1) PC de mesure ; (2) PàC ; (3) charge électronique ; (4) humidificateur de gaz et débitmètre.

Les caractéristiques courant-tension de la PàC de la figure 11, mesurées sous air et sous O_2 à l'aide du bâti de la figure 12, sont tracées sur la figure 13. Elles sont inférieures à celles obtenues sur des monocellules de petite surface (figure 7). La différence vient principalement de résistances parasites supplémentaires liées par exemple, à la conductivité électrique des plaques qui séparent chaque cellule. Dans la pile de la figure 11, les plaques séparatrices sont faites d'un mélange compact de poudre de carbone et de matériau polymère non-conducteur qui sert de liant.

La SIE permet de mesurer l'impédance de la pile complète ou de chacune de ses cellules de façon à vérifier leur bon fonctionnement individuel. Compte tenu de la surface active de la pile de la figure 11 (50 cm^2), les mesures d'impédances effectuées avec l'analyseur ($I_{\text{max}} = 4 \text{ A}$) sont limitées à des densités de courant de l'ordre de 80 mA, correspondant à une tension de cellule d'environ 800 mV. Exprimées en $\Omega \cdot \text{cm}^2$, les impédances de la pile complète (figure 14)

sont plus importantes que celles d'une seule cellule (figure 8). Mais dans les deux cas, le diamètre de l'arc de cercle diminue au fur et à mesure que la pile débite, ce qui indique que sa résistance interne diminue. Cette diminution provient principalement d'une augmentation exponentielle de la cinétique électrochimique aux deux interfaces (anode et cathode) de chaque cellule avec le courant [8].

8. Conclusion

La spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE) est un outil de caractérisation extrêmement précieux pour analyser le comportement des PàC. Elle permet de faire des mesures non-destructrices, in-situ, afin de mettre en évidence d'éventuelles anomalies de fonctionnement de la PàC. Elle peut être utilisée comme outil d'optimisation, une impédance élevée révélant une limitation cinétique intrinsèque d'une des étapes électrochimiques. Elle permet également de suivre d'éventuels processus de dégradation et sert donc d'outil de diagnostic.

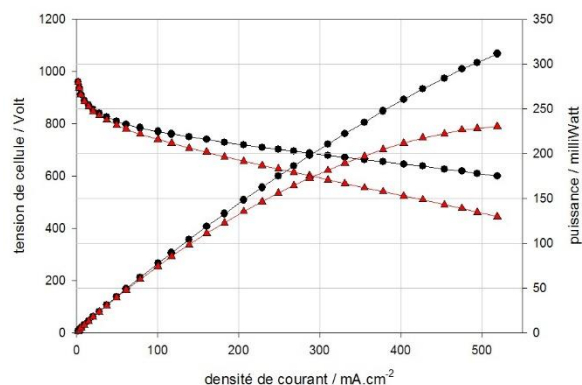


Figure 13 : caractéristiques courant – tension moyenne et puissance – courant moyenne mesurées sur la pile de la figure 11. (●) H_2/O_2 ; (▲) H_2/air .

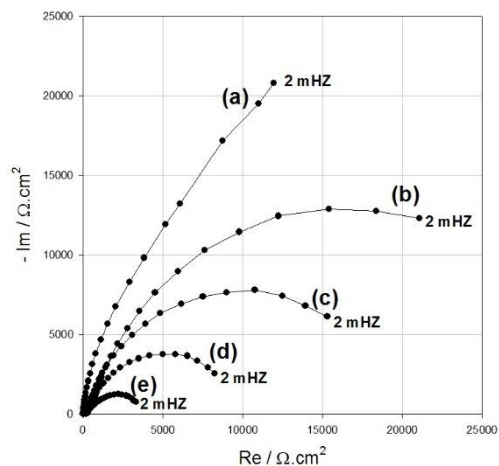


Figure 14 : diagrammes d'impédance de la PàC en fonction du potentiel d'électrode :

(a) 1010 mV ; (b) 980 mV ;
(c) 960 mV ; (d) 950 mV ; (e) 940 mV.

Références bibliographiques

[1] P. Millet, M. Guymont, S. Grigoriev, *Les piles à combustibles : historique et principes généraux*, Revue d'Electrotechnique et d'Electronique Industrielle, Société des Electriciens, n° 55, décembre 2008, p.

[2] J. Max et J-L. Lacoume, *méthodes et techniques de traitement du signal*, Dunod Ed., 1996

[3] P. Millet, *Thermodynamic paths in the two-phase domain of the PdH system and a method for kinetic analysis*, Electrochem. Com., 7 (2005) 40-44

[4] P. Millet, *Le réacteur électrochimique*, Les Techniques de l'Ingénieur, J4802, 2006

[5] F. Barbir « PEM Fuel Cells », Elsevier Academic Press, New York, 2005.

[6] E. Gileadi, *Electrode kinetics for Chemists, Chemical Engineers and Material Scientists*, VCH Publishers, New-York, 1993.

[7] société CETH (Compagnie Européenne des Technologies de l'Hydrogène), <http://www.ceth.fr>

[8] P. Stevens, F. Novel-Cattin, A. Hammou, C. Lamy, M. Cassir, *Piles à combustible*, Les Techniques de l'Ingénieur, D 3340, 2005

ANNEXE : Obtention de l'impédance associée à un transport par diffusion

Dans une pile à combustible, la vitesse avec laquelle les réactifs gazeux (H_2 et O_2) arrivent aux interfaces pour réagir peut être cinétiquement limitante. Cela introduit une impédance particulière appelée impédance diffusionnelle ou impédance de Warburg, dont l'expression analytique est obtenue de la façon suivante :

a- équations du modèle

D'un point de vue macroscopique, le transport de matière est régi par les équations phénoménologiques de Fick (1855). Il s'agit de lois empiriques inspirées des lois de Fourier sur la chaleur (1822). Dans un milieu monodimensionnel (l'axe des x est orienté perpendiculairement à l'AME de la PàC), homogène et isotrope, les première et seconde lois de Fick sur la diffusion s'écrivent :

$$J = -D \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} \quad (A.1)$$

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} \quad (A.2)$$

avec :

J = densité de flux de matière en $\text{mol.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$

D = coefficient de diffusion en $\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$

C = concentration en mol.cm^{-3}

x = distance en cm

Elles traduisent le fait que la force motrice du transport de matière (hors conditions convectives) est le

gradient de potentiel chimique qui, en première approximation et hors réaction chimique, peut être ramené à un gradient de concentration. Soit C_0 , la valeur de la concentration en tout x à $t = 0$: $C(x,0) = C_0$. Par commodité de calcul, on effectue alors le changement de variable :

$$\Delta C(x,t) = C(x,t) - C_0 \quad (A.3)$$

lequel satisfait l'équation :

$$\frac{\partial \Delta C(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 \Delta C(x,t)}{\partial x^2}$$

L'équation de Fick (A.2) se réécrit donc :

$$\frac{\partial \Delta C(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \Delta C(x,t)}{\partial x^2} \quad (A.4)$$

L'impédance associée à un mécanisme de transport par diffusion est obtenue en résolvant les équations de Fick en fonction de la géométrie du problème traité et des conditions aux limites associées.

b- solution générale de l'équation de diffusion

L'équation (A.4) est résolue par transformation de Laplace selon la variable réelle t :

$$p\overline{\Delta C}(x,p) = D \frac{d^2 \overline{\Delta C}(x,p)}{dx^2} \quad (A.5)$$

(A.5) est une équation différentielle ordinaire où p désigne une variable complexe ou non. La solution générale de (A.5) est :

$$\overline{\Delta C}(x,p) = A(p) \exp\left(-\sqrt{\frac{p}{D}} x\right) + B(p) \exp\left(+\sqrt{\frac{p}{D}} x\right) \quad (A.6)$$

c- conditions aux limites

L'impédance de Warburg est obtenue en considérant la diffusion dans un milieu semi-infini ($x > 0$), dont la frontière est en $x = 0$:

condition initiale :

$$x > 0; t = 0 : C = C_0; \quad (A.7)$$

conditions aux limites :

$$(1) x = 0; t > 0 : C = C_1 \text{ et}$$

$$\overline{C} = \frac{C_1}{p}$$

$$\Delta C = C_1 - C_0 \text{ et } \overline{\Delta C} = \frac{C_1 - C_0}{p} \quad (A.8)$$

$$(2) \text{ pour } x \rightarrow \infty : C = C_0 \text{ et}$$

$$\overline{C} = \frac{C_0}{p}$$

$$\Delta C = 0 \text{ et } \overline{\Delta C} = \frac{\overline{C} - C_0}{p} = 0 \quad (A.9)$$

Par substitution dans (A.5), on obtient la solution générale :

$$\overline{\Delta C}(x, p) = \frac{C_1 - C_0}{p} e^{-x \sqrt{\frac{p}{D}}} \quad (\text{A.10})$$

d. expression de la densité de courant

Le courant interfacial en $x = 0$ est donné par :

$$\overline{\Delta i}(p) = F D \left. \frac{d\overline{\Delta C}(x, p)}{dx} \right|_{x=0} \quad (\text{A.11})$$

En dérivant (A.10) par rapport à x , on obtient :

$$\frac{d\overline{\Delta C}(x, p)}{dx} = -\frac{(C_1 - C_0)}{p} \sqrt{\frac{p}{D}} \exp \left[-x \sqrt{\frac{p}{D}} \right]$$

$$\text{et} \quad \left. \frac{d\overline{\Delta C}(x, p)}{dx} \right|_{x=0} = -\frac{(C_1 - C_0)}{p} \sqrt{\frac{p}{D}}$$

$$\text{d'où} \quad \overline{\Delta i}(p) = -F D \frac{(C_1 - C_0)}{p} \sqrt{\frac{p}{D}} \quad (\text{A.12})$$

e. expression de la fonction de transfert

L'impédance de diffusion (caractéristique d'un régime de perturbation périodique établi) s'écrit :

$$Z_W(p) = \left(\frac{\partial E}{\partial C} \right) \frac{\overline{\Delta C}(0, p)}{\overline{\Delta i}(0, p)} \quad (\text{A.13})$$

$$\text{d'où} \quad Z_W(p) = - \left(\frac{\partial E}{\partial C} \right) \frac{1}{F \sqrt{p D}}$$

En explicitant $p = j\omega$ (ω est la pulsation de la perturbation soit $2 \pi f$) et après réarrangement, on obtient finalement :

$$Z_W(p) = - \left(\frac{\partial E}{\partial C} \right) \frac{1}{F \sqrt{2 \omega D}} [1 - j] \quad (\text{A.14})$$

Le graphe de (A.14) dans le plan de Nyquist $\{+Re ; -Im\}$ est une droite à 45° (déphasage constant, la partie imaginaire étant égale en valeur absolue à la partie réelle, quelle que soit la fréquence). Des exemples expérimentaux de ce type d'impédance sont donnés sur la figure 3.

Lire le revue 3EIc'est bien,

Lire la revue en étant abonné ... c'est très bien ,

*Faire connaître la revue autour de soi ...
c'est encore mieux !*

Simulation en VHDL-AMS d'une pile à combustible à membrane échangeuse de protons

Benjamin BLUNIER et Abdellatif MIRAOU

Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM)

Rue Thierry MIEG

Belfort CEDEX 90010, France

Email: benjamin.blunier@utbm.fr, abdellatif.miraoui@utbm.fr

Résumé :

Cet article présente la modélisation d'une pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) à l'aide du langage standardisé multi-domaine : le VHDL-AMS. Une comparaison est réalisée par rapport à d'autres approches de modélisation telles que les graphes de lien (bond-graphs) et les circuits équivalents électriques. La méthode proposée propose une décomposition structurelle de la pile à combustible en entités modélisables séparément permettant à plusieurs personnes de travailler simultanément sur le modèle (concurrent engineering) et de valider les parties indépendamment. Le modèle présenté considère les différents pertes (activation, concentration et ohmiques), la dynamique des gaz dans les canaux d'alimentation et les transferts d'eau dans la membrane permettant de prédire la résistance de la membrane. Le modèle a été validé expérimentalement sur une pile de type Ballard Nexa 1,2 kW.

1. Introduction

Les systèmes actuels sont devenus très complexes. La modélisation est maintenant une partie essentielle du cycle de conception permettant de valider, à moindre coût, les fonctionnalités et les performances du système dans son ensemble. Il est ainsi possible, grâce à de nouveaux outils, de caractériser et d'optimiser un système avant la réalisation d'un prototype. La méthode de Prototypage Virtuel Fonctionnel (PVF) est l'une de ces méthodes.

Le système pile à combustible est un bon exemple de complexité car celui-ci comprend des fonctionnalités multi-domaines (ou multi-physiques) à temps continu comme par exemple l'électromécanique (p. ex., moteurs), l'électricité (p. ex., charges électriques, composants passifs), l'électrochimie, la fluidique (p. ex., compresseur, canaux, etc.) et la thermique [11]. Le système pile inclut aussi des fonctionnalités numériques (à temps discret) pour le contrôle. En tenant compte de cette complexité, il est difficile d'appréhender un tel système dans sa globalité sans une méthodologie et des outils adaptés. Même en ne considérant uniquement la gestion de l'air dans la pile à combustible, il a été montré dans [7], [9] que l'approche devait nécessairement être globale.

Des méthodes pouvant traiter, avec un degré de confiance acceptable, la complexité des systèmes doivent être trouvées dans le but de concevoir et modéliser des composants et des systèmes qui répondent aux attentes. Une méthode systématique de conception descendante (*top-down*) doit être appliquée. Cette méthode consiste en la décomposition du système en un ensemble de composants qui interagissent entre eux. Ils

peuvent être eux-mêmes décomposés jusqu'à avoir un niveau de détail suffisant par rapport aux besoins [15]. Chaque composant peut avoir différents niveaux de détail et d'abstraction et peut être simulé comme une partie du système global. Il peut être conçu indépendamment des autres composants facilitant ainsi l'ingénierie simultanée (*concurrent engineering*).

La réponse à ce besoin a été le développement des langages de description matériel (*Hardware Description Languages, HDLs*) dans le domaine de l'électronique numérique (p. ex., FPGA). Plus tard, sont apparus les langages de description matériel acceptant à la fois des fonctionnalités à temps discret et à temps continu (*Mixed-Signal Hardware Description Languages, MSHDLs*). Ces différents langages sont utilisés pour développer des modèles simulables de systèmes réels hétérogènes, contenant à la fois des fonctionnalités de domaines énergétiques différents, appelés modèles multidisciplinaires [29]. Les domaines d'applications de ces puissants outils sont très vastes.

Les HDLs modernes supportent à la fois les mécanismes comportemental et structurel [15]. Le premier de ces mécanismes permet au concepteur d'exprimer le comportement du système à différents niveaux d'abstraction : d'un haut niveau d'abstraction à un niveau très détaillé. Le deuxième mécanisme permet au concepteur de construire le modèle d'un système global à partir de modèles de composants réutilisables et stockés dans des bibliothèques. Dès lors, dans une approche descendante de conception, un système peut inclure un composant très peu détaillé et uniquement décrit de façon comportementale. Un autre composant peut tenir compte, par exemple, des parasites et un autre, peut être décomposé en plusieurs composants d'un niveau plus bas.

Les MSHDLs supportent à la fois des fonctionnalités à temps discret et à temps continu. La première permet la modélisation de systèmes événementiels (*event-driven*) et numériques. La deuxième permet de modéliser des systèmes en utilisant des équations différentielles et algébriques (EDAs) dans lesquelles les solutions varient continuellement en fonction du temps.

Les besoins, énoncés précédemment, ont donné naissance à un grand nombre de langages propriétaires comme MAST (Analogy, 1986), HDL-A (Mentor Graphics, 1992). Les langages de ces environnements de simulation sont complètement indépendants et leur utilisation ainsi que leur l'interopérabilité sont très restreintes. Les modèles développés pour un système ne sont pas utilisables dans d'autres environnements. Des efforts pour palier ces limitations ont permis l'émergence de langages standardisés : le VHDL-AMS (*IEEE standard Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language - Analog and Mixed-Signal Extensions*) présenté par la suite et le Verilog-AMS (Open Verilog International).

Cet article présente un modèle VHDL-AMS d'un cœur de pile à combustible. Dans une première partie, le langage VHDL-AMS est exposé afin d'introduire ses principes de base. Dans une seconde partie, le modèle VHDL-AMS de la pile est expliqué en détail. Une comparaison avec les différentes approches qui ont été publiées jusqu'à présent (bond-graphs, circuits électriques équivalents et les schémas fonctionnels) est proposée. Enfin, les résultats de simulation sont présentés et comparés aux résultats expérimentaux obtenus avec le module Nexa 1,2 kW de Ballard.

2. Présentation du VHDL-AMS

2.1. Aperçu général

Le langage IEEE 1076.1, connus sous le nom VHDL-AMS et un surensemble du standard IEEE Std 1076-1993 (VHDL) qui permet de décrire et de simuler des systèmes à la fois analogiques et numériques. Le langage supporte les différents niveaux d'abstraction dans tous les domaines énergétique. Les modèles analogiques sont généralement des ensembles d'éléments qui peuvent être décrits par des équations différentielles et algébriques (EDAs). Le langage ne spécifie pas de technique particulière pour résoudre ces équations mais définit plutôt les résultats qui doivent être atteints. Les solutions de ces équations peuvent éventuellement contenir des discontinuités. Les interactions entre les parties numériques et analogiques d'un modèle sont supportées d'une manière flexible et efficace [23].

Le VHDL-AMS a été conçu pour couvrir un grand nombre de besoins dans le cycle de conception :

1. il permet la description de la structure d'un système. Cell-ci consiste à décrire comment il peut être décomposé en sous-systèmes de disciplines différentes et comment ces sous-systèmes sont interconnectés ;

2. il permet la spécification de la fonction d'un système en utilisant des équations et un langage de programmation familier ;
3. il permet de tester la conception du système par la simulation avant même que celui-ci soit fabriqué. Les concepteurs peuvent ainsi comparer différentes alternatives et tester la validité de différentes solutions sans les coûts, souvent élevés, d'un prototype réel. Le « modèle » testé est appelé prototype virtuel fonctionnel (PVF).

Par ailleurs, ce langage est par exemple très bien adapté pour exprimer les modèles comportementaux et les algorithmes de contrôle pour les constructeurs de voitures et les équipementiers [27]. En d'autres mots, il permet de spécifier les demandes du fabricant et les solutions du fournisseur. Il est également parfaitement adapté aux échanges de modèles entre les entreprises ou entre les laboratoires de recherche et l'industrie.

Plusieurs simulateurs commerciaux intégrant le VHDL-AMS existent : SystemVision (Mentor Graphics), Smash (Dolphin Integration), Simplorer (Ansoft) et SaberHDL (Synopsys).

2.2. Exemples de modèles

Afin d'illustrer au mieux le langage VHDL-AMS et de montrer sa puissance, nous proposons de présenter quelques exemples simples. Nous commencerons par un modèle de résistance. En utilisant la terminologie du VHDL-AMS, l'entité (*entity* en VHDL-AMS) est appelé *resistor* et les « bornes » de la résistance sont appelés *terminaux*. Le programme 1 décrit l'entité en VHDL-AMS. Il s'agit de l'interface du composant avec l'extérieur illustré graphiquement par la figure 1. Les deux premières lignes du programme indiquent que l'entité implique l'utilisation du *package* analogique « systèmes électriques ». Ensuite, la liste des propriétés et des paramètres est donnée. La résistance, étant un composant très simple. Elle n'a qu'un seul paramètre générique (*generic*) qui est la résistance électrique exprimée en ohms. Une valeur par défaut peut lui être affectée comme c'est le cas ici (*R: resistance:=1.0*). Tout texte présent après deux tirets « -- » est du commentaire et n'est donc pas interprété par le compilateur. Les noms *t1* et *t2* (ligne 1) sont associés à des terminaux (*terminal*) analogiques de nature électrique, représentant les nœuds (au sens des lois de Kirchhoff) du circuit. La nature électrique spécifie qu'une tension et un courant sont associés aux terminaux. Cela permet à la résistance d'être connectée à d'autres terminaux de même nature.

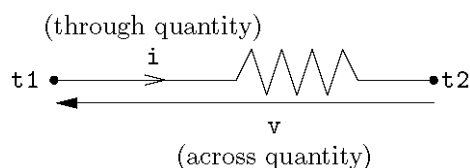


Figure 1 Représentation graphique de l'entité de la résistance

```

1 library ieee;
2 use ieee.electrical_systems.all;
3
4 entity resistor is
5 -- generic model parameters
6 generic(
7     quantity R : resistance := 1.0;
8 )
9 -- ports declaration
10 port(
11     terminal t1,t2 : electrical
12 );
13 end entity resistor;

```

Programme 1 Déclaration VHDL-AMS de l'entité (interface) de la résistance

L'étape suivante consiste à construire le modèle et définir le comportement de la résistance (Programme 2). À chaque terminal est associé des quantités de branche across et through qui représentent respectivement l'effort et le flux. Cette opération est réalisée à la ligne 1. Pour le domaine électrique, les variables prédéfinies de l'effort et du flux sont respectivement la tension et le courant.

Enfin, un ensemble d'équations différentielles et algébriques (EADs) est écrit afin de décrire les relations existant entre les quantités (variables d'état) du système. Ceci est réalisé grâce aux *instructions simultanées* (==) qui doivent être vérifiées à chaque pas de la simulation. Pour la résistance, l'instruction est très simple et directe. Il s'agit de la loi d'Ohm décrite à la ligne 1.

```

1 architecture behav of resistor is
2     quantity v across i through t1 to t2;
3 begin
4     v == i*R;
5 end architecture behav;

```

Programme 2 Architecture (comportement) VHDL-AMS de la résistance

À ce stade de la description, plusieurs éléments doivent être soulignées :

1. les équations sont écrites sous forme implicites : la plupart des logiciels tels que Matlab/Simulink n'acceptent pas les équations implicites et ne peuvent pas traiter les réseaux de type Kirchhoff ; un artifice de programmation, transparent pour l'utilisateur dans Matlab/Simulink, ajoute la notion de nœud de Kirchhoff dans les bibliothèques *Tool-boxes* SIMPower, SIMMechanics, SIMMxx. Ils ont besoin d'être décrits en termes d'entrées/sorties ce qui les rend très limités ;
2. le VHDL-AMS permet de représenter des systèmes ou des schémas de contrôle, sous forme de fonction de transfert (schémas fonctionnels) et n'a rien à envier de ce point de vue à Simulink ;

les modèles créés ne supposent pas dans quels systèmes ces composants seront intégrés. Dans un environnement tel que Matlab/Simulink, il est nécessaire de connaître à l'avance quel usage sera fait du modèle : la résistance est-elle connectée à une source de tension ou une source de courant ? Dans les deux cas, un modèle doit être construit contrairement au

VHDL-AMS où l'équation reliant les grandeurs est implicite : que ce soit le courant ou la tension qui est imposé l'équation $U = RI$ sera toujours vérifiée.

3. plusieurs architectures, de niveau d'abstraction différent par exemple, peuvent être associées à la même entité.

3. Modèle de la pile à combustible

3.1. Évaluation des différentes approches utilisées dans la littérature

De nombreuses approches ou formalismes ont été proposées pour modéliser les piles à combustible : graphes à liens ou graphes de liaison (*Bond-graphs*), circuits équivalents électriques et schémas-bloc ou schémas fonctionnels (*signal-flow*). Les méthodes numériques permettant de construire un modèle empirique à partir des résultats expérimentaux (p. ex., [39]) ne seront pas abordées dans cet article car elles ne permettent pas de construire un modèle de connaissance. Les modèles empiriques n'apportent pas d'information claire sur les propriétés physiques du système.

Bernardi *et al.* [5] ont été parmi les premiers auteurs à présenter une approche multi-domaines pour la modélisation de la pile à combustible. Dans cette approche, ils développent un modèle monodimensionnel, isotherme et en régime permanent. Le modèle décrit et prédit le transport d'eau dans la membrane, le transport des réactants et les surtensions ohmique et d'activation.

L'approche multi-domaines implique la résolution d'un ensemble d'équations pour chaque région de la pile, à savoir : la zone de diffusion des gaz cathodique et anodique (*gas diffusion layers, GDL*), les canaux d'alimentation (*gas flow channels*), la membrane et les zones catalytiques cathodique et anodique (*catalyst layers*). Les équations sont résolues séparément et simultanément [14]. Une analyse exhaustive des différentes approches pour la modélisation des piles à membrane échangeuse de protons a été réalisée par Cheddie [14] et Biyikoglu [6].

L'objectif de la partie suivante consiste en la comparaison des trois approches évoquées ci-dessus : les bond-graphs, les circuits équivalents électriques et les schémas fonctionnels.

3.1.1. Approche bond-graphs

Les bond-graphs sont un formalisme graphique permettant de décrire les échanges d'énergie dans un système afin de faciliter l'approche multi-domaines. De ce point de vue, le VHDL-AMS et les bond-graphs partagent certains avantages : ils permettent d'une part une décomposition structurelle du système en sous-systèmes [4]. Ils permettent, d'autre part, une approche fonctionnelle. Les bond-graphs, comme le VHDL-AMS, sont adaptés à tous les domaines de la physique (mécanique, électrique, fluide, hydraulique, etc.) et chaque système peut donc être facilement associé à d'autres systèmes de nature différente sans avoir à

recourir à des analogies entre les différents domaines énergétiques (p. ex., circuits équivalents électriques).

Les bond-graphs offrent un avantage pour le contrôle. En effet, la causalité est intrinsèque au formalisme ; les variables d'état sont définies explicitement et une simple lecture graphique permet de déterminer les critères d'observabilité et de contrôlabilité du système. Cependant, même si des modèles de piles, aussi complexes soient-ils, ont été présentés par Saisset [35] et Benbouzid [4], aucun de ces auteurs n'a présenté le contrôle associé. La complexité du modèle bond-graphs est-elle trop élevée pour établir facilement le contrôle ?

Même si les bond-graphs sont reconnus être un outil puissant, ils souffrent toutefois de certains défauts.

Premièrement, les liens ne peuvent représenter que les flux énergétiques (ou flux d'informations) échangés entre les systèmes en interaction : deux variables, l'effort et le flux (équivalentes aux variables *across* et *through* en VHDL-AMS) sont associées à chaque lien. La puissance échangée entre les deux systèmes est le produit de l'effort par le flux. Par exemple dans le domaine fluide, l'effort représente la pression (p) et le flux représente le débit volumique ($V^{\&}$). Dans certains systèmes, les piles à combustible en particulier, il est préférable d'utiliser le débit massique (q ou $m^{\&}$) qui permet de décrire la loi de conservation de masse tout en gardant la pression en pascals. Ceci n'est pas permis par les bond-graphs car le produit de ces deux variables n'est pas homogène à une puissance.

Deuxièmement, les bond-graphs n'autorisent pas nativement les discontinuités (Il existe les bond-graphs hybrides qui permettent de palier ce manque) car elles violent le principe de continuité de la puissance sur laquelle ils sont basés. Ainsi, ni les convertisseurs statiques, ni la partie numérique d'un système (p. ex., contrôleurs numériques, FPGA, etc.) ne peuvent être modélisés et les utilisateurs ont recours à des modèles moyens dans lesquels les phénomènes de commutation des interrupteurs ne sont pas modélisés [36]. Une représentation, appelée Réseaux Dynamiques Hybrides à Composants (RDHC), présentée dans [12], [13], permet de palier ce manque. Il a été montré que tous les systèmes qui sont modélisés par les bond-graphs le sont par les RDHC. L'un des avantages des RDHC sur les bond-graphs est la génération de systèmes hybrides (continu et discret). Contrairement au bond-graphs, ils permettent de générer un seul modèle valable pour toutes les configurations (topologies) du circuit. Ce formalisme a été largement développé dans notre laboratoire à l'UTBM dans le cadre des travaux de Chami [12].

Enfin, la lecture d'un modèle n'est pas une chose aisée pour un néophyte contrairement au VHDL-AMS où les équations physiques, directement écrites sous forme implicite (ou explicite) et commentées, peuvent être comprises par une autre personne.

3.1.2. Circuits équivalents électriques

Dans le but de modéliser et de simuler des systèmes autres qu'électriques, plusieurs méthodes utilisant les équivalences ou analogies entre les domaines énergétiques ont été adoptées. La méthode de base pour créer un nouveau modèle dans un environnement comme *Spice* est de combiner des blocs préexistants pour simuler la fonctionnalité désirée. Ainsi les sources de tension, les sources de tension contrôlées en courant [16], les résistances, les condensateurs et mêmes les semi-conducteurs [43] sont détournés du domaine électrique pour simuler le comportement de composants mécaniques, thermiques, fluidiques, etc.

Des modèles de piles à combustible ont été réalisés en utilisant cette méthode et peuvent être divisés en deux familles : les modèles représentant simplement le comportement électrique et les modèles incluant les phénomènes fluidiques.

Les premiers modèles comportent des sources de tension (p. ex, f.é.m. de la pile), des sources de tension contrôlées en courant (p. ex., pertes d'activations) et des résistances afin de modéliser les différentes chutes de tension. La capacité de double couche est modélisée par un condensateur. Le plus connu de ces modèles, sous forme de circuit électrique, a été présenté dans un grand nombre de publications et de livres [1], [2], [24],[28]. D'autres modèles, sur le même principe ont été présentés et ont été résumés par Runtz [33]. Ces modèles sont, pour la plupart, empiriques et les paramètres des composants sont déterminés par des méthodes d'interruption de courant ou de spectrométrie d'impédance. Toutefois, les relations empiriques ne permettent pas une bonne compréhension des phénomènes à l'intérieur de la pile. Ils ne peuvent, en effet, avoir un intérêt que dans le sens où les valeurs numériques des paramètres identifiés et leur évolution dans le temps peuvent être interprétés d'un point de vue physique.

Les circuits équivalents électriques ont toutefois une réelle utilité. Ils permettent d'avoir un modèle « petits signaux » d'une pile à combustible donnée capable de simuler son comportement avec un convertisseur statique. Ils sont donc adaptés à l'électronique de puissance, au dimensionnement et au contrôle du convertisseur statique associé [22],[34].

La deuxième catégorie de modèles intègre les phénomènes fluidiques en utilisant les équivalences électriques. Les conservations molaire ou massique de chaque espèce (H_2 , H_2O , O_2) sont modélisées par des sources de tension qui représentent les pressions et des sources de courant qui représentent les débits [16],[21]. D'autres composants, comme les résistances et les condensateurs, représentent, respectivement, les frottements et les volumes. Le modèle de Famouri [16] inclut les phénomènes transitoires, les pressions partielles et les irréversibilités de la pile. Wang *et al.* [42] ont développé un modèle dynamique basé sur l'analogie électrique, plus complexe, incluant la capacité de double couche et certaines des caractéristiques thermodynamiques de la pile. Ce modèle a été intégré et

simulé avec succès dans un système PàC comprenant des convertisseurs statiques et leur contrôle [41].

Cependant, l'approche par équivalences électriques a de grandes limitations car il est nécessaire d'avoir à disposition des blocs prédéfinis. Mais qu'en est-il si le concepteur a besoin de modéliser des effets tels que la dépendance à la température ? Qu'en est-il des composants fluidiques ou mécaniques qui ne peuvent pas être facilement modélisés avec des blocs prédéfinis ? Les concepteurs peuvent avoir des besoins impossibles à satisfaire avec les blocs prédéfinis. Et quand bien même il serait possible de réaliser les fonctionnalités de cette façon, la configuration ou la paramétrisation des composants ne serait pas aisée. Travailler avec de tels types de modèles peut être une réelle limitation pour le concepteur du système qui a besoin d'un modèle rapidement.

3.1.3. Schémas fonctionnels

L'approche par schémas-blocs est l'une des méthodes la plus répandues car elle est orientée pour le contrôle. La plupart des modèles de piles publiés sont développés dans l'environnement Matlab/Simulink. Pukrushpan [31], [32], [30], [40] ont publié l'un des modèles orienté contrôle le plus avancé et détaillé. En plus du modèle du cœur de pile, la modélisation prend en compte la dynamique des gaz et les principaux auxiliaires qui composent le système pile (compresseur, refroidissement, humidificateur). Ce modèle est basé sur une approche fonctionnelle et peut être divisé en quatre fonctionnalités distinctes : la tension de la pile, les débits des gaz à la cathode, les débits des gaz à l'anode et l'humidification de la membrane. Cette approche est très performante et parfaitement adaptée à la conception et l'analyse du contrôle. Mais elle a également des inconvénients car ces fonctionnalités sont interdépendantes et ne peuvent être simulées séparément en raison des boucles de rétroaction.

On peut remarquer dans cette approche fonctionnelle, que les différentes fonctionnalités représentent des domaines énergétiques différents. Les phénomènes électriques, fluidiques et l'humidité, bien que couplés, sont séparés. Mais, si le concepteur du système veut améliorer une partie du modèle, comment peut-il savoir exactement quelles sont les parties (fonctionnalités) du modèle à modifier ? Comment peut-il tester et prouver la validité de son modèle *indépendamment* des autres parties ?

Dans une approche structurale, ces questions ne posent pas de problème car si le concepteur veut inclure un nouveau phénomène dans la cathode par exemple, il sait que tous les phénomènes (électriques, fluidiques, électrochimiques, thermiques, etc.) relatifs à la cathode sont dans un seul composant

Dans une représentation en schémas-blocs, la causalité est fixée par l'entrée et la sortie : la sortie est la cause de l'entrée. Dans un système physique, il se peut que la causalité ne soit pas connue *a priori*. Cette approche ne permet donc pas de gérer les équations implicites au sein d'un circuit (lois de Kirchhoff généralisées). Par exemple, l'équation implicite d'une

résistance $U = RI$ ne suppose ni d'entrée ni de sortie alors que dans l'approche schémas-blocs, suivant si l'entrée est la tension ou le courant, les équations (ou fonctions de transfert) respectives s'écriront explicitement $I=U/R$ et $U = RI$. La résistance a donc deux représentations ou modèles distincts dans une représentation en schémas-blocs alors que le composant reste le même.

3.2. Approche descendante

L'approche que nous avons adoptée pour modéliser la pile à combustible peut être décrite par la figure 2. Deux niveaux d'abstraction y sont représentés [10] :

le « niveau cœur de pile » (figure 2 (a)) qui est un niveau d'abstraction élevé qui décrit uniquement la tension statique de la pile en fonction du courant. Ce niveau d'abstraction est le plus simple. Il est modélisé simplement par la caractéristique statique de la pile $V = f(I)$;

1. le « niveau en couches » (figure 2 (b)) est un niveau d'abstraction plus détaillé car il prend en compte des phénomènes plus fins. Il s'agit du modèle présenté dans ce chapitre. Il peut être décomposé, structurellement, en plusieurs parties :
 - les plaques bipolaires cathodiques (plaques distributrices de gaz) qui sont modélisées par des simples canaux dans lesquels les gaz peuvent entrer et sortir. Dans ce modèle, les pertes de charge dans les canaux ne sont pas prises en compte mais elles pourront être intégrées dans un modèle plus fin,
 - la couche de diffusion cathodique à travers laquelle l'oxygène et l'eau diffusent,
 - la vanne ou orifice de sortie des gaz qui permet de réguler la pression cathodique,
 - la couche catalytique où l'oxygène est consommé et l'eau est produite,
 - la membrane où les phénomènes de transport d'eau ont lieu (la diffusion d'azote n'est pas prise en compte),
 - la couche catalytique anodique où l'hydrogène est consommé,
 - la couche de diffusion anodique à travers laquelle l'hydrogène et l'eau diffusent,
 - les plaques bipolaires anodiques.

Chaque composant impose sa propre tension qui est dépendante d'une quantité (variable) du composant (p. ex., courant, pression partielle). La tension totale de la pile est obtenue par la mise en série des composants. Chacun de ces composants peut être décrit, modélisé, testé et validé indépendamment.

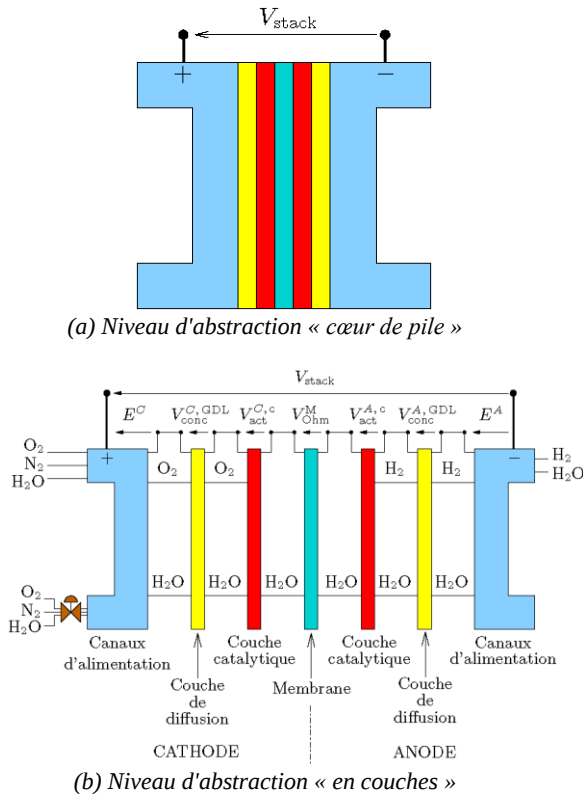


Figure 2 Niveaux d'abstraction du modèle de la pile à combustible

3.2.1. Liste des hypothèses

Pour une première approche, certaines hypothèses ont été formulées. La complexification du modèle consistera à enlever une à une ces hypothèses :

H1 Le phénomène de diffusion est considéré en régime permanent.

H2 La diffusion est linéaire et orientée dans la direction horizontale (gradient spatial de concentration constant).

H3 L'azote ne diffuse ni à travers les couches de diffusion ni à travers la membrane.

H4 Il n'y a pas de chute de pression (pertes de charge) dans les canaux d'alimentation en gaz.

H5 La pression d'hydrogène est constante et parfaitement régulée.

H6 La température dans la pile est homogène.

H7 Les volumes des canaux sont constants.

H8 Il n'y a pas d'accumulation d'eau dans les couches catalytiques cathodique et anodique

H9 L'activité cathodique de l'anode est considérée tellement élevée que toutes les pertes d'activation sont localisées à la cathode.

H10 Même si plus ou moins de disparités existent entre les tensions des cellules constituant le cœur de pile, on considère qu'une pile de n cellules est n fois le comportement d'une cellule moyenne équivalente. Remarque : le VHDL-AMS permettrait, grâce à une fonction (generate), d'instancier n cellules pour construire un cœur de pile composé de n cellules en série mais cette fonctionnalité n'est pas utilisée ici.

H11 Les gaz sont parfaits.

H12 L'eau ne sort pas des canaux en phase liquide mais seulement en phase vapeur : l'eau s'accumule ou s'évapore dans les canaux[32].

3.3. Modélisation des canaux d'alimentation en gaz

3.3.1. Cathode

D'après l'hypothèse H4, les pertes de charge dans les canaux de la pile ne sont pas considérées. Les pressions à l'entrée (indice in) et à la sortie (indice out) des canaux (exposant m) $p_{in}^{C,m}$ et $p_{out}^{C,m}$, respectivement, sont égales à la pression totale de la cathode (exposant C) p^C :

$$H11 \quad p_{in}^{C,m} = p_{out}^{C,m} = p^C = p_{O_2}^C + p_{N_2}^C + p_{H_2O}^C \quad (1)$$

où $p_{O_2}^C$, $p_{N_2}^C$ et $p_{H_2O}^C$ sont, respectivement, les pressions partielles d'oxygène, d'azote et de vapeur à la cathode (voir figure 3).

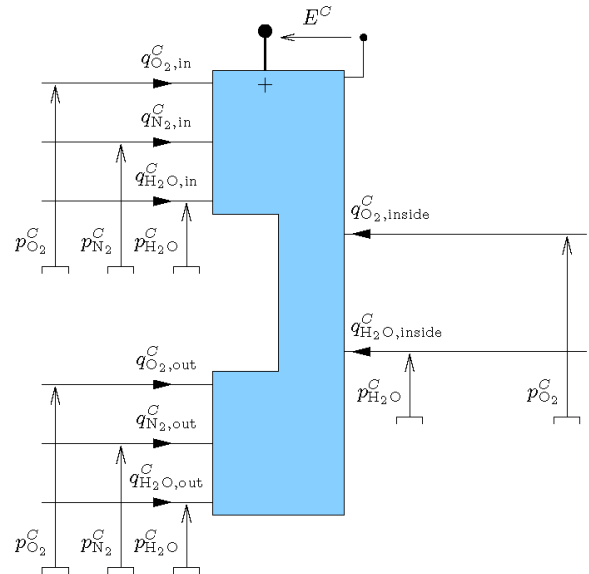


Figure 3 Canaux cathodiques

En considérant tous les gaz comme parfaits (H11), on peut écrire,

$$p_i = \frac{n_i RT}{V^C}, \quad (2)$$

où p_i est la pression partielle de l'espèce i et n_i est le nombre de moles de l'espèce i . V^C représente le volume des canaux cathodiques et T la température de la pile.

La dérivation de (2) donne :

$$\frac{dp_i}{dt} = \frac{RT}{V^C} \frac{dn_i}{dt} + \frac{Rn_i}{V^C} \frac{dT}{dt} - \frac{n_i RT}{V^{C^2}} \frac{dV^C}{dt}. \quad (3)$$

D'après H7 ($dV^C / dt = 0$), l'équation précédente peut être simplifiée :

$$\frac{dp_i}{dt} = \frac{RT}{V^C} \frac{dn_i}{dt} + \frac{Rn_i}{V^C} \frac{dT}{dt} \quad (4)$$

$$= \frac{RT}{V^C} \frac{1}{M_i} \frac{dm_i}{dt} + \frac{Rm_i}{V^C M_i} \frac{dT}{dt}, \quad (5)$$

où m_i et M_i sont, respectivement, la masse et la masse molaire de l'espèce i .

Chaque espèce au sein de la cathode peut soit entrer dans les canaux (indice in), soit en sortir par la vanne (indice out) et se diriger vers les sites catalytiques (indice inside). Le bilan massique de chaque espèce peut donc être écrit :

$$\frac{dm_i}{dt} = q_{i,in} + q_{i,out} + q_{i,inside} \quad (6)$$

avec $i \in \{O_2, N_2, H_2O\}$.

Le modèle complet, exposé dans [10], [8], tient compte de l'eau en phase liquide.

Finalement, un ensemble d'équations différentielles est obtenu :

$$\frac{dp_{O_2}^C}{dt} = \frac{RT}{V^C} \frac{1}{M_{O_2}} \frac{dm_{O_2}^C}{dt} + \frac{Rm_{O_2}^C}{V^C M_{O_2}} \frac{dT}{dt} \quad (7)$$

$$\frac{dp_{N_2}^C}{dt} = \frac{RT}{V^C} \frac{1}{M_{N_2}} \frac{dm_{N_2}^C}{dt} + \frac{Rm_{N_2}^C}{V^C M_{N_2}} \frac{dT}{dt} \quad (8)$$

$$\frac{dp_{H_2O}^C}{dt} = \frac{RT}{V^C} \frac{1}{M_{H_2O}} \frac{dm_{H_2O}^{C,V}}{dt} + \frac{Rm_{H_2O}^{C,V}}{V^C M_{H_2O}} \frac{dT}{dt} \quad (9)$$

$$\frac{dm_{O_2}^C}{dt} = q_{O_2,in}^C + q_{O_2,out}^C + q_{O_2,inside}^C \quad (10)$$

$$\frac{dm_{N_2}^C}{dt} = q_{N_2,in}^C + q_{N_2,out}^C \quad (11)$$

$$\frac{dm_{H_2O}^C}{dt} = q_{H_2O,in}^C + q_{H_2O,out}^C + q_{H_2O,inside}^C \quad (12)$$

D'après l'hypothèse H3, la diffusion de l'azote n'est pas considérée, c'est pourquoi, la conservation de masse de l'azote (11) ne tient pas compte de $q_{N_2,inside}^C$.

À partir de la pression partielle d'oxygène, la contribution de la cathode à la force électromotrice (f.é.m.) peut être calculée [25] :

$$E^C = n \left[1.229 - 0.85 \cdot 10^{-3} (T - 298.15) + \frac{RT}{2F} \ln \left(\sqrt{\frac{p_{O_2}^C}{101325}} \right) \right] \quad (13)$$

Le code VHDL-AMS complet de ce composant est donné dans la référence [8]

3.3.2. Anode

Le modèle des canaux de l'anode (figure 4) est basé sur celui de la cathode mais d'après l'hypothèse H5, on considère que la pression d'hydrogène est constante. La pile fonctionne en mode fermé (*dead end*). Ni l'hydrogène, ni l'eau ne peuvent être évacués de la pile par les canaux anodiques. Un futur modèle devra inclure la possibilité de réaliser les purges afin d'évacuer l'eau, voire l'azote ayant migré de la cathode vers l'anode.

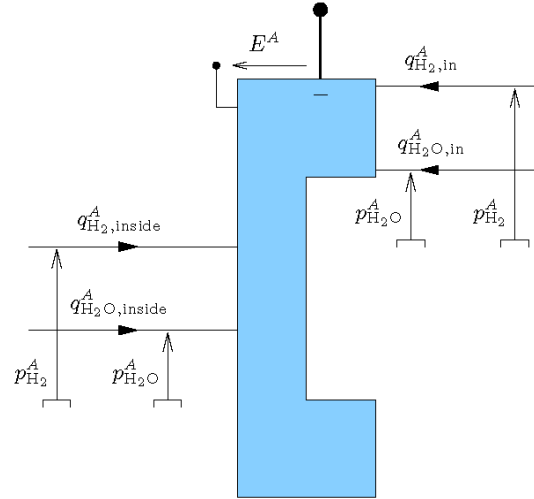


Figure 4 Canaux anodiques

En considérant ces hypothèses, on peut écrire l'ensemble des équations différentielles relatif à l'anode (exposant A) :

$$m_{H_2O}^A = \begin{cases} m_{H_2O}^A & \text{si } m_{H_2O}^A \leq m_{H_2O}^{A,Sat} \\ m_{H_2O}^{A,Sat} & \text{sinon} \end{cases} \quad (14)$$

$$m_{H_2O}^A = m_{H_2O}^{A,V} + m_{H_2O}^{A,L} \quad (15)$$

$$m_{H_2O}^{A,Sat} = \frac{p_{Sat}(T)V^A M_{H_2O}}{RT} \quad (16)$$

$$\frac{dp_{H_2O}^A}{dt} = \frac{RT}{V^A M_{H_2O}} \frac{dm_{H_2O}^{A,V}}{dt} + \frac{Rm_{H_2O}^{A,V}}{V^A M_{H_2O}} \frac{dT}{dt} \quad (17)$$

$$\frac{dp_{H_2}^A}{dt} = 0 \quad (18)$$

$$\frac{dm_{H_2O}^A}{dt} = q_{H_2O,inside}^A \quad (19)$$

où V^A est le volume de l'anode. D'après l'hypothèse H5, le débit d'hydrogène $q_{H_2,in}^A$ ne peut être contrôlé: il

est imposé par les sites catalytiques anodiques en aval des canaux; à l'inverse, l'alimentation en air de la cathode est imposée par le compresseur et l'humidificateur en amont des canaux.

À partir de la pression partielle d'hydrogène, la contribution de l'anode à la f.é.m. de la pile peut être calculée [25]:

$$E^A = n \frac{RT}{2F} \ln \left(p_{H_2}^A / 101\,325 \right). \quad (20)$$

3.4. Modélisation de la vanne de contrôle ou de l'orifice de sortie des gaz

Suivant le mode de fonctionnement de la pile, la pression à l'intérieur de la cathode peut être contrôlée ou non. Le paramètre k , représentant l'ouverture de la vanne peut être constant ou être utilisé comme une variable supplémentaire de contrôle[32].

La vanne, illustrée par la figure 5, peut être modélisée par un modèle linéarisé d'une fuite isentropique[32]:

$$q_{tot}^V = k(p_{tot,in}^V - p_{tot,out}^V) \quad (21)$$

où q_{tot}^V est le débit massique total à travers la vanne et $p_{tot,in}^V$ et $p_{tot,out}^V$ sont les pressions totales à l'entrée et à la sortie de la vanne.

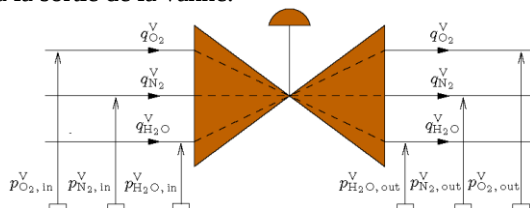


Figure 5 Modèle de la vanne

Il existe trois espèces (O_2 , N_2 et H_2O) dans le gaz. Le débit massique total peut donc être écrit :

$$q_{tot}^V = q_{O_2}^V + q_{N_2}^V + q_{H_2O}^V \quad (22)$$

avec,

$$q_{O_2}^V = g_{O_2} q_{tot}^V \quad (23)$$

$$q_{N_2}^V = g_{N_2} q_{tot}^V \quad (24)$$

$$q_{H_2O}^V = g_{H_2O} q_{tot}^V \quad (25)$$

où g_{O_2} , g_{N_2} et g_{H_2O} sont, respectivement, les fractions massiques d'oxygène, d'azote et de vapeur d'eau.

Les pressions totales à l'entrée et à la sortie dépendent également des trois espèces :

$$p_{tot,in}^V = p_{O_2,in}^V + p_{N_2,in}^V + p_{H_2O,in}^V \quad (26)$$

$$p_{tot,out}^V = p_{O_2,out}^V + p_{N_2,out}^V + p_{H_2O,out}^V \quad (27)$$

3.5. Modélisation des sites catalytiques

Les sites catalytiques (figure 6) imposent les débits massiques en fonction du courant (I) délivré par la pile.

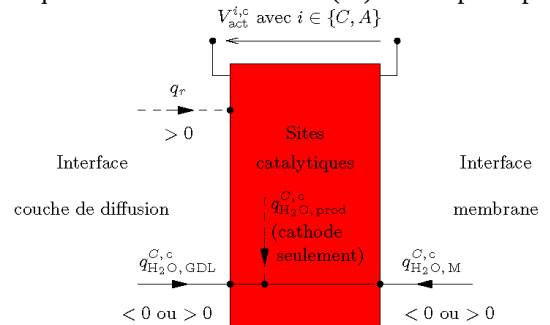


Figure 6 Couche catalytique

3.5.1. Cathode

Le courant électrique impose un débit massique d'oxygène des canaux vers les sites catalytiques (indice c) en passant par la couche de diffusion (indice GDL). Le débit d'oxygène imposé par les sites catalytiques à la couche de diffusion $q_{O_2,GDL}^{C,c}$ est donné par :

$$q_{O_2,GDL}^{C,c} = M_{O_2} \frac{In}{4F}. \quad (28)$$

Dans le même temps, l'eau est produite :

$$q_{H_2O,prod}^{C,c} = M_{H_2O} \frac{In}{2F}. \quad (29)$$

Le débit massique de vapeur d'eau $q_{H_2O,M}^{C,c}$ provenant de la membrane (voir figure 6) vers les sites catalytiques n'est pas connu *a priori*. Il est imposé par la membrane et sera présenté dans le modèle de la membrane détaillé plus loin.

De plus, d'après l'hypothèse *H8*, il n'y a pas d'accumulation d'eau dans les sites catalytiques ($dm_{H_2O} / dt = 0$). Le bilan massique d'eau peut donc être écrit :

$$q_{H_2O,GDL}^{C,c} = - (q_{H_2O,M}^{C,c} + q_{H_2O,prod}^{C,c}). \quad (30)$$

Le signe moins tient compte des conventions de signe. Si le débit massique d'eau produite $q_{H_2O,prod}^{C,c}$ dans les sites catalytiques est toujours positif, la quantité d'eau échangée entre la membrane et les sites catalytiques $q_{H_2O,M}^{C,c}$ peut être soit positif (l'eau vient de la membrane), soit négatif (l'eau est absorbé par la membrane).

La chute de tension due aux pertes d'activations est [25] :

$$V_{act}^{C,c} = -nA \ln \left(\frac{j}{b} \right) \quad (31)$$

où A et b sont des coefficients empiriques. Le courant j est défini de la façon suivante :

$$j = \frac{nI}{S_{tot}}, \quad (32)$$

où S_{tot} est la surface active totale de la pile et n , le nombre de cellules de la PàC.

3.5.2. Anode

Le courant électrique impose un débit d'hydrogène des canaux anodiques vers les sites catalytiques en passant par la couche de diffusion. Le débit massique d'hydrogène $q_{H_2,GDL}^{A,c}$ imposé par les sites catalytiques anodiques à la couche de diffusion est donné par :

$$q_{H_2,GDL}^{A,c} = M_{H_2} \frac{In}{2F}. \quad (33)$$

Il n'y a pas de production d'eau à l'anode. Le débit massique d'eau provenant de la membrane $q_{H_2O,M}^{C,c}$ n'est pas connu *a priori*, il est imposé par la membrane et sera présenté dans le modèle de la membrane.

De plus, d'après l'hypothèse *H8*, il n'y a pas d'accumulation d'eau dans les sites catalytiques ($dm_{H_2O} / dt = 0$).

Le bilan massique d'eau peut donc être écrit :

$$q_{H_2O,GDL}^{A,c} = - q_{H_2O,M}^{C,c}. \quad (34)$$

D'après l'hypothèse *H9*, il n'y a pas de chute de tension dans les sites catalytiques :

$$V_{act}^{A,c} = 0. \quad (35)$$

3.6. Modélisation des couches de diffusion

La relation entre la densité de courant j et le flux molaire J ($\text{mol cm}^{-2} \text{s}^{-1}$) venant des canaux vers les sites catalytiques est :

$$J = \frac{j}{n_e F}, \quad (36)$$

où n_e est le nombre d'électrons mis en jeu dans la réaction.

En régime permanent (*H1*), le flux molaire des réactants (des canaux vers les sites catalytiques) est égal au flux molaire des produits (des sites catalytiques vers les canaux).

3.6.1. Diffusion

La loi de Fick décrit la diffusion suivant l'équation suivante [28] :

$$J = -D \frac{dc}{dx}, \quad (37)$$

où J représente le flux molaire de diffusion, c la concentration molaire et D le coefficient de diffusion.

D'après l'hypothèse *H2*, l'équation (37) peut être écrite sous la forme :

$$J = -D \frac{c_i(d) - c_i(0)}{d}, \quad (38)$$

où $c_i(x)$ est la concentration du réactant i à l'abscisse x et d l'épaisseur de la couche de diffusion exprimée en centimètres.

Notons que J peut être soit positif (réactant) soit négatif (produit) comme l'illustre la figure 7.

Le flux de l'espèce i , noté J_i , peut être calculé à partir du débit massique q_i d'après la formule suivante:

$$q_i = J_i M_i S_{\text{tot}}, \quad (39)$$

où M_i est la masse molaire de l'espèce i et S_{tot} la surface active totale de la pile.

Les profils de concentration en régime permanent dans la couche de diffusion sont donnés par la figure 7

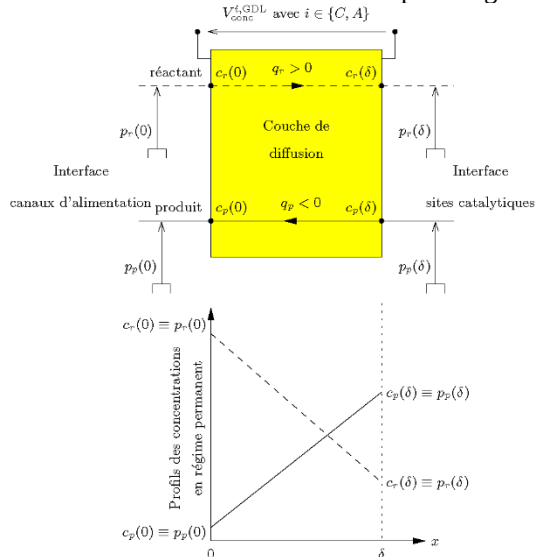


Figure 7 profils de diffusion et profils des concentrations en régime permanent

Pour des pressions faibles, le coefficient de diffusion binaire D_{ij} (deux espèces i et j dépend de la pression et de la température d'après la loi des gaz de Slattery [37], corrigée par la diffusivité effective connue sous le nom de correction de Bruggemann [28],[38]. L'ensemble des équations est donné dans les références[10],[8].

3.7. Cathode

Deux espèces, O_2 et H_2O , sont présentes à l'interface de la couche de diffusion (l'hypothèse H3 permet de négliger la diffusion d'azote).

Les pressions partielles d'oxygène et de vapeur d'eau à l'interface des sites catalytiques peuvent être calculées par :

$$p_{O_2}(d^C) = p_{O_2}(0) - \frac{J_{O_2}^C RT}{D_{O_2, H_2O}^{\text{eff}}} d^C \quad (40)$$

$$p_{H_2O}(d^C) = p_{H_2O}(0) - \frac{J_{H_2O}^C RT}{D_{O_2, H_2O}^{\text{eff}}} d^C \quad (41)$$

Les flux molaires $J_{O_2}^C$ et $J_{H_2O}^C$ sont calculés à partir des débits massiques correspondant $q_{O_2}^C$ et $q_{H_2O}^C$ avec(39).

La chute de tension par concentration est déduite des pressions partielles d'oxygène de part et d'autre de la couche de diffusion :

$$V_{\text{conc}}^{C, GDL} = -nC \ln \left(\frac{p_{O_2}(0)}{p_{O_2}(d^C)} \right) \quad (42)$$

3.8. Anode

Deux espèces, H_2 et H_2O , sont présentes à l'interface de la couche de diffusion. La pression partielle d'hydrogène et de vapeur d'eau à l'interface des sites catalytiques peuvent être calculées par :

$$p_{H_2}(d^A) = p_{H_2}(0) - \frac{J_{H_2}^A RT}{D_{H_2, H_2O}^{\text{eff}}} d^A \quad (43)$$

$$p_{H_2O}(d^A) = p_{H_2O}(0) - \frac{J_{H_2O}^A RT}{D_{H_2, H_2O}^{\text{eff}}} d^A \quad (44)$$

Les flux molaires $J_{H_2}^A$ et $J_{H_2O}^A$ sont calculés à partir des débits massiques correspondant $q_{H_2}^A$ et $q_{H_2O}^A$ avec (39).

La chute de tension par concentration (indice conc) est déduite des concentrations (ou pressions partielles) d'hydrogène de part et d'autre de la couche de diffusion :

$$V_{\text{conc}}^{A, GDL} = -nC \ln \left(\frac{p_{H_2}(0)}{p_{H_2}(d^A)} \right) \quad (45)$$

où C est un coefficient empirique et n , le nombre de cellules de la PàC.

3.9. Modélisation de la membrane

Le modèle de la membrane (voir figure 8) que nous avons développé est celui présenté par Springer [38]. Il s'agit d'un modèle monodimensionnel, isotherme. Les auteurs ont déterminé des relations empiriques corrélant la conductivité de la membrane, la porosité de l'électrode et le contenu d'eau dans une membrane de type Nafion.

La résistance de la membrane est déduite à partir de sa conductivité. Puisque cette conductivité est hautement dépendante de son contenu en eau, il est essentiel de connaître comment le contenu en eau de la membrane varie à dans celle-ci. Deux phénomènes antagonistes opèrent dans la membrane et doivent être pris en compte : l'électro-osmose (*electro-osmotic drag*) et la diffusion (*back diffusion*). Ces deux phénomènes seront présentés et modélisés dans les parties suivantes.

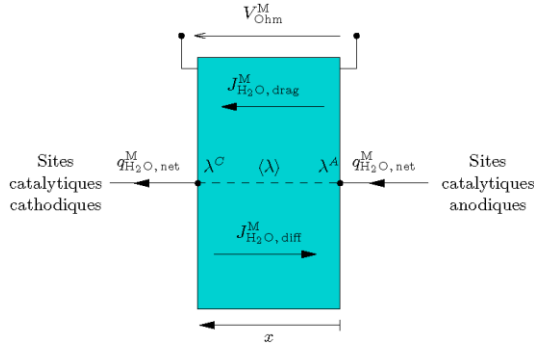


Figure 8 Membrane

3.9.1. Contenu en eau de la membrane

Le contenu en eau dans une membrane de type Nafion, représenté par l , n'est pas uniforme. Le coefficient l est défini comme étant le rapport du nombre de molécules d'eau par site chargé (sites sulfonates). Les résultats expérimentaux ont montré que l peut varier de zéro (membrane complètement déshydratée) à vingt-deux (membrane complètement saturée, sous certaines conditions)[28]. Afin de calculer le profil d'eau dans la membrane, les conditions limites doivent être connues. Le contenu d'eau est lié à l'activité de l'eau à l'interface de la membrane suivant la relation[38] :

$$l = \begin{cases} 0,043 + 17,81 a_{H_2O} - 39,85 a_{H_2O}^2 + 36,0 a_{H_2O}^3 & \text{si } 0 < a_{H_2O} \leq 1 \\ 14 + 1,4 (a_{H_2O} - 1) & \text{si } 1 < a_{H_2O} \leq 3 \end{cases} \quad (46)$$

Cette relation a été déterminée pour une température de 30 °C mais Springer *et al.* [38] ont supposé qu'elle restait valide pour des températures inférieures à 80 °C.

L'activité de l'eau est calculée à partir de la pression partielle d'eau p_{H_2O} et de la pression de saturation p_{Sat} :

$$a_{H_2O} = \frac{p_{H_2O}}{p_{Sat}(T)}, \quad (47)$$

où p_{Sat} est la pression de saturation. À partir de ces conditions limites, déterminées à la cathode (exposant C) et à l'anode (exposant A), le contenu en eau moyen de la membrane Nafion peut être calculé :

$$\langle l \rangle = \frac{l^C + l^A}{2}. \quad (48)$$

l^C et l^A sont déterminés à partir de (46) et des pressions de vapeur imposées à la cathode et à l'anode.

3.9.2. Électro-osmose

Soumis à un champ électrique, les protons migrent à travers les pores de la membrane (de l'anode vers la cathode) et entraînent dans leur sillage une ou plusieurs molécules d'eau. L'intensité à laquelle chaque proton entraîne les molécules d'eau est quantifiée par le coefficient d'électro-osmose n_{drag} défini comme le nombre de molécule d'eau accompagnant le mouvement de chaque proton [28]. Il est communément admis que n_{drag} varie linéairement avec l suivant la relation [38] :

$$n_{drag} = n_{drag}^{Sat} \frac{l}{22} \quad \text{pour } 0 \leq l \leq 22, \quad (49)$$

où $n_{drag}^{Sat} \gg 2,5$ est le coefficient d'électro-osmose pour des conditions d'hydratation maximale.

D'autres expressions du coefficient d'électro-osmose ont été présentées dans la littérature [20], [44] mais l'expression (49) a largement été utilisée [32], [38] et a montrée de bons résultats.

Le flux électro-osmotique (indice drag) d'eau $J_{H_2O, drag}^M$ de l'anode vers la cathode est une fonction de la densité de courant j et du coefficient d'électro-osmose n_{drag} [28] :

$$J_{H_2O, drag}^M = 2n_{drag} \frac{j}{2F} \quad (50)$$

3.9.3. Diffusion

Quand la concentration d'eau à la cathode est supérieure à la concentration d'eau à l'anode, l'eau diffuse de la cathode vers l'anode. Ce phénomène compense l'effet du flux électro-osmotique. Le flux de diffusion (indice diff) d'eau peut être déterminé par [38] :

$$J_{H_2O, diff}^M = - \frac{r_{dry}}{M_m} D_l \frac{dl}{dx}, \quad (51)$$

où r_{dry} est la masse volumique sèche du Nafion (0,00197 kg/cm³ [28]), M_m est la masse équivalente du Nafion ($M_m = 1,0$ kg/mol [28]) et x la direction normale à l'épaisseur de la membrane de l'anode vers la cathode.

La valeur numérique du coefficient de diffusion de l'eau dans la membrane D_l (cm²/s) n'est pas constante ; elle dépend de la température T et de la quantité d'eau l contenue dans la membrane [10], [8]

3.9.4. Bilan massique de l'eau

En combinant (50) et (51), le flux total d'eau dans la membrane peut être calculé :

$$J_{H_2O,net}^M = 2n_{drag} \frac{j}{2F} - \frac{r_{dry}}{M_m} D_l \frac{dl}{dx}. \quad (52)$$

La résolution de (52) donne le profil de l dans la membrane,

$$l(x) = \frac{11\alpha}{n_{drag}^{sat}} + C \exp\left(\frac{jM_n n_{drag}^{sat}}{22F r_{dry} D_{<l>}} x\right) \quad (53)$$

Les deux inconnues a et C (constante d'intégration) peuvent être calculées grâce aux conditions limites $l(0)$ et $l(d^M)$ calculées à partir de (46).

3.9.5. Résistance spécifique de la membrane et chute de tension

La conductivité du Nafion s^M (S/cm) est donnée par Springer [38] :

$$s^M(T, l) = s_{303K}(l) \exp\left[1268 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (54)$$

où,

$$s_{303K}(l) = s_1 l - s_2 \quad (55)$$

avec, $s_1 = 0,005193$ and $s_2 = 0,00326$.

La résistance spécifique de la membrane r^M ($W\ cm^2$) est obtenue en intégrant la résistance spécifique locale sur l'épaisseur de la membrane d^M (cm):

$$r^M = \int_0^{d^M} \frac{dx}{s^M(T, l(x))} \quad (56)$$

La chute de tension induite sur la pile par la résistance de la membrane est déduite de sa résistance spécifique r^M et de la densité de courant j d'après la loi d'Ohm :

$$V_{Ohm}^M = -nr^M j. \quad (57)$$

4. Simulation et validation expérimentale

La figure 9 montre le courant demandé à la pile à combustible. Les tensions expérimentale et simulée sont tracées sur la figure 10 : les résultats sont très proches et montrent que le modèle simule assez bien le comportement de la tension. Des différences sont cependant à noter pour des faibles et forts courants. Cette différence peut être en partie expliquée par l'hypothèse que l'air est saturé dans la cathode : le temps de réponse de l'échangeur de masse et de chaleur (humidificateur) de la Nexa n'est pas connu et peut avoir une influence sur le contenu en eau de l'air à l'entrée de la pile. Les grands temps de réponse sur la tension entre 1 500 secondes et 2 000 secondes peuvent être expliqués par la constante de temps de l'humidificateur et/ou le transitoire dans les transferts d'eau dans la membrane : le modèle pour ces phénomènes est en régime permanent. Un modèle plus fin doit donc être élaboré pour prendre en compte ces aspects.

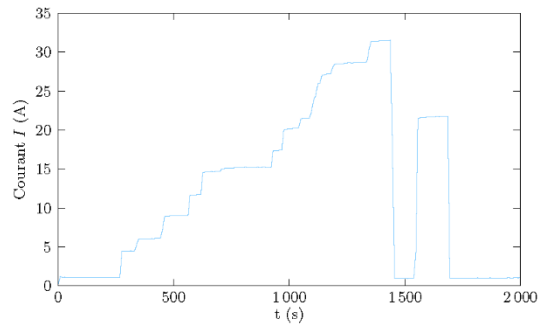


Figure 9 Courant délivré par la pile à combustible

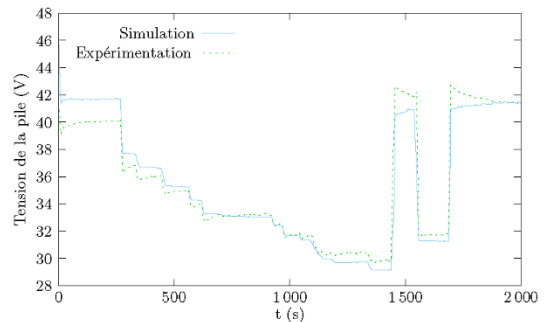


Figure 10 Tensions expérimentale et simulée

Cependant, les erreurs sur la tension entre le modèle et l'expérience, pour des faibles courants, n'ont pas une grande influence sur la puissance délivrée par la pile comme on peut le voir sur la figure 11. Les puissances simulée et expérimentale sont très proches : ce modèle peut par conséquent être utilisé dans un système où la pile à combustible est associée à d'autres sources d'énergie.

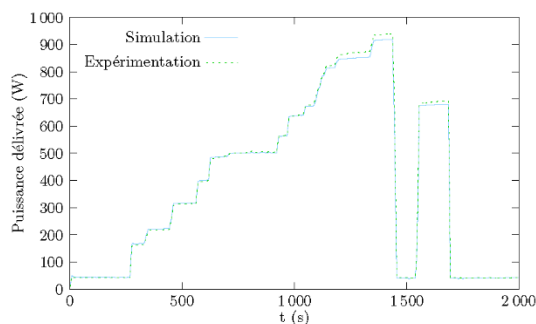


Figure 11 Puissances expérimentale et simulée

Comme il a été vu précédemment, la résistance spécifique de la membrane dépend de la température de fonctionnement de la pile (figure 12), du contenu d'eau (figure 13) et de la densité de courant. Cette dépendance a notamment été étudiée et démontrée expérimentalement par Friede[18],[19]. Mann *et al.* [26] ont proposé une expression empirique pour déterminer la valeur de la résistance spécifique de la membrane (voir figure 14). Les résultats prédits par (56) concordent bien avec ces travaux. On peut remarquer sur la figure 14 que la résistance de la membrane est loin d'être constante comme cela est considéré dans certains articles. Par exemple, au début de la simulation, la résistance spécifique est égale à 80 W et vers 1 500 secondes où le courant est pourtant le même (voir figure 9), la résistance spécifique est plus petite que 60 C car le contenu en eau dans la membrane mais surtout la température sont différents.

D'après le profil de la résistance obtenu en simulation (voir figure 14), la tension devrait décroître entre 1 700 s et 2 000 s car la résistance augmente. Cependant, le courant est très faible et l'effet de la résistance sur la tension n'est pas prédominant. Le contenu en eau de la membrane du côté de la cathode décroît à cause de la température. En effet, la pression partielle d'eau dans la cathode décroît et, par conséquent, la pression partielle d'oxygène augmente légèrement. D'après l'équation de Nernst, si la pression partielle d'oxygène augmente, la tension augmente. Ce phénomène explique la légère augmentation de la tension de la pile entre 1 700 s and 2 000 s.

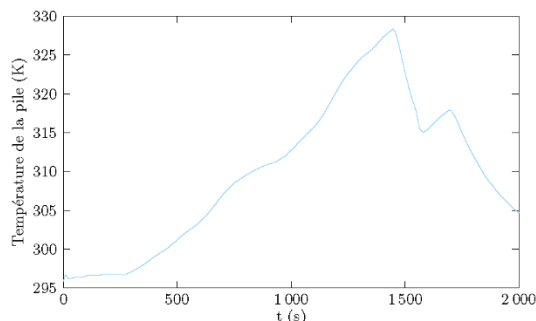


Figure 12 Température de la pile

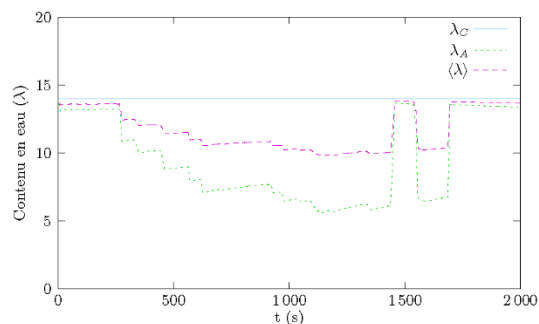


Figure 13 Contenu moyen d'eau dans la membrane et aux conditions limites

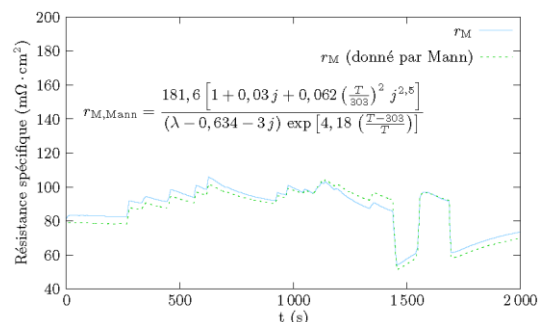


Figure 14 Valeur de la résistance spécifique de la membrane comparée à celle donnée dans [26], [17]

5. Conclusion

Cette article a présenté un modèle de pile à combustible VHDL-AMS d'un système de conversion d'énergie multi-physique : la pile à combustible. Une étude comparative entre les différentes approches de modélisation (bond-graphs, modèles équivalents électriques) est donnée afin de montrer l'avantage du langage VHDL-AMS dans la conception d'un système pile à combustible. Le modèle prend en compte un grand nombre de phénomènes nécessaires à la gestion de l'air dans une pile à combustible. Ainsi, la migration d'eau à travers la membrane (électro-osmose, diffusion) est prise en compte afin de déterminer la résistance de la membrane (pertes ohmiques). Le modèle et l'expérimentation concordent relativement bien en utilisant un minimum de paramètres à identifier.

Toutefois, pour qu'il soit parfaitement adapté à la gestion de l'air dans les piles à combustible, ce modèle doit inclure la dynamique de la température, mais aussi, phénomène plus important, l'influence de l'eau liquide dans les canaux. Ce dernier point sera intégré par la suite en se basant sur les travaux de Baschuk [3]. La dynamique de la température sera modélisée en considérant la pile comme un volume homogène d'une capacité thermique donnée, les sources de chaleur étant les pertes relatives aux irréversibilités d'activation, de concentration et ohmiques.

L'identification des paramètres ne peut se faire qu'avec un système dans lequel on dispose de tous les degrés de liberté possibles en termes de contrôle (système en boucle ouverte) ce qui n'est pas le cas avec le module Nexa. Dans le cadre du projet ANR Fisypac, un banc de tests d'une pile à combustible de 13 kW est mis en place. Ce banc permettra à terme d'évaluer

l'influence des différentes variables (température, pression, stœchiométrie, etc.) sur le fonctionnement de la pile. Il permettra, ainsi, d'identifier les paramètres empiriques avec beaucoup plus de précision.

6. References

- [1] Amphlett, J. C. and Mann, R. F. and Peppley, B. A. and Roberge, P. R. and Rodrigues, A. A model predicting transient responses of proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources*, 61:183-188, 1996.
- [2] Barbir, Frano. *PEM Fuel Cells, theory and practice* of Sustainable World. Elsevier Academic Press, 2005. ISBN-13: 978-0-12-078142-3 ; ISBN-10: 0-12-078142-5.
- [3] Baschuk, J.J. and Xianguo, Li. Modelling of polymer electrolyte membrane fuel cells with variable degree of water flooding. *Journal of Power Sources*, 86:181-196, 2000.
- [4] Benbouzid, Salim and Dauphin-Tanguy, Geneviève and Guillemard, Franck and Nouillant, Cédric. Electrochemical Phenomena Modelling in PEM Fuel Cell with Bond Graph Approach. *International Conference on Vehicle Power and Propulsion, IEEE VPP'04*, 2004.
- [5] Bernardi, Dawn M. and Verbrugge, Mark W. A Mathematical Model of the Solid-Polymer-Electrolyte Fuel Cell. *J. Electrochem. Soc.*, 139(9):2477-2491, 1992.
- [6] Biyikoglu, Atilla. Review of proton exchange membrane fuel cells models. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30:1181-1212, 2005.
- [7] Blunier, B. and Miraoui, A. Optimization and Air Supply Management of a Polymer Electrolyte Fuel Cell. *VPP, 2005 IEEE Conference*, pages 7pp., 2005.
- [8] Blunier, Benjamin. Modélisation de moto-compresseurs en vue de la gestion de l'air dans les systèmes pile à combustible, simulation et validation expérimentale. Thèse de Doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, Belfort, 2007.
- [9] Blunier, Benjamin and Miraoui, Abdellatif. Air management in PEM Fuel Cell : State-of-the-art and perspectives. *ACEMP'07, Electromotion*, pages 245-253, 2007. IEEE-PES-MSC. Invited paper.
- [10] Blunier, Benjamin and Miraoui, Abdellatif. Modelling of Fuel Cells using Multi-Domain VHDL-AMS Language. *Journal of Power Sources*, 177(2):434-450, 2007.
- [11] Blunier, Benjamin and Miraoui, Abdellatif. *Piles à combustible, Principe, modélisation et applications avec exercices et problèmes corrigés* of Technosup. 2007. Livre en français.
- [12] Chami, Mouhcine. Modélisation et simulation des systèmes multi-physiques à l'aide des réseaux dynamiques hybrides à composants : Application à la conversion d'énergie et au transport électrique terrestre. PhD thesis, Université de technologie de Belfort-Montbéliard, 2005.
- [13] Chami, Mouhcine and Djerdir, Abdesslem and Blunier, Benjamin and Saadi, J and Miraoui, Abdellatif. SimRDH: A Modelling and Simulation Environment with Component Hybrid Dynamic Nets, Elevator application. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 22:592-599, 2007.
- [14] Cheddie, Denver and Munroe, Norman. Review and comparison of approaches to proton exchange membrane fuel cell modeling. *Journal of Power Sources*, 147:72-84, 2005.
- [15] Christen, E. and Bakalar, K. VHDL-AMS-a hardware description language for analog and mixed-signal applications. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing*, [see also *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*], 46(10):1263-1272, 1999.
- [16] Famouri, P. and Gemmen, R.S. Electrochemical circuit model of a PEM fuel cell. *Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE*, 2003.
- [17] Farret, F. A. and Simoes, M. G. *Integration of Alternative Sources of Energy*. Wiley-IEEE Press, 1 edition, 2006. ISBN: 0471712329.
- [18] Friede, Wolfgang. *Modélisation et caractérisation d'une pile à combustible du type PEM*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine, Laboratoire, GREEN, 2003.
- [19] Friede, Wolfgang and Raël, Stéphane and Davat, Bernard. Mathematical Model and Characterization of the Transient Behavior of a PEM Fuel Cell. *IEEE, Transactions on Power Electronics*, 19(5):1234-1241, 2004.
- [20] Fuller, T. and Newmann, J. Experimental Determination of the Transport Number of Water in Nafion 117 Membrane. *Journal of Electrochemical Society*, 139:1332, 1992.
- [21] Hernandez, E. and Diong, B. A small-signal equivalent circuit model for PEM fuel cells. *Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC 2005*, pages 121-126, 2005.
- [22] Huang, B. and Sadli, I. and Martin, J.-P. and Davat, B. Design of a High Power, High Step-Up Non-isolated DC-DC Converter for Fuel Cell applications. *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2006. VPPC '06. IEEE*, pages 1-6, 2006.
- [23] IEEE. 1076.1.1 IEEE Standard VHDL Analog and Mixed-Signal Extensions - Packages for Multiple Energy Domain Support. IEEE Computer society, 2005.
- [24] Larminie, J. Current interrupt techniques for circuit modelling. *IEE Colloquium on Electrochemical Measurement*, pages 12/1-12/6, 1994.
- [25] Larminie, James and Dicks, Andrew. *Fuel Cell Systems Explained*. Wiley, 2 edition, 2003.

- [26] Mann, Ronald F. and Amphlett, John C. and Hooper, Michael A.I and Jensen, Heidi M. and Peppley, Brant A. and Roberge, Pierre R. Development and application of a generalised steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell. *Journal of Power Sources*, 86:173-180, 2000.
- [27] Moser, E. and Mittwollen, N. VHDL-AMS: the missing link in system design. Experiments with unified modelling in automotive engineering. *Design, Automation and Test in Europe, 1998., Proceedings*, pages 59-63, 1998.
- [28] O'Hayre, Ryan P. and Cha, Suk-Won and Colella, Withney and Prinz, Fritz B. *Fuel cell fundamentals*. John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [29] Pecheux, F. and Lallement, C. and Vachoux, A. VHDL-AMS and Verilog-AMS as alternative hardware description languages for efficient modeling of multidiscipline systems. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 24(2):204-225, 2005.
- [30] Pukrushpan, J.T. and Stefanopoulou, A.G. and Huei Peng. Control of Fuel Cell Breathing. *Control Systems Magazine, IEEE*, 24(2):30-46, 2004.
- [31] Pukrushpan, J.T. and Stefanopoulou, A.G. and Huei Peng. Modeling and Control for PEM Fuel Cell Stack System. *American Control Conference, 2002. Proceedings of the 2002*, pages 3117-3122vol.4, 2002.
- [32] Pukrushpan, Jay T. and Stefanopoulou, Anna G. and Peng, Huei. *Control of Fuel Cell Power Systems : Principle, Modeling Analysis and Feedback Design*. Advances in Industrial Control, 2004. ISBN : 1852338164.
- [33] Runtz, K.J. and Lyster, M.D. Fuel cell equivalent circuit models for passive mode testing and dynamic mode design. *Electrical and Computer Engineering, 2005. Canadian Conference on*, pages 794-797, 2005.
- [34] Sadli, I. and Thounthong, P. and Martin, J.-P. and Raël, S. and Davat, B. Behaviour of a PEMFC supplying a low voltage static converter. *Journal of Power Sources*, 156:119-125, 2006.
- [35] Saisset, Rémi and Fontes, Guillaume and Turpin, Christophe and Astier, Stéphan. Bond Graph Model of a PEM Fuel Cell. *Journal of Power Sources*, 156:100-107, 2006.
- [36] Saisset, R. and Turpin, C. and Astier, S. and Lafage, B. Study of thermal imbalances in arrangements of solid oxide fuel cells by mean of bond graph modelling. *Power Electronics Specialists Conference, 2002. pesc 02. 2002 IEEE 33rd Annual*, pages 327-332 vol.1, 2002.
- [37] Slattery, J. C. and Bird, R. B. Calculation of the Diffusion Coefficient of Dilute Gases and of the Self-Diffusion Coefficient of Dense Gases. *AIChE*, 4:137-142, 1958.
- [38] Springer, T. E. and Zawodzinski, T. A. and Gottesfeld, S. Polymer Electrolyte Fuel Cell Model. *J. Electrochem. Soc.*, 138(8):2334-2342, 1991.
- [39] Timnovan, R. and Giurgea, S. and Miraoui, A. and Cirrincione, M. Surrogate Model for Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC). *Journal of Power Sources*, 2007. In press.
- [40] Vahidi, Ardan and Stefanopoulou, Anna and Peng, Huei. Current Management in a Hybrid Fuel Cell Power System: A Model-Predictive Control Approach. *IEEE Transactions on controls systems technology*, 14:1047-1057, 2006.
- [41] Wang, C. and Nehrir, M.H. and Gao, H. Control of PEM fuel cell distributed generation systems. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 21(2):586-595, 2006.
- [42] Caisheng Wang and Nehrir, M.H. and Shaw, S.R. Dynamic models and model validation for PEM fuel cells using electrical circuits. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 20(2):442-451, 2005.
- [43] Yu, D. and Yuvarajan, S. A novel circuit model for PEM fuel cells. *Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC '04*, pages 362-366, 2004.
- [44] Zawodzinski Jr, Thomas A. and Springer, Thomas E. and Davey, John and Jestel, Roger and Lopez, Cruz and Valerio, Judith and Gottesfeld, Shimshon. A Comparative Study of Water Uptake By and Transport Through Ionomeric Fuel Cell Membranes. *Journal of Electrochemical Society*, 140(7):1981-1985, 1993.

De la pile à combustible à son intégration système

Marie-Cécile PÉRA*, Daniela CHRENKO**, Daniel HISSEL**

Université de Franche-Comté

*IUT de Belfort Montbéliard, Département GEEI, **UFR-STGI

Résumé : Cet article a pour but de décrire des expérimentations à mener avec des étudiants désireux de se familiariser avec le fonctionnement d'un système pile à combustible. Ces expérimentations, ici décrites sur un module commercial de la société Ballard, lequel est le dispositif commercial le plus distribué à ce jour dans cette technologie, sont destinées à accompagner et illustrer un cours de plus grande ampleur dans le domaine. L'objectif pédagogique poursuivi est de se familiariser avec le fonctionnement d'un système pile à combustible à basse température et de mettre en évidence les principales contraintes inhérentes à l'exploitation d'un tel système. Typiquement, l'Université de Franche-Comté présente ici son savoir-faire, issu d'une expérience de plus de 5 ans en enseignement dans le domaine (au niveau Master Génie Electrique et au niveau de l'IUT Génie Electrique et Informatique Industrielle).

Mots clefs : Energies alternatives, pile à combustible.

1. Introduction

Malgré l'engouement tout récent pour ces dispositifs de conversion d'énergie, les piles à combustible ne sont pas une invention récente. Il faut remonter au début du XIXe siècle pour en retrouver les premières traces [1]. Depuis peu de temps, néanmoins, face à la pénurie programmée de ressources fossiles et à l'augmentation galopante de la pollution atmosphérique, des solutions alternatives de production (ou plus exactement ici, de conversion) d'énergie sont investiguées, en particulier dans le domaine de l'automobile. Ainsi, l'idée d'un véhicule tout électrique est particulièrement séduisante car, bien conçu, il doit permettre de réduire un grand nombre de nuisances (pollution sonore, pollution atmosphérique, dépendance aux hydrocarbures, ...). Ces véhicules reposent toujours sur des chaînes de traction électrique, l'ensemble des disciplines de l'EEA « dans et pour l'automobile » ayant dès lors de beaux jours devant lui [2]. Il est donc impératif de sensibiliser les futurs acteurs dans ce domaine (techniciens et cadres) à ce futur probable standard automobile.

2. Description du système

La société canadienne Ballard a commercialisé un module de puissance autonome à pile à combustible à

membrane échangeuse de protons, le Nexa Power Module (figure 1).

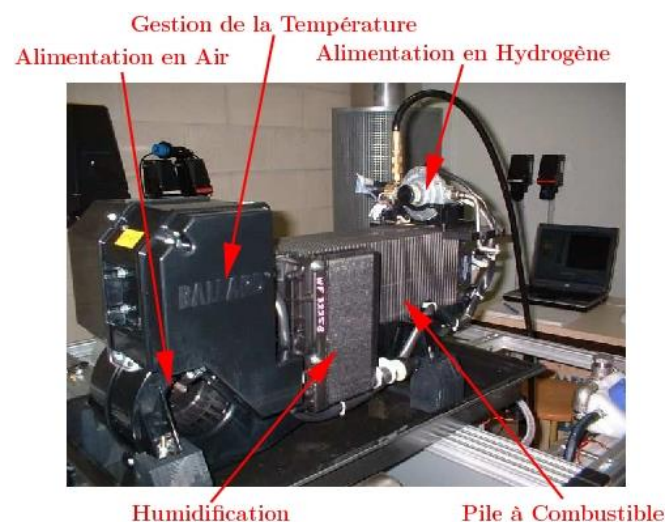


Figure 1: Module de puissance Nexa, Ballard System, 1,2 kW de puissance maximale.

La puissance maximale qu'il délivre est de 1,2kW, sous une tension non régulée d'environ 30V pour un courant de 40A. On y retrouve les fonctions principales d'un système pile à combustible, illustrées par la figure 2, mis à part le convertisseur de sortie de pile :

Le stack, siège de la conversion électrochimique,
Le circuit carburant, en l'espèce l'hydrogène,

Le circuit comburant, en l'espèce l'air
 Le dispositif d'humidification,
 Le circuit de gestion thermique,
 Le système de contrôle.

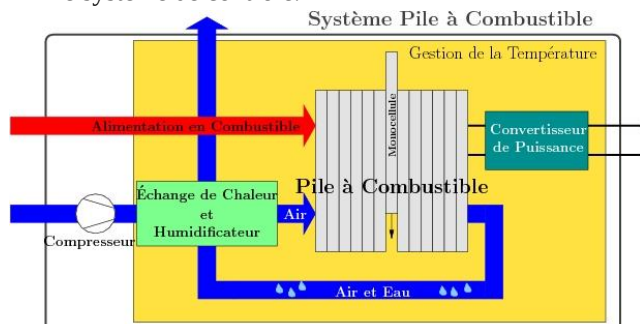


Figure 2: Schéma de principe d'un système PAC.

Le stack

Le stack est constitué de 42 cellules. Les plaques bipolaires sont épaisses et percées de canaux débouchant permettant la circulation de l'air de refroidissement. Ce choix du fluide de refroidissement facilite la mise en œuvre du module, limite le nombre de composants du système et réduit ainsi les consommations parasites. Il entraîne en revanche une faible compacité du convertisseur électrochimique lui-même.

Le circuit combustible

Le combustible utilisé est l'hydrogène gazeux pur, qui peut être aisément stocké dans une bouteille de gaz sous pression de 250 bars. Un détendeur mécanique permet de ramener la pression dans une zone utile, autour de 1,5 bars absolus. La pression d'hydrogène n'est pas régulée mais seulement limitée via le détendeur. Le circuit hydrogène aboutit à une électrovanne en sortie de pile. Celle-ci est fermée pendant l'essentiel du fonctionnement du module. Son ouverture est pilotée par le dispositif de contrôle et permet une purge du circuit anodique.

Le circuit comburant

Le comburant est l'oxygène de l'air. Une soufflante assure une légère surpression en vue de vaincre les pertes de charge dans la pile. La vitesse de rotation de la soufflante est régulée afin de piloter le débit d'air entrant. L'air est humidifié par un dispositif passif. Il s'agit d'une membrane permettant l'échange d'eau entre le flux cathodique sortant de la pile, appauvri en oxygène mais enrichi de l'eau produite par la pile lors de son fonctionnement et le flux cathodique d'air entrant plus sec (car lié au taux d'humidité de l'air ambiant). L'humidification étant passive, elle ne grève pas le bilan net de la puissance produite par la pile. En revanche, la quantité d'eau entrant dans la pile n'est pas contrôlée car elle dépend de la quantité d'eau produite par la pile donc du point de fonctionnement fixé par la charge.

La gestion thermique

La température de la pile n'est pas régulée mais simplement limitée. Un capteur mesure la température de l'air sortant des canaux de refroidissement. Au-delà d'un seuil de température, la vitesse du ventilateur est régulée afin de régler le débit d'air dans le but de limiter la hausse de température. La rampe de montée en température et le maintien de la température sont donc couplés à la puissance produite par la pile. Ils dépendent ainsi du profil de charge.

Le contrôle

Le dispositif de contrôle est constitué d'une carte gérant les acquisitions de mesures des capteurs et les consignes aux deux actionneurs (soufflante et ventilateur). Un exécutable, développé dans un environnement Labview®, permet l'enregistrement des mesures, la gestion des consignes et des seuils d'alarme (Figure 3).

Une batterie 24V fournit la puissance nécessaire lors de la phase de démarrage, tant que la pile n'est pas en mesure de fournir de l'énergie à la carte de contrôle et aux deux ventilateurs.

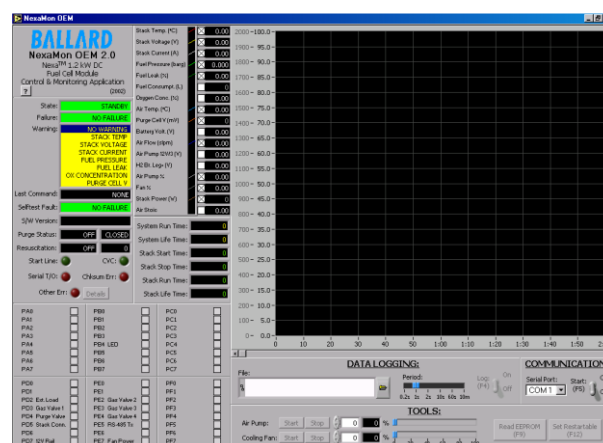


Figure 3 : Interface graphique de l'exécutable du logiciel de contrôle (Nexamon OEM®)

3. Approche pédagogique – travail pratique

Approche pédagogique

En préliminaire, il est à souligner que les manipulations décrites ci-après supposent que l'étudiant a suivi une formation au fonctionnement des piles à combustible et à leur intégration système. Ainsi, au sein de l'Université de Franche-Comté, la formation dans ce domaine atteint un volume annuel de près de 40h pour les étudiants en Master et de 20h pour les étudiants de l'IUT. La formation académique se décline en cours magistraux et travaux dirigés, avant le passage sur banc expérimental. Le cours est agencé comme suit (à noter que le support pédagogique de ce cours est disponible

gratuitement sur :

http://www.clubeea.org/documents/mediatheque/PAC_MC_Pera.pdf :

Une introduction au domaine avec des jalons historiques et socio-économiques

Une description générale du fonctionnement d'une pile à combustible, quel que soit son type (PEFC : Polymer Electrolyte Fuel Cell, SOFC : Solid Oxide Fuel Cell, AFC : Alkaline Fuel Cell, MCFC : Molten Carbonate Fuel Cell, PAFC : Phosphoric Acid Fuel Cell, DMFC : Direct Methanol Fuel Cell)

Un focus sur la pile la plus connue, la plus mature actuellement pour des applications automobiles et qui sera utilisée pour les expérimentations : la pile PEFC, la description des équations thermodynamiques régissant son fonctionnement, sa caractéristique statique et sa caractérisation dynamique, enfin des modèles simples équivalents.

L'intégration système de cette pile et la modélisation et la commande du système complet. Le lecteur intéressé par de plus amples détails sur le système pile à combustible est invité à consulter [3]. Les deux auxiliaires de pile à combustible les plus étudiés sont le compresseur d'air (modélisation, caractéristiques, performances) et le système d'humidification d'air (modélisation, performances) qui grèvent le plus le rendement global du dispositif. A ce titre, ce sont les deux auxiliaires sur lesquels il est primordial d'agir dans le cadre d'une utilisation optimale du combustible hydrogène à bord d'un véhicule pile à combustible.

Les principaux acteurs économiques et de recherche dans le domaine ainsi que les points durs pour un marché de masse [4].

Ce cours est, bien entendu, accompagné d'exemples et d'exercices, essentiellement liés au dimensionnement d'un véhicule pile à combustible et d'un système pile à combustible dans un tel véhicule.

Travail pratique

Les données mesurées lors du fonctionnement du module peuvent être enregistrées dans un fichier pour permettre leur traitement ultérieur. Ainsi il est possible de relever la courbe de polarisation (i.e. caractéristique statique) du stack (figure 4). Cette courbe n'est pas totalement répétable comme l'indique les barres d'erreur de la figure. En effet, les paramètres du système influençant fortement les performances, comme l'état d'hydratation des membranes polymères et la température du stack, dépendent des manipulations précédentes. Néanmoins, l'enveloppe des variations de tension au long de la courbe de polarisation reste inférieure à 1V (soit entre 2% et 4%) en valeur relative. De plus, une procédure particulière de régénération peut être lancée pour effacer l'influence du fonctionnement

passé et retrouver sensiblement les performances initiales (Figure 5).

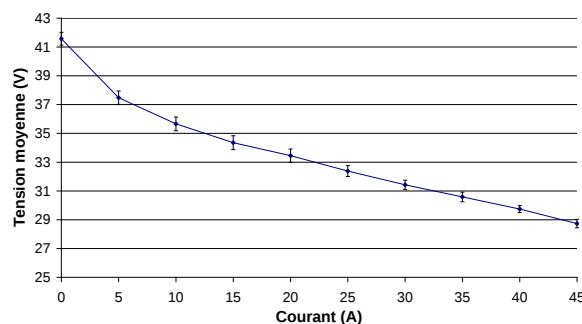


Figure 4 : Courbe de polarisation moyenne du stack

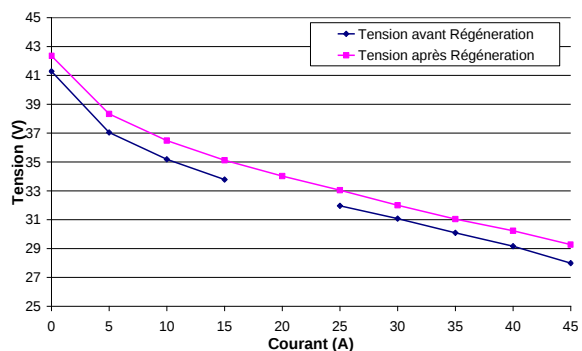


Figure 5 : Courbe de polarisation du stack avant et après la procédure de régénération.

La mesure du courant délivré par le stack lui-même d'une part et de celui de la charge électrique d'autre part permet d'évaluer non seulement la puissance produite par le stack, que l'on peut qualifier de brute, mais également la puissance nette, réellement utilisable pour l'application en sortie de module. Sur la figure 6 sont reportés les résultats de mesures sur le système et les résultats fournis comme illustration dans le manuel d'utilisation du système (indexés ref). Par différence, on obtient ainsi la puissance nécessaire à l'alimentation de l'ensemble des auxiliaires. La contribution de chacun des auxiliaires peut également être évaluée individuellement d'après les informations disponibles dans l'interface de contrôle (figure 7). La consommation du contrôleur est constante quelque soit le courant dans la charge. Le deuxième consommateur est le ventilateur chargé de limiter la température de la pile. Un fonctionnement constant à faible vitesse est maintenu correspondant à une consommation d'environ 10W entre 0 et 25A pour des raisons de sécurité. En effet, la ventilation permet également l'évacuation d'éventuelles accumulations d'hydrogène. Au-delà de 25A, la vitesse de ventilation et donc le débit d'air de refroidissement augmentent afin de limiter la hausse de la température : ceci se traduit par une hausse de la consommation. Le troisième consommateur est la soufflante alimentant la

pile en air (jouant ici le rôle du compresseur d'air, dans le cas plus général des systèmes pile à combustible PEFC pressurisés). La vitesse de rotation de la soufflante est liée au débit d'air nécessaire à la réaction, linéairement dépendant du courant du stack par la loi de Faraday (équation 1)

$$\dot{m}_{air\ sec\ consommé} = \frac{NI_{stack}}{4F} \left(M_{O_2} + \frac{0,79}{0,21} M_{N_2} \right) \quad (1)$$

Avec $\dot{m}_{air\ sec\ consommé}$: débit massique d'air consommé dans le stack (g/s)
 N : nombre de cellule du stack
 I_{stack} : courant délivré par le stack
 F : constante Faraday (96485 C)
 M_{O_2} , M_{N_2} : masses molaires de l'oxygène (32g/mol) et de l'azote (28g/mol)

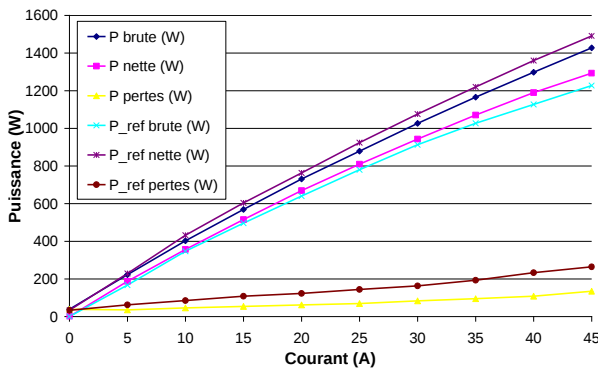


Figure 6 : Courbe des puissances brute, nettes et des pertes du système en fonction du courant délivré par le stack. Les données indicées « ref » font références aux données fournies dans le manuel utilisateur

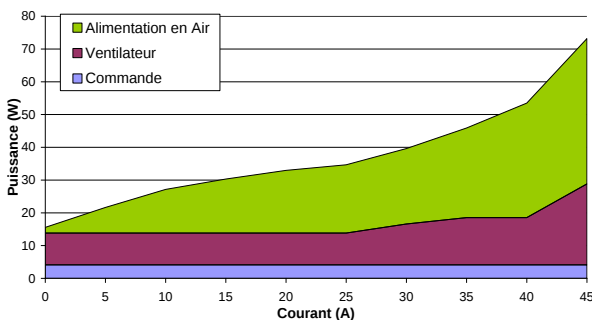


Figure 7: Contribution des différents auxiliaires à la consommation interne de la puissance fournie par le stack en fonction du courant de charge.

Le système n'est pas équipé de débitmètre permettant de mesurer la consommation d'hydrogène, un capteur permettant simplement de détecter une concentration anormale d'hydrogène pour des raisons de sécurité. La consommation d'hydrogène (équation 2) et le rendement (équation 3) peuvent néanmoins faire l'objet d'un calcul théorique. Le débit d'hydrogène

relâché lors des purges n'est alors pas pris en compte mais il reste négligeable devant la consommation totale.

$$\dot{m}_{H_2\ consommé} = \frac{NI_{stack}}{2F} (M_{H_2}) \quad (2)$$

Avec $\dot{m}_{H_2\ consommé}$: débit massique d'air consommé dans le stack (g/s)
 M_{H_2} : masse molaire de l'hydrogène (2g/mol)

$$\eta_{net} = \frac{P_{net}}{\dot{q}_{H_2} \cdot (-\Delta H_{H_2O})} = \frac{P_{net}(2F)}{NI_{stack} \cdot (-\Delta H_{H_2O})} \quad (3)$$

Avec η_{net} : rendement net du système

P_{net} : puissance électrique nette produite par le système (W)

ΔH_{H_2O} : enthalpie de formation de l'eau (-285,84 kJmol⁻¹)

$\dot{q}_{H_2}$: débit molaire d'hydrogène consommé

De même, il est possible de calculer la quantité d'eau produite :

$$\dot{m}_{H_2O} = \frac{NI_{stack}}{2F} (M_{H_2O})$$

Avec $\dot{m}_{H_2O}$: débit massique d'eau produite dans le stack (g/s)
 M_{H_2O} : masse molaire de l'eau (18g/mol)

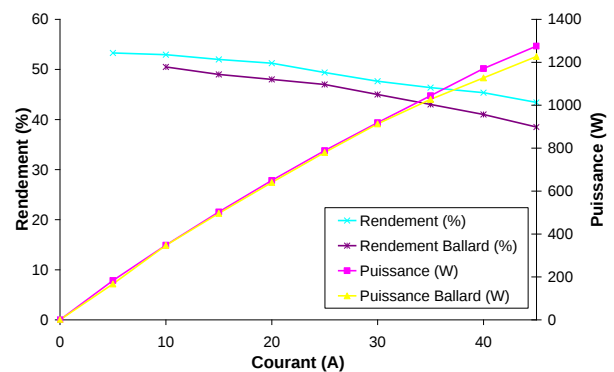


Figure 8 : Puissance et Rendement nets du système, mesurés et relevés dans le manuel utilisateur (Ballard)

A titre d'illustration, on peut calculer la quantité d'hydrogène consommée et la quantité d'eau produite en 1 heure, à pleine puissance. A 1,2 kW, le courant délivré par le stack est de 40A, on a ainsi :

$$m_{H_2\ consommé} = \frac{NI_{stack}}{2F} (M_{H_2}) \times 3600 = 62,7g$$

$$m_{H_2O\ produite} = \frac{NI_{stack}}{2F} (M_{H_2O}) \times 3600 = 564g$$

Avec un rendement de $\eta_{\text{net}} = 48\%$

La température du système dépend du point de fonctionnement comme le montre la figure 9. Le courant est maintenu constant jusqu'à ce que la température du système soit stabilisée pour différentes valeurs du courant. Jusqu'à 25A, le ventilateur de refroidissement fonctionne à son régime minimum pour éviter l'accumulation éventuelle d'hydrogène. La température du système reste alors en deçà de 55°C. Au-delà il est nécessaire de refroidir le système pour éviter notamment le dessèchement de la membrane. Le ventilateur permet de limiter la température en deçà de 65°C.

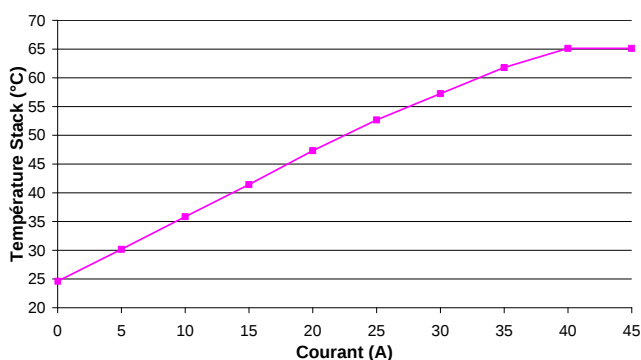


Figure 9 : Température du stack en fonctionnement stabilisé en courant.

4. Conclusion

Ce module, représentatif à petite échelle d'un réel système pile à combustible, est de mise en route aisée ; il permet en outre de mettre en œuvre une pile à combustible de puissance représentative d'une application industrielle, dans de bonnes conditions de sécurité des personnes et de sauvegarde du matériel. Il est donc tout à fait envisageable de l'utiliser pour des expérimentations avec des étudiants formés dans le domaine. Le seul paramètre sur lequel l'utilisateur possède réellement une action est le courant de charge, les autres sont totalement gérés par le logiciel de contrôle. Néanmoins, les mesures disponibles sont suffisantes pour appréhender de manière correcte le fonctionnement du système et sensibiliser l'étudiant aux contraintes d'exploitation et de maintenance inhérentes à ces dispositifs promis à un bel avenir.

Références

- [1] S. Srinivasan, "Evolution of electrochemistry", in Fuel Cells From fundamental to applications, Springer US, ISBN 978-0-387-25116-5, 2006.
- [2] D. Hissel et al, « Introduction aux systèmes pile à combustible », J3EA, vol. 4, HS n°2 (25), 2005.
- [3] D. Candusso, R. Glises, D. Hissel, J.M. Kauffmann, M.C. Péra, « Piles à combustible PEMFC et SOFC : description et gestion du système », Techniques de l'ingénieur, Traite de Génie Energétique, BE 8596, 12p, 2007.
- [4] M.C. Péra, D. Candusso, D. Hissel, J.M. Kauffmann, « Power generation by fuel cells », IEEE Industrial Electronic Society Magazine, vol. 1, n°3, pp. 28-37, 2007.

Les réseaux d'énergie électrique dans les navires de surface

Deuxième partie : les convertisseurs et les composants associés¹

Alain BONDU

Ancien ingénieur systèmes

Département Marine

JEUMONT ELECTRIC

27, rue de l'industrie, B.P. 189

59573 JEUMONT CEDEX

alain.bondu@numericable.fr

Résumé : Cet article est le deuxième d'une série destinée à présenter les spécificités des réseaux embarqués à bord des navires de surface, qu'ils soient civils ou à vocation militaire.

L'accent est mis sur le navire à propulsion électrique intégrée, dont le réseau doit subir l'importante source de pollution que sont les convertisseurs de propulsion.

Dans le premier article, l'auteur avait passé en revue les contraintes, notamment environnementales, qui s'appliquaient au réseau et à ses composants, et avait commencé l'examen de ces derniers : générateurs, transformateurs et disjoncteurs.

Il continue avec l'étude des autres composants : convertisseurs, filtres et moteurs.

d) Les convertisseurs de propulsion

Sans que le présent paragraphe constitue une étude complète sur les convertisseurs, il rappellera au besoin quelques éléments utiles pour le reste de l'étude

3.d.1. Les différents convertisseurs

Trois clés de classification coexistent pour structurer l'étude des convertisseurs :

- Convertisseurs « de courant » et convertisseurs « de tension »,
- Convertisseurs directs et convertisseurs indirects,
- Convertisseurs pleine onde et convertisseurs à découpage.

3.d.1.1. Convertisseurs de courant et convertisseurs de tension

Lorsque le convertisseur est raccordé à une charge présentant une composante réactive, ce qui est le cas le plus normal, le courant et la tension d'une même phase ou d'un même circuit ne passent pas simultanément par zéro. L'examen du convertisseur et de ses commutations montre qu'il existe deux types de fonctionnement:

- Lors d'une commutation, le *courant* est transféré d'un bras du convertisseur à un autre. La charge du convertisseur est alors à dominante inductive.
- Lors d'une commutation, la *tension* est transférée d'un bras du convertisseur à un autre. La charge du convertisseur est alors à dominante capacitive.

On parle de convertisseur de courant dans le premier cas, et de convertisseur de tension dans le second

3.d.1.2. Convertisseurs directs

Parmi ceux-ci on trouve notamment :

- Le redresseur et l'onduleur (avec en particulier le pont de Graëtz qui sera étudié en détail au § 3.d.1.5).
- Le cycloconvertisseur dont on dira un mot au § 3.d.2,
- Le hacheur, surtout utilisé pour le contrôle des réseaux continus, ou des résistances de freinage.

3.d.1.3. Convertisseurs indirects

Les convertisseurs indirects qui nous concernent ici sont des convertisseurs alternatif-alternatif (CA-CA) associant un redresseur et un onduleur par l'intermédiaire d'un boucle à courant « continu » (ou plus exactement unidirectionnel).

3.d.1.4. Convertisseurs pleine onde et convertisseurs à découpage.

La notion de convertisseur dit « pleine onde » ne peut pas s'appliquer à des convertisseurs continu-continu (CC-CC). Elle s'applique à des convertisseurs directs CC-CA ou CA-CC et signifie que du côté alternatif chaque alternance n'est réalisée que par deux commutations, l'une constituant le début et l'autre la fin de l'alternance. Ce type de convertisseur prend tout son intérêt lorsque la charge permet une commutation « libre », c'est-à-dire provoquée par la charge elle-même et non par la commande du convertisseur.

A contrario, dans un convertisseur à découpage l'alternance est reconstituée par un grand nombre de

¹ Je remercie mes anciens collègues de JEUMONT d'une part, et Dominique GONDOUIN d'autre part, pour leurs relectures et pour leurs avis.

commutations, ce qui améliore les possibilités de contrôle des premiers harmoniques de la forme d'onde, en courant comme en tension. Ce contrôle est classiquement réalisé par une modulation de la largeur des impulsion (MLI, ou PWM en anglais). Elle s'impose presque toujours lorsque la commutation « forcée » ne pose pas de problème particulier.

Ces deux notions s'appliquent à des convertisseurs directs, si bien que dans un convertisseur indirect on peut associer indifféremment convertisseurs pleine onde et à découpage, sous réserve de dimensionner convenablement les impédances de découplage dans la boucle « continue ».

3.d.1.5. Le pont de Graëtz

Comme indiqué en 1^{ère} partie, § 2.d.1, ce composant reste, sous diverses formes, le composant d'entrée de tous les convertisseurs de propulsion.

3.d.1.6. Quelques rappels généraux

- C'est un redresseur (ou un onduleur car s'il est à thyristors il est réversible) pleine onde à commutation de courant. Dans sa version classique à diodes ou à thyristors il est autocommuté, c'est à dire que l'extinction d'un bras est pilotée par le réseau ou la machine raccordé(e).
- Il peut se présenter normalement sous quatre formes principales :
 - Simple ou tête bêche
 - hexaphasé ou dodécaphasé

3.d.1.7. Le pont de Graëtz hexaphasé

On retrouvera son schéma et une représentation simplifiée des tensions et courants, dans le cas idéal où ce dernier est parfaitement filtré dans la boucle continue, en **Figure 1**.

Les principales équations sont dans ce cas les équations (2.2) à (2.5).

Si un tel pont est utilisé en propulsion et que l'on fait les approximations qui consistent :

- D'une part à assimiler Q à $\sqrt{Q^2 + D^2}$ et donc à admettre que :

$$FP = \frac{Q}{P} \quad (2.1) \quad ^2$$

- D'autre part à assimiler le rendement de l'ensemble moteur-convertisseur à 1, on obtient en combinant les équations précitées à $P_D = U_D I_D$ et à l'équation (1.2) du premier article une loi approximative reliant P et « Q », ou P et le facteur de puissance. Cette loi est portée sur le diagramme de la **Figure 2**

Les variables se présentent comme suit :

U_{Dch} : Tension moyenne délivrée à la charge côté continu

U_{eff} : Tension efficace entre phases côté alternatif

α : angle de retard à l'amorçage des thyristors

X_{CPU} : réactance de commutation, en valeur réduite (valeur P.U.). On peut prendre pour valeur unité la réactance unité du pont, vue côté alternatif.

λ_C : Valeur en henrys de la réactance ci-dessus

I_{PU} : courant du pont en valeur réduite. Le rendement étant négligé dans les équations rappelées, cette valeur est la même côté alternatif et côté continu.

R_{PU} : résistance côté alternatif, en valeur réduite

n : nombre de redresseurs en série par bras

ΔU_C : chute de tension par redresseur

P_D, U_D, I_D : Puissance, tension et courant côté continu (valeur moyenne en ampères)

I_{eff} : Courant efficace côté alternatif (en ampères)

u : angle d'empiètement (radians)

ω : pulsation électrique (radians par seconde)

FP : facteur de puissance

THD : Taux de distorsion harmonique total

S, P, Q, D puissances respectivement apparentes, active, réactive, et déformante.

Bien que le diagramme de la **Figure 2** repose, comme on l'a vu, sur des calculs très approximatifs, il est fort bien corroboré par les simulations prenant en compte des modèles beaucoup plus complets des machines et des convertisseurs.

On note sur ce diagramme que le facteur de puissance est extrêmement défavorable lorsqu'on se trouve aux faibles vitesses/puissances, ce qui introduit souvent des contraintes de dimensionnement supplémentaires pour les générateurs principaux.

Cette dégradation du facteur de puissance est fortement atténuée quand les auxiliaires bord sont alimentés par le réseau propulsion (ce qui est pratiquement toujours le cas), car ces auxiliaires "diluent" les puissances réactive et déformante.

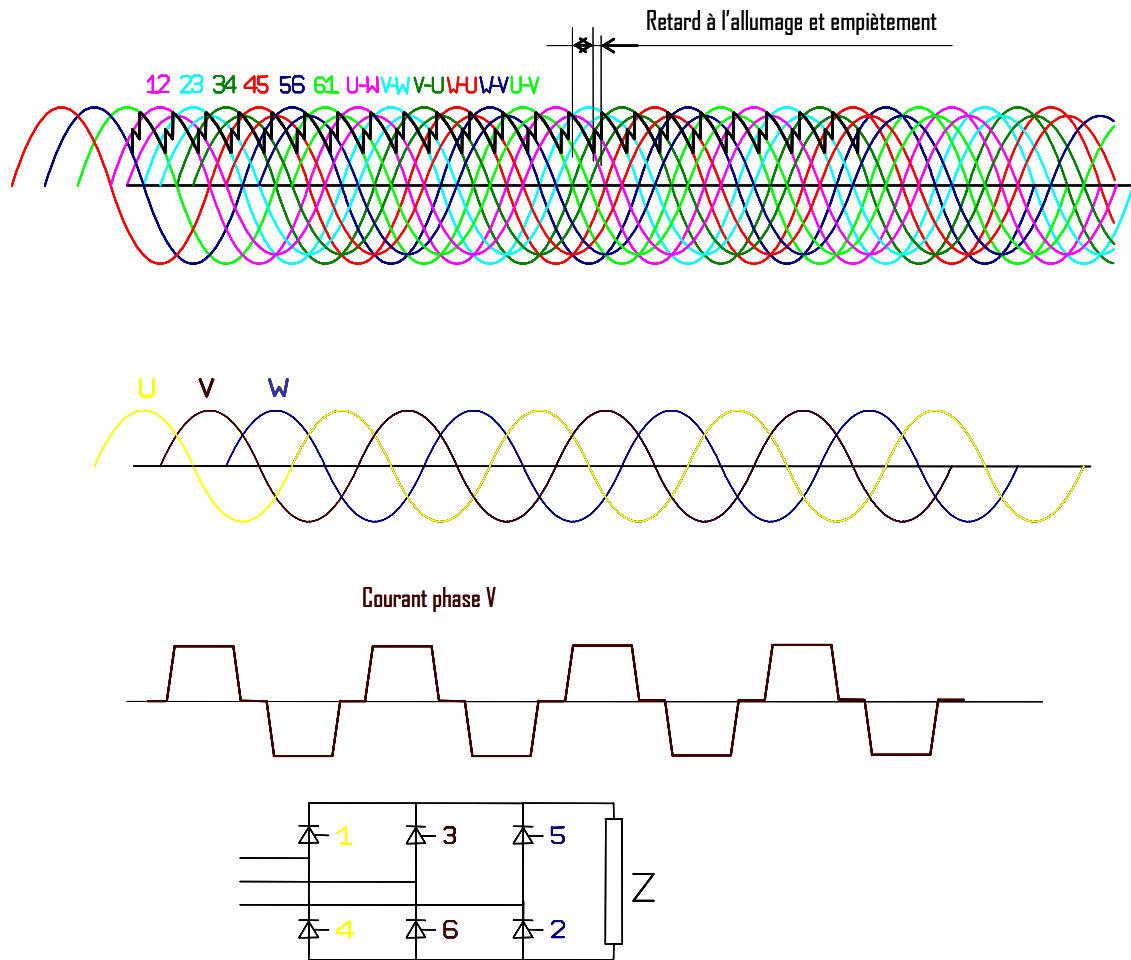
Pour ce qui est des *harmoniques de courant*, on sait que dans les conditions théoriques (Courant parfaitement lisse, commutation à l'instant exact prévu par la théorie, réseau équilibré) ils sont de rangs $k = 6p-1$ et $k = 6p+1$, avec p entier naturel. Si de plus on néglige la commutation leur amplitude est $1/k$.

Le THD est alors donné par l'équation (2.6).

La commutation réduit le taux de distorsion en courant en atténuant les fronts ; mais certains harmoniques sont réduits et d'autres augmentés. L'influence sur les formes d'onde en tension et en courant est rappelée en **Figure 3**.

donne des résultats utiles et intéressants dans ce cas particulier (cf. **Figure 2**)

² Cette approximation, encore courante voici quelques années, est à utiliser avec précautions. Il reste qu'elle



$$U_{Dch} = \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} \right) U_{eff} \left(\cos \alpha - \frac{X_{CPU}}{2} \cdot I_{PU} - \frac{\pi}{3} R_{PU} \cdot I_{PU} \right) - 2n \cdot \Delta U_C \quad (2.2)$$

$$\frac{I_D}{I_{eff}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad (2.3)$$

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + u) = \frac{\sqrt{2} \ell_C \cdot \omega \cdot I_D}{U_{eff}} \quad (2.4)$$

$$FP = \frac{3}{\pi} \cos \left(\alpha + \frac{u}{2} \right) \cdot \cos \frac{u}{2} \quad (2.5)$$

Taux d'harmoniques en courant, en négligeant la commutation :

$$THD = \sqrt{\frac{1}{5^2} + \frac{1}{7^2} + \frac{1}{11^2} + \frac{1}{13^2} + \dots + \frac{1}{(6p-1)^2} + \frac{1}{(6p+1)^2} + \dots} = \sqrt{\frac{\pi^2}{9} - 1} = 0,3108... \\ = 31,08\% \quad (2.6)$$

Pour un pont dodécaphasé, en négligeant la commutation, le THD en courant devient :

$$THD = \sqrt{\frac{1}{11^2} + \frac{1}{13^2} + \frac{1}{23^2} + \frac{1}{25^2} + \dots + \frac{1}{(12p-1)^2} + \frac{1}{(12p+1)^2} + \dots} = 0,152 = 15,2\%... \quad (2.7)$$

Figure 1 : Pont de Graëtz hexaphasé quand le courant est parfaitement continu : rappel des forme d'ondes et des équations

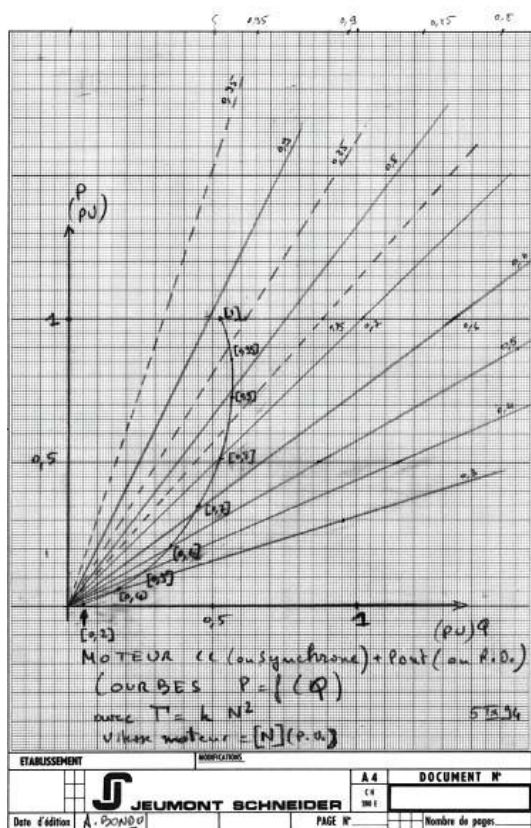


Figure 2 : Diagramme de puissance active-réactive pour un ensemble convertisseur-moteur de propulsion

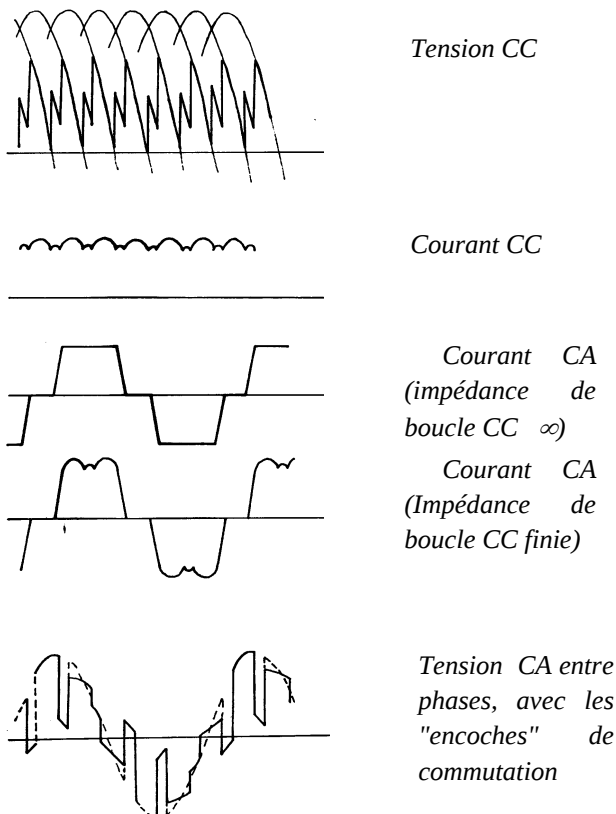


Figure 3 : Allure schématique des courants et tensions avec un pont de Graëtz hexaphasé, un circuit CC d'impédance finie et des inductances de phase.

3.d.1.8. Le pont de Graëtz dodécaphasé

On sait que les ponts dodécaphasés sont, en pratique, toujours réalisés par deux ponts de Graëtz classiques, hexaphasés, dont les instants d'allumage sont décalés d'un douzième de période, soit un angle électrique de $\pi/6$.

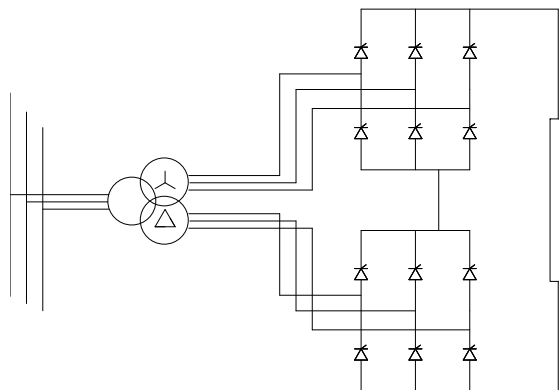


Figure 4 Exemple de pont dodécaphasé

Ce montage est adopté si :

- la puissance par pont dépasse un certain seuil,
- La pollution du réseau induite par un pont hexaphasé est excessive ou trop coûteuse à filtrer
- Une certaine redondance est requise sur la propulsion (voir ci-dessous).

Il nécessite toutefois un transformateur à deux secondaires pour disposer de deux départs triphasés avec le déphasage requis, ce qui s'obtient classiquement avec un secondaire étoile et un secondaire triangle.

Il peut être réalisé tant en série qu'en parallèle et être reliée à une charge passive ou active.

La Figure 4 présente un exemple de montage série sur charge passive.

- Taux d'harmoniques : Dans le cas théorique où l'équilibrage est parfait, donc si les conditions suivantes sont réunies :
 - Déphasage parfaitement égal à $\pi/6$
 - 6 phases équilibrées
 - Charges équilibrées côté continu
 - pas d'erreur sur les angles d'allumage

Alors les harmoniques en $6p \pm 1$ avec p impair disparaissent, ne laissant subsister que les harmoniques de rang $12k \pm 1$, avec k entier naturel.

Si l'on ajoute l'hypothèse simplificatrice supplémentaire que les commutations sont instantanées (angle d'empiètement nul), le taux d'harmoniques s'obtient suivant l'équation (2.7) ci-dessus, à comparer à l'équation (2.6).

Après prise en compte des angles d'empiètement (et des imperfections de l'équilibrage), le THD est de

l'ordre de 8 à 11 % avant filtrage, dans les conditions les plus défavorables.

- Puissances actives et réactives

Le réseau "voit" deux ponts avec pour chacun les courbes P/Q établies précédemment (exception faite de la diminution de puissance déformante due à la disparition des harmoniques en $6p \pm 1$ avec p impair). Dans la plupart des cas, la courbe de la **Figure 2** reste valable.

- Redondance :

On peut tolérer une marche à mi-puissance à un seul pont, au prix d'une certaine dégradation des autres performances³. On préférera dans ce cas un montage parallèle. Ce point peut être important pour certains systèmes propulsifs.

3.d.2. Cas du cycloconvertisseur

On sait que dans ce cas, les harmoniques, ainsi que les puissances réactive et déformantes sont modulées par :

- le couple moteur
- la fréquence électrique fondamentale du moteur de propulsion.

Pour les harmoniques, cette modulation est une modulation en amplitude et en fréquence.

Ces phénomènes ont de sérieuses conséquences s'ils ne sont pas maîtrisés. Citons le suréchauffement des moteurs asynchrones, et l'apparition de « flicker ».⁴

On a même noté des ruptures de lignes d'arbre par résonances.

Du fait de l'instabilité des fréquences perturbatrices, la filtration par filtres passifs est très difficile ; L'alimentation du réseau des auxiliaires à partir du réseau propulsion, qui est un grand avantage de la propulsion électrique intégrée, ne peut guère se faire que par :

- groupes tournants (solution ancienne)
- ou convertisseurs statiques
- ou en les protégeant par des filtres actifs

Dans la pratique et à la connaissance de l'auteur, le cycloconvertisseur est une technologie que l'on évite sur les navires, sauf parfois sur les brise-glaces où l'on veut pouvoir disposer d'un couple particulièrement important à vitesse faible ou nulle.

³ En effet, la raison première du montage dodécaphasé, côté moteur de propulsion, est de réduire significativement le niveau de vibrations en supprimant les pulsations de couple induites par les harmoniques de rang 5 et 7.

⁴ Ces phénomènes sont déjà susceptibles d'apparaître avec des ponts de Graëtz à thyristors, notamment s'ils sont hexaphasés. Mais dans ce cas, le problème est beaucoup plus facile à maîtriser.

⁵ A noter une exception récente et importante : Dans le cadre du programme franco-italien des frégates multi-

3.d.3. Les onduleurs MLI

A partir du moment où la commutation forcée est retenue, soit par obligation (moteur asynchrone, cf. § 3.h.2.2, soit par choix économique, cf. § 3.h.2.4), le choix naturel, chaque fois que la tension et la puissance le permettront, comportera un convertisseur indirect avec un onduleur de tension deux- ou multi-niveaux, à commande MLI et à IGBT

Quant au redresseur, le choix (qui théoriquement autorise aussi bien un pont de Graëtz à diodes ou à thyristors qu'un redresseur de tension MLI, suivant les exigences en termes de pollution réseau et/ ou de réversibilité) se portera généralement sur un pont de Graëtz à diodes, plus rustique et moins polluant qu'un pont à thyristors.

En contrepartie, le pont à diodes n'est pas réversible, et les contraintes en termes de renvoi d'énergie (cf. 1^{ère} partie, § 2.b.1.) obligeront à ajouter une résistance de freinage.⁵

Classiquement, celle-ci est disposée dans la boucle continue du convertisseur, et contrôlée par un hacheur.

La limite de faisabilité (ou d'intérêt technico-économique) de ces convertisseurs est très importante car elle fixe celle des combinaisons modernes à base de moteurs asynchrones ou à aimants.

A l'heure où cet article est écrit, et avec les dernières avancées techniques et industrielles en matière de convertisseurs (onduleurs multi-niveaux à IGBT montés en press-pack), elle se situerait d'après les constructeurs au-delà de 30 MW pour des moteurs asynchrones multi-étoiles.⁶

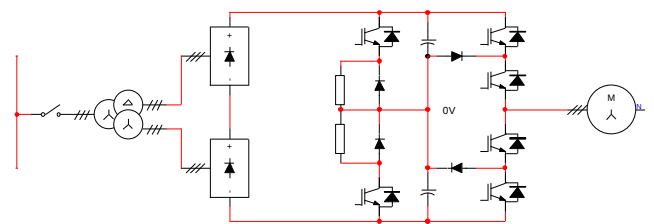


Figure 5 :Exemple de convertisseur MLI 3 niveaux

missions (programme FREMM), les frégates italiennes seront dotées de convertisseurs « quatre quadrants », avec redresseurs MLI.

Outre les possibilités apportées en termes de récupération et de contrôle de l'énergie de freinage, de tels redresseurs sont nettement moins polluants, en termes d'harmoniques renvoyés sur le réseau.

⁶ Et est donc multipliée d'autant pour des moteurs multi-étoiles... au prix d'une plus grande complexité.

La **Figure 5** présente sous forme unifilaire un exemple de schéma classique de convertisseur de propulsion. L'onduleur 3 niveaux est à IGBT et alimente un moteur triphasé ; le redresseur est un redresseur dodéca-phasé série à diodes, et on remarquera la (ou plus exactement les) résistances de freinage, montées symétriquement par rapport aux condensateurs de filtrage de la boucle continue et contrôlées par deux hacheurs à IGBT avec leurs diodes de roue libre.

En résumé, les avantages et inconvénients des convertisseurs MLI sont :

- **Avantages :**
 - Possibilité d'une excellente discrétion acoustique et vibratoire
 - Autorisent des moteurs asynchrones ou à aimants
 - Pollution réseau facile à maîtriser
- **Inconvénients (par rapport aux convertisseurs auto-commutés à thyristors) :**
 - Plus coûteux
 - Limités en puissance, et surtout en tension
 - Rendement moins favorable (de l'ordre de 95 à 96% au lieu de 98 à 99%)
 - Plus contraignants en termes de compatibilité électromagnétique

En l'état actuel des choses, ils sont de plus en plus souvent choisis, tant pour les applications militaires que civiles.

e) Les convertisseurs de réseau

Ce paragraphe traite des convertisseurs destinés à relier deux parties de réseaux entre lesquelles doit exister un découplage, à l'exclusion des convertisseurs de propulsion.

Ils permettent les échanges d'énergie entre des réseaux qui ne peuvent pas être interconnectés par un simple transformateur. Par exemple :

- Les deux réseaux sont à fréquence différente, ou l'un des réseaux est à courant continu. Le cas se présente fréquemment sur les sous-marins
- L'un des réseaux est très pollué (convertisseur de propulsion du type cycloconvertisseur)
- On veut que l'échange d'énergie soit unidirectionnel, tout en assurant la continuité du service (ce dernier point excluant un simple relais à retour de puissance)
- Les transformateurs sont exclus (cas de certains navires militaires ; cf. 1^{ère} partie, § 3.b.1).

Les convertisseurs peuvent être statiques ou constitués de machine(s) tournante(s).

3.e.1. Les convertisseurs statiques

Technologiquement, ils sont généralement constitués de deux convertisseurs CA/CA reliés par un transformateur.

La fréquence du circuit intermédiaire est une moyenne fréquence, qui peut varier entre quelques centaines de Hz et quelques kHz.

Exceptionnellement ils sont constitués d'un convertisseur CA/CA indirect.

Ils assurent le filtrage du réseau aval (toujours), et l'isolation galvanique entre les réseaux amont et aval (si les convertisseurs sont couplés par un transformateur).

Comme pour les filtres actifs (voir § 3.f.2 ci-dessous) on trouve dans le réseau aval des fréquences élevées qui sont filtrées naturellement par les impédances du réseau.

3.e.2. Les convertisseurs tournants

Cette technologie est de moins en moins fréquemment retenue.

On peut y songer si :

- Le réseau est particulièrement pollué (cycloconvertisseur) ;
- Les équipements utilisateurs sont très sensibles à la pollution (équipements scientifiques) ;
- L'on a besoin d'un volant d'inertie pour des raisons de continuité de service... mais un accumulateur dans la boucle CC d'un convertisseur statique offre des possibilités équivalentes, voire supérieures sur certains points.

Par rapport aux convertisseurs statiques, les groupes tournants offrent les avantages et inconvénients suivants :

- **Avantages :**
 - Rusticité
 - Filtration de meilleure qualité, quasi-parfaite
- **Inconvénients :**
 - Unités plus lourdes
 - Sujétions de maintenance
 - Vibrations (encore que les convertisseurs tournants embarqués à bord des sous-marins offrent un niveau de discrétion largement comparable aux meilleurs groupes statiques).

f) Les filtres

Il est parfaitement possible de concevoir des navires, même à propulsion électrique, même pilotés par des convertisseurs à thyristors hexaphasés, sans le moindre filtrage. Le taux d'harmonique atteint quelque 20 à 30 % dans les cas les plus défavorables : couple maximal et vitesse nulle, comme ce peut être le cas lors d'un crash-stop.

Quelques précautions sont nécessaires, par exemple d'inclure les contraintes correspondantes dans les

spécifications des moteurs asynchrones, et de prévoir des petits groupes tournants pour l'alimentation des appareils électroniques sensibles : appareillage scientifique et de radio communication par exemple-

Des réalisations existent. Elles seront évoquées dans le prochain article.

Ceci rappelé, l'orientation actuelle est d'imposer un réseau non pollué pour les auxiliaires du bord, de façon à pouvoir utiliser du matériel industriel simplement "marinisé". La norme CEI 445 rappelée dans l'article précédent répond à cet esprit.

Avec cette norme, si le navire est à propulsion électrique avec redresseur d'entrée à thyristors et que le réseau des auxiliaires du bord est alimenté par transformateur, comme c'est l'immense majorité des cas, un filtrage est nécessaire.

A côté des filtres passifs, bien connus depuis les débuts de l'électrotechnique, on trouve de plus en plus fréquemment des filtres actifs, plus coûteux, mais plus souples et plus performants.

3.f.1. Les filtres passifs

Le concepteur a le choix entre des filtres passe-bas et/ou des filtres accordés.

3.f.1.1. Les filtres accordés

Le calcul des filtres est en fait un calcul de la réponse fréquentielle d'un circuit électrique en un ou plusieurs points qui sont les points d'utilisation (ce calcul étant complété par un calcul de dimensionnement).

Le circuit est constitué de l'ensemble du réseau, y compris les générateurs, les transformateurs, les autres utilisateurs et... du filtre lui-même.

Le calcul d'un filtre passif revient donc à une étude réseau prenant en compte TOUS les cas de fonctionnement, normaux et accidentels. Dans la pratique, on identifie rapidement un très petit nombre de configurations dimensionnantes.

Il reste que les fréquences d'accord vont légèrement varier d'une configuration à l'autre. De plus, en l'absence d'amortissement, il arrive que la fréquence d'antirésonance pour une configuration devienne la fréquence de résonance pour une autre. On sait que ces deux fréquences sont très proches, surtout si le circuit est peu amorti.

Le concepteur est donc conduit à amortir son circuit LC, de façon à le rendre atténuateur de l'harmonique visé quelle que soit la configuration. Mais cet amortissement se paie par une atténuation moindre.

3.f.1.2. Filtres passe-bas

Compte tenu de leur courbe de réponse et de l'évidente nécessité de ne pas atténuer le fondamental, ces filtres sont moins efficaces pour les premiers harmoniques.

Par contre, leur conception est nettement moins problématique que celle des filtres accordés.

Dans la pratique, ils sont généralement constitués de circuits RC, qui avec les réactances du circuit constituent des circuits passe-bas du deuxième ordre.

Pour les grosses installations, on combine généralement des filtres accordés pour les premiers harmoniques rencontrés (jusqu'à l'harmonique 13 par exemple), et un filtre passe-bas qui arrête les harmoniques supérieurs.

Avant de finaliser le dimensionnement, le concepteur doit choisir entre des filtres raccordés côté Haute tension (HT) ou côté basse tension (BT). On rencontre les deux options :

3.f.1.3. Filtration côté HT :

Cette conception autorise des composants de puissance unitaire plus élevée, et donc un fractionnement plus favorable ; dans le même ordre d'idée, la tension plus haute est souvent favorable au dimensionnement de certains composants, surtout des condensateurs.

De plus, le réseau propulsion est filtré plus efficacement qu'avec des filtres côté basse tension ...mais ce point est d'un intérêt secondaire dans la mesure où l'on choisit de n'y raccorder que des composants spécifiques et de ne pas y appliquer les normes réseau.

D'un autre côté, le tableau HT devra comporter une ou plusieurs cellule(s) supplémentaire(s) pour les filtres. Ce point est une sujétion tant en termes de coût que d'installation dans le bâtiment.

3.f.1.4. Filtration côté BT :

L'inductance de fuite du transformateur, qui constitue un étage filtrant naturel du premier ordre, est plutôt mieux utilisée qu'en HT.

Il s'ensuit souvent un dimensionnement global plus favorable, et le concepteur opte un peu plus fréquemment pour un filtrage côté BT que côté HT.

3.f.2. Les filtres actifs

Les filtres actifs sont constitués d'un convertisseur indirect comprenant :

- Un redresseur à diodes
- Un onduleur MLI

Un traitement du signal extrait les harmoniques (avec leur phase !) jusqu'à une fréquence maximale, et les réinjecte, en opposition de phase, dans le réseau.

Un tel dispositif ne supprime pas les fréquences élevées ; mais celles-ci sont filtrées naturellement par les différentes impédances du réseau.

g) Les armoires et le câblage

3.g.1. Les armoires et tableaux.

Ceux-ci diffèrent relativement peu des réalisations industrielles pour ce qui est de l'architecture électrique.

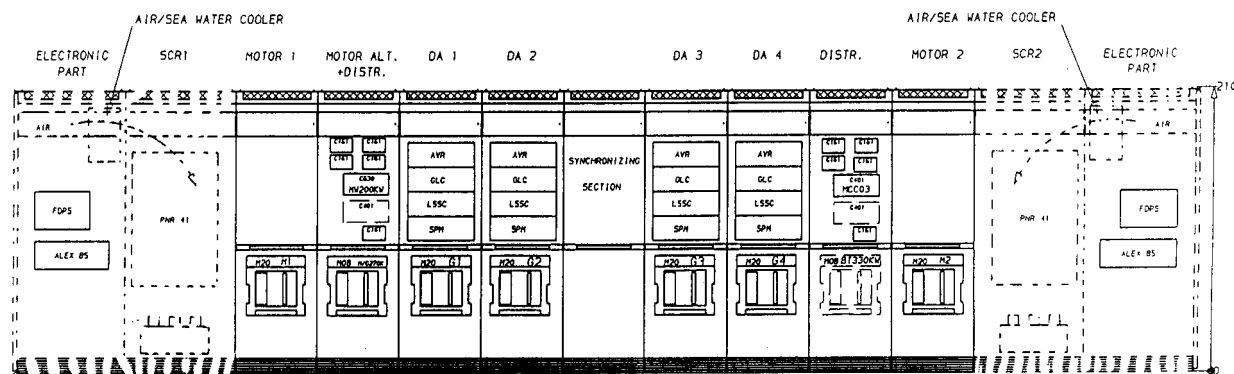


Figure 6 : exemple de tableau basse tension (document Schneider Electric)

Les différences tiennent plutôt aux contraintes environnementales : ambiance saline, humidité, écarts de température etc.

La Figure 6 montre un exemple de tableau basse tension, qui équipe les navires illustrés en figure 1, première partie. Les pointillés correspondent aux convertisseurs, qui sont en fait intégrés au tableau.

3.g.2. Le câblage

Le lecteur aura compris que compte tenu de l'importance des convertisseurs et du niveau de pollution qu'ils engendrent, le câblage n'est pas un point anodin quand le navire est à propulsion électrique.

Par-delà la règle élémentaire qui consiste à séparer les circuits de puissance (et notamment les circuits de propulsion) et les circuits BT ou de contrôle, les techniques de câblage ressortissent du savoir-faire de chaque assembleur.

h) Les moteurs

Il faut distinguer les moteurs auxiliaires et les moteurs de propulsion.

3.h.1. Les moteurs auxiliaires

On en rencontre une multitude sur les navires, pour l'entraînement des groupes hydrauliques, des pompes, des treuils et cabestans, etc.

Excepté sur les sous-marins, où du fait d'un réseau généralement continu il arrive encore actuellement que ces moteurs soient à courant continu, la technologie qui s'impose naturellement est la technologie asynchrone pour d'évidentes raisons de coût, de poids, de volume, de maintenance et de rusticité.

Mais ces moteurs sont généralement à démarrage direct, ce qui entraîne des creux de tension et de fréquence lors de leur mise en route. Ces creux sont limités par les normes et règlements à des valeurs telles que celles de la norme CEI 445 présentée en 1^{ère} partie, au § 2.c). On trouvera un exemple d'enregistrement de tels creux en Figure 7. Il s'agit d'un enregistrement simulant le cas le

plus défavorable : un seul groupe générateur en service, et démarrage du plus gros moteur spécifié.

A noter d'autre part que, comme toute machine électrique, ces moteurs sont réversibles et deviennent générateurs dès que le transfert d'énergie change de sens. C'est en particulier le cas lors des courts-circuits, au cours desquels les moteurs asynchrones, qui continuent à tourner sur l'inertie de la ligne d'arbre, contribuent aux courants de défaut.

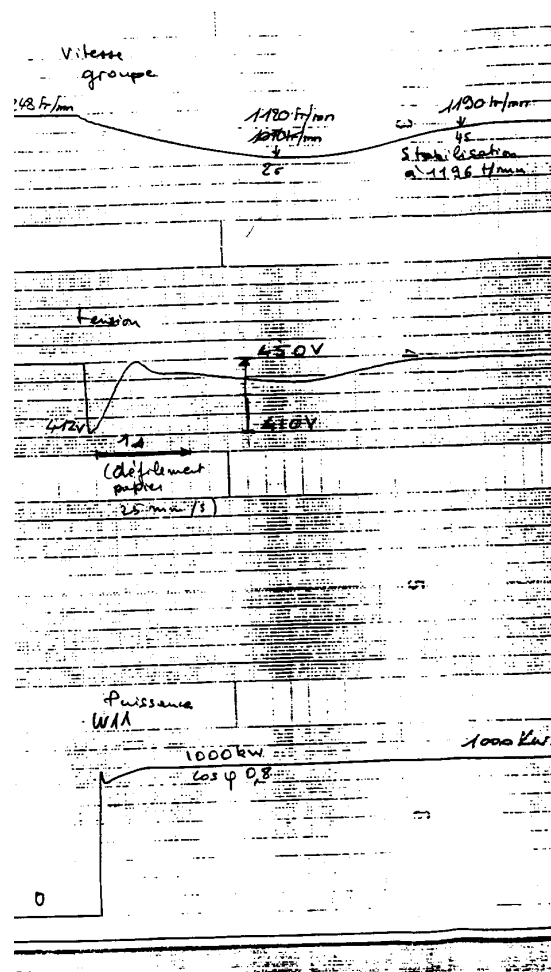


Figure 7 : Exemple d'impact de charge

En l'absence de données précises du constructeur, une bonne première approximation consiste à estimer la contribution par moteur à trois fois son courant nominal du moteur, pour un court-circuit franc.

3.h.2. Les moteurs de propulsion

Le problème se présente différemment, puisque la propulsion électrique autorise, et dans la pratique impose, la vitesse variable.

- Si le réseau est à courant continu (ce qui est le cas général des sous-marins, comme rappelé au § précédent), un convertisseur n'est pas indispensable. De fait, sur ce type de navires, la propulsion la plus classique prévoyait récemment encore un hacheur sur le circuit principal (hacheur « d'induit »), mais uniquement pour les faibles vitesses de rotation ; pour les allures supérieures le moteur était alors raccordé directement au réseau continu⁷, et la vitesse contrôlée par le flux. Depuis le début des années 2000, des solutions associant onduleur multiphasé et moteur à aimants permanents ont été mises en œuvre avec plein succès⁸.

En termes d'études réseau, la principale incidence est dans ce cas la contribution des moteurs à courant continu aux courants de court-circuit, du moins pour les gammes de vitesse où celle-ci n'est pas contrôlée par un hacheur d'induit.

- Pour les navires de surface qui sont l'objet principal du présent article, le réseau est à courant alternatif 50 ou 60 Hz. Le choix du concepteur-ensemblier n'est plus dans ces conditions celui d'un moteur, mais celui d'un ensemble convertisseur-moteur. On pourra trouver dans « les techniques de l'Ingénieur »⁹ un tableau présentant la plupart des combinaisons possibles, avec leurs applications propulsives⁸. On se limitera ci-après aux principales d'entre elles. A noter que dans la quasi-totalité des cas, du fait du convertisseur et des protections rapides qu'il implique, la contribution de la propulsion aux courants de court-circuit est nulle ou négligeable¹⁰.

3.h.2.1. Moteur à courant continu

Cette solution reste la plus simple du point de vue électrotechnique, et a longtemps été la plus performante vis-à-vis de très nombreux critères. Mais les sujétions du moteur à courant continu en termes de masse, de coût et de maintenance font qu'elle est maintenant abandonnée.

Les dernières réalisations de quelque importance datent de la fin des années 90.

3.h.2.2. Moteur asynchrone

Le moteur à induction combine des qualités et des inconvénients bien précis pour les applications de propulsion électrique. Par rapport aux autres possibilités, il est rustique, léger, compact et d'un coût raisonnable. En contrepartie, il est mal adapté aux vitesses lentes et il requiert soit des cycloconvertisseurs, technologie à éviter autant que possible, (cf. § 3.d.2), soit des convertisseurs à commutation forcée. (encore que la commutation forcée soit à l'heure actuelle retenue pour les moteurs à aimants, voire même pour des moteurs synchrones : cf. § 3.h.2.4 et note 13 du § 0 ci-après).

Avec les dernières avancées techniques et industrielles en matière de convertisseurs et dans les limites de faisabilité des onduleurs MLI (cf. § 3.d.3 ci-dessus), on arrive à pallier les inconvénients du moteur à induction tout en profitant de ses avantages de simplicité, de robustesse, de fiabilité et de coût.¹¹

3.h.2.3. Moteur synchrone à rotor bobiné.

Ce moteur autorise tous types de convertisseur, le plus logique étant alors, si les exigences en termes de



Figure 8 : Exemple de moteur synchrone de propulsion à rotor bobiné (document Alstom)

bruits et vibrations ne sont pas trop contraignantes, le redresseur-onduleur autopiloté à pont de Graëtz (parfois nommé « synchroconvertisseur »).

référéncée dans la bibliographie, à la fin de la présente série d'articles.

¹⁰ Il s'agit ici des courts-circuits dans le réseau navire. Les éventuels courts-circuits dans l'ensemble moteur-convertisseur font l'objet de protections internes et sortent du cadre de cet article

¹¹ Par exemple le dernier navire de croisière construit pour NCL (Norwegian Cruise Line) par AKER à Saint Nazaire (2007) est équipé d'une telle propulsion.

⁷ En fait, ce raccordement au réseau se fait par l'intermédiaire d'un combinateur qui autorise des mises en série ou en parallèle de demi-moteurs et/ou de demi-réseaux, le réglage par le flux devenant un réglage fin à l'intérieur des gammes de vitesses ainsi obtenues.

⁸ Voir figure 10.

⁹ Techniques de l'Ingénieur, fascicule D5615, tableau 1 page 10. Ce fascicule fait partie d'une série de quatre,

Cette solution (moteur synchrone + redresseur-onduleur à thyristors autopiloté) reste la meilleure et la plus économique dès que la puissance propulsive par ligne d'arbre dépasse quelque 15 à 20 MW par ligne d'arbre, surtout si la propulsion doit être à accouplement direct, donc sans réducteur.

Au-delà de vingt à trente MW par ligne d'arbre, cette solution s'impose^{12,13}.

3.h.2.4. Moteur synchrone à aimants

L'introduction sur le marché, dans le courant des années 80, des aimants à terres rares (Sm-CO et Ne-Fe-Bo) a permis aux moteurs à aimants de faire de considérables progrès en termes de performances et de compacité.

Ce type de moteur s'approche évidemment beaucoup du moteur synchrone à rotor bobiné, mais avec un certain nombre de spécificités qui en font une machine à part entière.

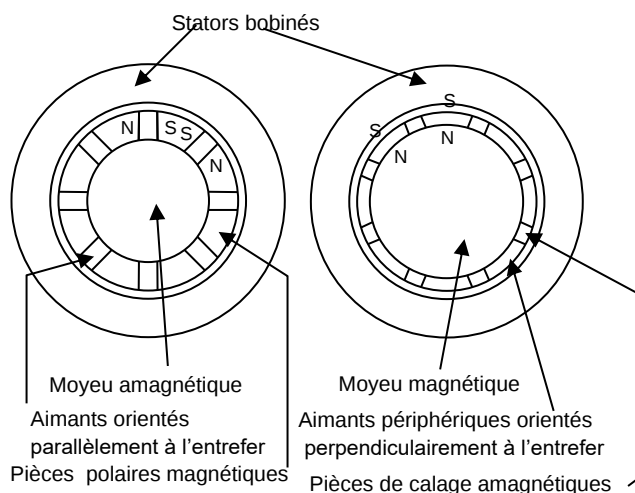


Figure 9 : Moteurs à aimants : rotors à aimants radiaux et rotors à aimants périphériques

Rappelons d'abord qu'il existe deux topologies de rotor, dont les aimants sont respectivement disposés parallèlement ou perpendiculairement à l'entrefer (figure 9). En simplifiant fortement, les moteurs à aimants radiaux peuvent être mis en parallèle avec les pôles

saillants, et les moteurs à aimants périphériques avec les pôles lisses.

Pour des raisons de coût du moyeu amagnétique, (entre autres), les moteurs actuellement proposés sont à aimants périphériques... Mais ceux-ci ayant une perméabilité proche de 1, ils présentent un entrefer équivalent très important, et un schéma équivalent considérablement simplifié. Dans la plupart des cas une seule réactance synchrone de quelques dizaines de % remplace le schéma équivalent bien connu avec réactances directes et transverses, synchrones, transitoires et subtransitoires.

Une deuxième spécificité est que, pour optimiser le coût des aimants (de l'ordre de plusieurs dizaines de % du coût total de la machine !), ces moteurs ne fonctionnent pas en fourniture de réactif ni même en facteur de puissance 1 comme les machines synchrones conventionnelles, mais en légère absorption de réactif, ce qui impose des convertisseurs à commutation forcée.

Dans la pratique, il s'agit là encore de convertisseurs MLI à IGBT, qui de toute façon sont bien adaptés aux exigences militaires de discrétion vibratoire et acoustique auxquels ces moteurs restent pour le moment réservés.

Une troisième spécificité est que pour des raisons liées aux risques de démagnétisation lors des court-circuits, le concepteur est amené à privilégier des pas polaires assez faibles, donc des applications à vitesse lente et fort couple. C'est justement le cas des applications propulsives.

Tels quels, ces moteurs sont un peu plus coûteux et présentent l'inconvénient de ne pas pouvoir être désexcités, alimentant un éventuel court-circuit jusqu'à la fin de la rotation¹⁴. En contrepartie, ils offrent un certain nombre de possibilités intéressantes :

- Ils autorisent une économie en poids et en volume de 40 à 50 % sur les équivalents en synchrone bobiné ou à courant continu, et de 15 à 30 % sur les équivalents asynchrones¹⁵.

un semi-conducteur commandé, il devient possible de le contrôler.

¹⁵ On a pu faire remarquer que cet avantage est en partie annulé par l'encombrement des convertisseurs. La remarque est exacte par rapport au synchrone bobiné ou au moteur à courant continu : si l'on se limite à considérer les volumes globaux, le gain est volume ramené à 10 ou 20%. Elle est inexacte ou marginale par rapport aux moteurs asynchrones, qui requièrent le même type de convertisseur. Elle est de toute façon marginale si l'on considère les masses.

¹² On peut éventuellement envisager le cycloconvertisseur en lieu et place du redresseur-onduleur, mais à condition d'y associer une soigneuse étude réseau. A notre connaissance, cette solution n'a pas été retenue récemment.

¹³ Il arrive parfois que l'on commande des machines synchrones de taille moyenne par des onduleurs MLI. Ce choix peut se justifier dans certains cas (exigences de discrétion, et/ou contraintes de dimensionnement machine, et/ou onduleur IGBT disponible dans des conditions industrielles et commerciales intéressantes)

¹⁴ Il s'agit évidemment de courts-circuits internes à la machine. Dès que le courant de défaut doit passer par

- Leur faible pas polaire facilite les alimentations de type multiphasé, avec le double avantage d'offrir des possibilités importantes de redondance, et d'atteindre des performances remarquables en matière de discrétion acoustique et vibratoire. La première réalisation

opérationnelle (Figure 10), destinée à des moteurs de sous-marins, a d'emblée atteint un niveau de discrétion égal à celui des meilleurs moteurs à courant continu.

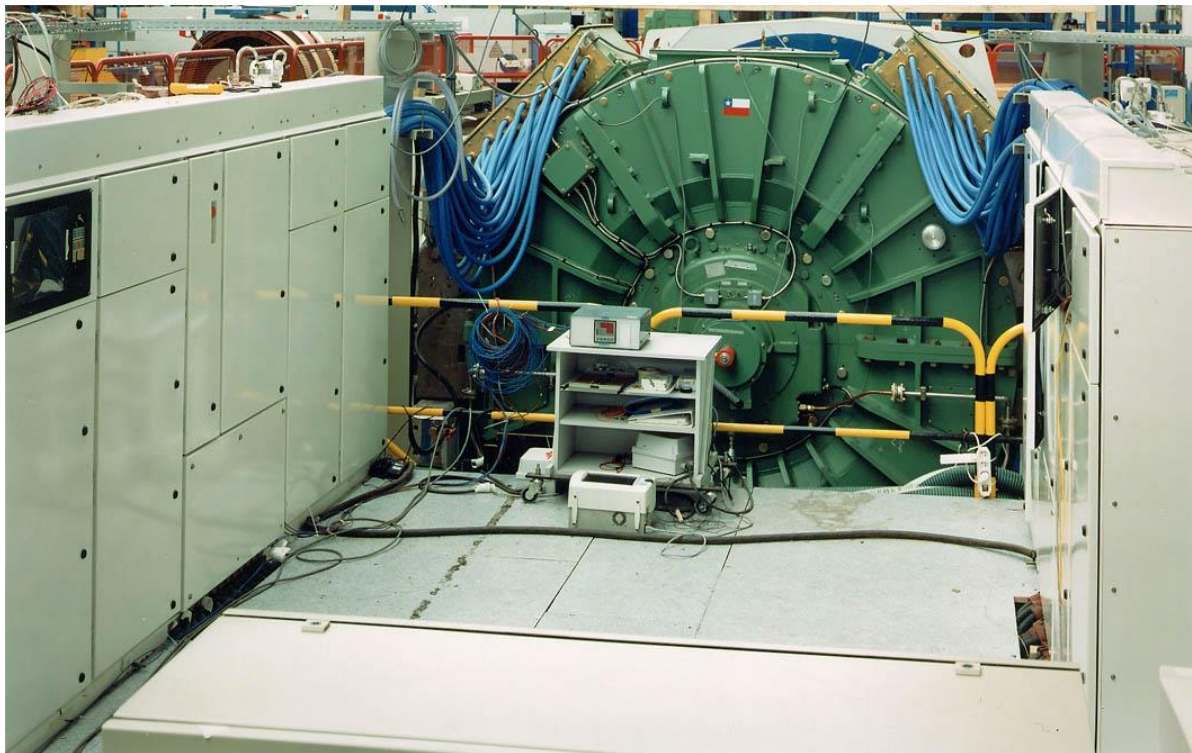


Figure 10 : Moteur à aimants en cours d'essais en plate-forme ([Document Jeumont Electric](#))

Caractérisation de panneaux photovoltaïques

Vincent BOITIER^{1,2}, R. BAGET², Corinne ALONSO^{1,2}

email : vboitier@laas.fr tél : 05 61 55 86 89

¹ LAAS-CNRS ; Université de Toulouse ; 7, avenue du Colonel Roche, F-31077 Toulouse, France

² Université de Toulouse, UPS

Résumé : L'objectif de cet article est de présenter quelques manipulations permettant de caractériser les panneaux photovoltaïques et de valider expérimentalement les résultats présentés en théorie sur les points suivants : différentes technologies des cellules, effet de la température, du positionnement des panneaux, effets d'ombrages et protections par des diodes bypass.

Mots clés : générateur photovoltaïque, solaire, caractérisation, température, ombrage, diode bypass.

1. Introduction.

Depuis quelques années, nous utilisons des panneaux photovoltaïques comme source d'énergie dans divers projets techniques que nous encadrons pour former des étudiants de licence ingénierie électrique et de licence professionnelle CCSEE (Conception et Commande des systèmes embarqués). Dans cet article, nous présentons quelques manipulations qui sont réalisées en travaux pratiques ou lors de bureau d'études. Elles permettent rapidement aux étudiants de mieux comprendre les caractéristiques des générateurs photovoltaïques, d'analyser l'influence de différents paramètres (technologie des panneaux, température, orientation, inclinaison) et de vérifier le rôle des protections électriques minimales à mettre en œuvre (diodes bypass, diodes séries).

Dans une première partie, différentes méthodes pour relever les courbes $I(V)$ et $P(V)$ sont proposées selon le budget disponible et les contraintes météorologiques.

Pour obtenir de telles courbes, il est nécessaire de mesurer la **tension** aux bornes du générateur photovoltaïque et le **courant** débité, mais pour bien exploiter ces données, il est également nécessaire de mesurer l'**irradiation** solaire et la **température** du panneau solaire. Le choix des appareils de mesure (voltmètre, ampèremètre, pyranomètre et thermomètre) et des panneaux utilisés est exposé en deuxième partie. Enfin la troisième partie illustre quelques résultats expérimentaux et exploite ces mesures pour retrouver des paramètres fournis par les constructeurs, ou pour comprendre les problèmes liés à la technologie cristalline (effet d'ombrage) et les solutions apportées (diodes bypass).

L'objectif pédagogique que nous poursuivons est de faire connaître les performances exactes des ressources issues de l'énergie solaire et les limites des capteurs PV

actuels. Ainsi, en tant que futurs cadres techniques, les étudiants sensibilisés devraient éviter des erreurs grossières de mise en œuvre.

2. Relevé des caractéristiques.

2.1. Avec un rhéostat.

Quelle que soit la méthode utilisée, il est important de s'assurer d'effectuer les relevés à ensoleillement constant. La méthode la plus simple de tracer une caractéristique $I(V)$ d'un panneau PV est encore de connecter directement à ses bornes une résistance variable de 0 à l'infini. Cependant, il faut prendre quelques précautions pour faire le choix de ce rhéostat (cf. Fig.1).

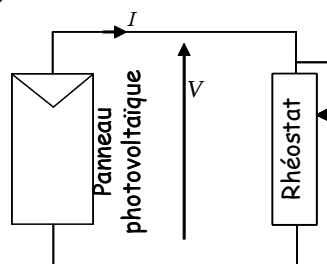


Fig 1. Connection de base.

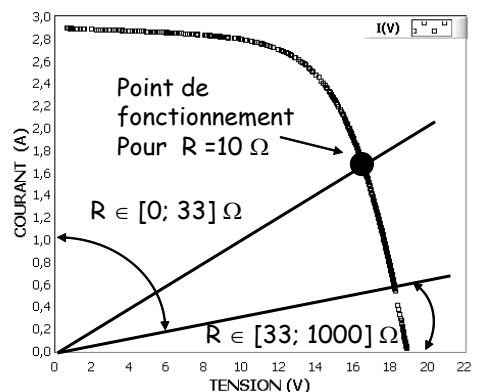


Fig 2. Caractéristique du générateur PV et de la charge, point de fonctionnement.

Lorsque la résistance est faible, le rhéostat doit supporter le courant de court-circuit du panneau. Pour l'autre côté de la caractéristique $I(V)$, une valeur de résistance suffisamment grande est nécessaire pour se rapprocher du circuit ouvert. Pour satisfaire ces deux contraintes, il est parfois nécessaire de placer deux rhéostats en série :

Un rhéostat (A) d'une trentaine d'ohms capable de supporter le courant de court-circuit du panneau, il permet de balayer la partie gauche de la courbe $I(V)$ (faibles valeurs de tension) (cf. Fig.2).

Un second rhéostat (B) d'environ mille ohms permettant d'atteindre pratiquement la tension de circuit ouvert (pas ou peu de contrainte sur le courant).

Méthodologie : au démarrage, les deux rhéostats ont leur valeur maximale (l'ouverture du circuit permet même d'avoir la tension de circuit ouvert), on court-circuite progressivement le rhéostat B de forte valeur (la tension diminue, on surveille le courant pour avoir des points à intervalles réguliers). Une fois B complètement court-circuité, on court-circuite alors progressivement le rhéostat A de faible valeur (dès que le point de fonctionnement arrive dans la partie plate de la courbe, on surveillera alors plutôt la tension pour avoir des points régulièrement disposés sur le graphe).

Si le ciel est sans nuage, cette méthode peut s'utiliser très simplement avec des appareils portatifs (ampèremètre, voltmètre). En revanche si le ciel est nuageux, l'irradiation change parfois même très rapidement (cf. Fig.3) et sur de grandes amplitudes même si l'on ne le ressent pas « à l'œil » ! Il faut alors réaliser les mesures rapidement (2 secondes pour un aller/retour des rhéostats) et les traiter en suivant pour en évaluer la pertinence. Plusieurs solutions sont possibles : enregistrement sur oscillo à mémoire portatif avec possibilité de rapatrier ultérieurement les données sur un PC, carte d'acquisition sur port USB et PC portable (cf Fig 4), ...



fig 3. Variations de l'irradiation enregistrées un jour nuageux avec de courts moments ensoleillés, durée de l'enregistrement : 2mn 30s.

2.2. Avec un condensateur.

Cette méthode permet un tracé très rapide (quelques ms) de la caractéristique $I(V)$ du panneau choisi. Elle s'affranchit donc des variations de luminosité. En revanche, de par sa rapidité, elle nécessite un relevé automatique des points de mesures, un oscilloscope numérique à mémoire est nécessaire. Il importe alors de bien régler le niveau de déclenchement et les calibres correctement, ce qui n'est pas toujours trivial pour les étudiants... Cette méthode est moins souple d'utilisation que la précédente mais s'avère plus correcte pour s'affranchir des variations d'ensoleillement.

Méthodologie : le condensateur est préalablement connecté à un rhéostat de décharge (300Ω), la tension à ces bornes doit s'annuler. Un interrupteur à deux positions (ou un fil avec une douille de sécurité - pour éviter un arc éventuel si la valeur du rhéostat est trop faible-) permet de déconnecter le condensateur du rhéostat et de le connecter au générateur photovoltaïque.

Initialement nulle, la tension aux bornes du condensateur augmente au fur et à mesure de la charge, lorsque le courant débité par le panneau devient nul la tension a atteint la valeur du circuit ouvert. Il est nécessaire de "vider" le condensateur pour refaire un autre essai, pour cela on reconnecte le condensateur vers le rhéostat.

En pratique, la méthode rhéostatique nous semble plus facile à appréhender par les étudiants et elle prend moins de temps pour sa mise en œuvre même si elle s'avère moins précise.

3. Choix du matériel.

3.1. Panneaux photovoltaïques

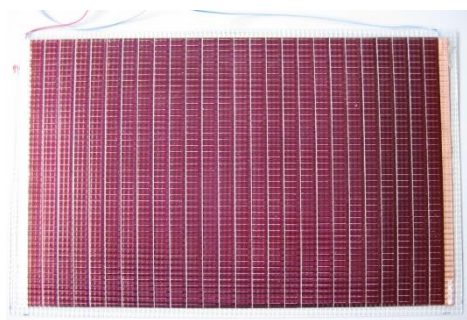
En fonction du budget disponible, on choisira une surface de panneau plus ou moins grande. Quelle que soit la technologie employée et la surface des cellules ainsi que le nombre de ces dernières, les caractéristiques $I(V)$ ont la même allure. Seuls sont modifiés le courant de court-circuit, la tension de circuit ouvert et globalement les pentes à droite et à gauche du point de puissance maximum.

Des panneaux de **20 à 50 watts** permettent de mesurer facilement des grandeurs situées dans les plages courantes des appareils disponibles en salle de TP ($I < 5$ A, $V < 25$ volts) et restent facilement transportables. Il faut tabler sur un prix d'environ 8 à 10 € le W_c (watt-crête). Ils sont équipés (sauf pour les panneaux en Si amorphe) de diodes bypass montées à l'arrière du panneau.

Avec les petits panneaux (**1 à 3 watts**), les mesures sont plus difficiles (courant faible, bruit de mesure 50 Hz si éclairage artificiel, ...) mais ils permettent une utilisation même les jours de pluie avec un éclairage artificiel. Par exemple le panneau MSX-01 (photo 1) éclairé de près par une lampe de bureau -lampe à incandescence de 100 watts (photo 5) - fournit une valeur de courant identique à celle récupérée un jour de beau soleil -150mA pour 1000W/m²-.



Ph 1. Panneau polycristallin MSX-01



Ph 2. Panneau Si amorphe GAIA 18

panneau	MSX01	GAIA 18	PW500	I-43	Sunslick27
fabricant	BPSOLAR	Flexcell	Photowatt	Isofoton	Flexcell
fournisseur	radiospares	Flexcell	Surtec		M.C Marine
technologie	Si poly	Si amorphe	Si poly	Si mono	Si amorphe
taille (cm ²)	13×13	18×28	104×46	122×33	131×65
prix (€)	37	19,5	307		340
Voc (V)	10,3		21,6	18,5	23
Isc (A)	0,16		2,95	2,8	2,4
Pmax (W)	1,125	2,2	45	35	27

Tab 1. Panneaux photovoltaïques utilisés pour les manipulations.

Le tableau 1 ci-dessus présente quelques panneaux pouvant être facilement utilisés avec les étudiants (deux de faible puissance et trois de puissance plus élevée).

3.2. Mesure de l'irradiation

Une fois la courbe I(V) tracée pour un ensoleillement constant, il reste à savoir auquel il correspond exactement. Pour cela, il faut ajouter une mesure supplémentaire d'irradiation effectuée en même temps que les relevés I(V). Un pyranomètre est un des outils de mesure approprié pour le rayonnement solaire. Il mesure l'irradiation (puissance surfacique exprimée en W/m²). Il existe deux familles de pyranomètres :

- des modèles constitués d'une thermopile comportant des thermocouples. Ils mesurent la différence d'énergie reçue par une surface noire et une blanche. Une coupelle en verre limite la perte de chaleur par convection et les effets perturbateurs du vent (cf. photo 3). Chers (>600€), ils sont précis (1%) mais ont une constante de temps de plusieurs secondes ne pouvant pas garantir que l'ensoleillement soit resté constant tout au long du relevé.

- des modèles utilisant une cellule photovoltaïque calibrée (cf. photo 4). Moins précis (5%), ils sont moins coûteux (300€) et ont une constante de temps négligeable (< 0,1 s) qui leur permet de suivre instantanément les variations d'ensoleillement. Ils conviennent donc très bien pour les mesures que l'on souhaite effectuer.



Ph 3. Pyranomètre CIMEL, modèle CE180



Ph 4. Pyranomètre SP Lite [KZ]

3.3. Mesure de la température.

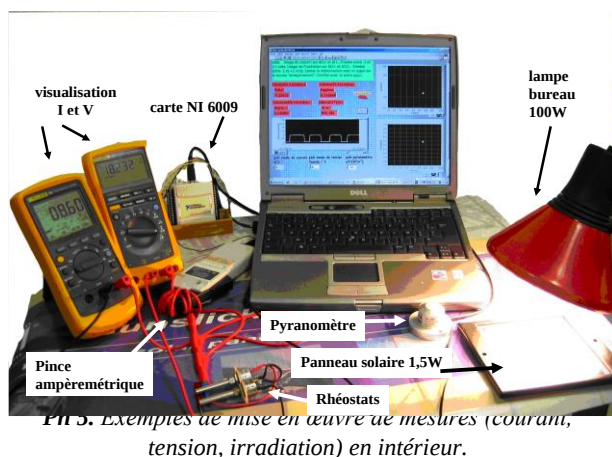
Une autre donnée doit être ajoutée pour caractériser les courbes I(V) de façon précise, c'est la température moyenne des capteurs PV lorsqu'ils produisent de l'électricité. En effet, l'influence de la température sur ces caractéristiques est loin d'être négligeable.

Un thermomètre à affichage digital est fixé au dos du panneau, une couche de polystyrène recouvre la partie sensible du capteur pour l'isoler de l'air extérieur.

3.4. Acquisition des données.

Pour faire les mesures (courant, tension, irradiation), nous proposons d'utiliser une carte d'acquisition NI 6009 de chez National Instrument (CAN 14 bits, impédance d'entrée environ 144 k Ω , échantillonnage 48 kch/s, port USB) connectée à un PC portable (cf. photo 5), ce qui permet de rendre portable tout le système d'acquisition et d'aller facilement faire les mesures en extérieur.

Les entrées analogiques de la carte d'acquisition ont des calibres programmables logiciellement de $\pm 1V$ (pour la mesure du courant et de l'irradiation) à $\pm 20V$ (mesure de la tension du panneau). Une interface sous Labview® permet de vérifier en direct la qualité des mesures. Un oscillo portable numérique avec une profondeur de mémoire suffisante peut convenir aussi. Pour les mesures de courant, une sonde à effet hall (LEM100A) est très pratique (100mV/A, 10 A max). Les mesures de tension ne posent pas de problème : soit une mesure directe soit une mesure réalisée en intercalant un pont diviseur de tension composé de 2 résistances de 10k Ω (nécessaire pour les panneaux dont la tension en circuit est supérieure à 20 volts).



4. Mesures et exploitations.

4.1. Premières mesures.

Avec un panneau au silicium polycristallin PW500 (cf annexe) de 45 W_C placé face au soleil, on relève deux séries de mesures à 10 minutes d'intervalle (cf caractéristiques I(V) et P(V) de la fig. 4). S'il fait beau, ces mesures peuvent être réalisées manuellement (avec 5 personnes : trois qui lisent les mesures de G, V, I, un qui bouge le rhéostat et un qui note). Si le ciel est

nuageux, les mesures sont faites avec une carte d'acquisition (un seul opérateur suffit à déclencher l'enregistrement puis peut faire varier la résistance : en moins de 2 secondes, la caractéristique complète est relevée automatiquement).

Le panneau est initialement à la température ambiante (29°C à l'ombre, G = 925 W/m²) puis exposé au soleil où il passe rapidement à 51°C, G = 883 W/m²).

On peut relever les grandeurs caractéristiques :

- la tension de circuit ouvert V_{OC},
- la tension V_{MPP} et le courant I_{MPP} à l'optimum de puissance (Maximum Power Point ou MPP),
- la puissance max P_{max}
- le courant de court-circuit I_{SC}.

Polycristallin PW500		
température (°C)	30	51
Voc (V)	20,3	19
Isc (A)	3,34	3,37

Tab2. Evolution de Voc et Isc en fonction de la température.

Lors des relevés présentés, l'irradiation varie peu ($\approx 5\%$). A partir des mesures présentées dans le tableau 2, on peut calculer directement l'influence de la température sur les grandeurs caractéristiques des courbes. On trouve : $\alpha = +1,43 \text{ mA}/^\circ\text{C}$ et $\beta = -62 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ alors que la documentation donne $\alpha_{\text{DOC}} = +1,46 \text{ mA}/^\circ\text{C}$ et $\beta_{\text{DOC}} = -79 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, les résultats expérimentaux sont donc corrects.

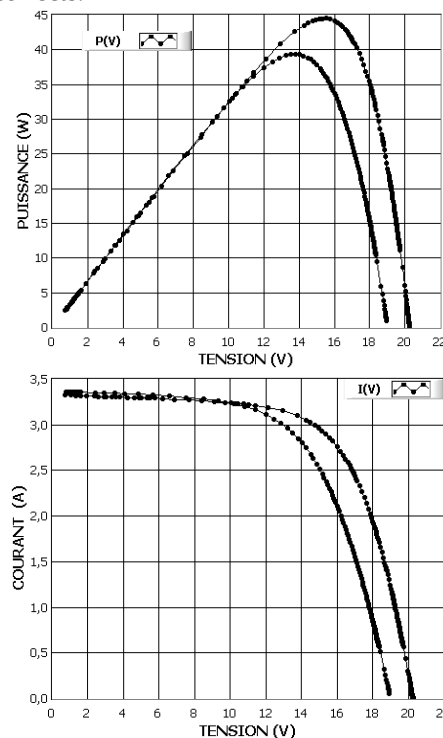


fig 4. Caractéristiques panneau polycristallin PW500 à 30 et 51 °C

En notant G l'irradiation exprimée en W/m^2 , on peut calculer également :

le rendement du panneau (cf Tab3):

$$\eta_{PV} = \frac{P_{\max}}{G \cdot S}, \text{ l'irradiation } G \text{ est exprimée en } W/m^2.$$

le rendement des cellules (on ne tient compte que de la surface des cellules) est alors exprimé par la formule suivante :

$$\eta_{\text{cell}} = \frac{P_{\max}}{G \cdot (n \cdot S_{\text{cell}})},$$

avec n correspondant au nombre de cellules du panneau et S_{cell} , la surface d'une cellule.

Il est intéressant de corréler ces mesures avec les valeurs fournies par la documentation du constructeur. Ainsi pour la baisse de puissance exprimée en $\%/^{\circ}C$, on trouve $-0,36 \%/^{\circ}C$ quand la fiche technique du panneau photovoltaïque annonce $-0,43 \%/^{\circ}C$, les résultats sont donc bien cohérents.

Polycristallin PW500		
P (W)	44,5	39,3
G (W/m^2)	925	883
S (m^2)	0,464	0,464
$n \cdot S_{\text{cell}}$ (m^2)	0,36	0,36
rend panneau	10,37%	9,59%
rend cell	13,36%	12,36%
température ($^{\circ}C$)	30	51

Tab3. Rendement photovoltaïque en fonction de la température.

Des mesures dans des conditions similaires ($G = 960 W/m^2$, mesures à température ambiante puis 10 minutes après) sont réalisées avec un panneau souple au silicium amorphe *Sunslick27*. On constate un rendement beaucoup plus faible (4%) et une moindre influence de la température (cf Fig. 5).

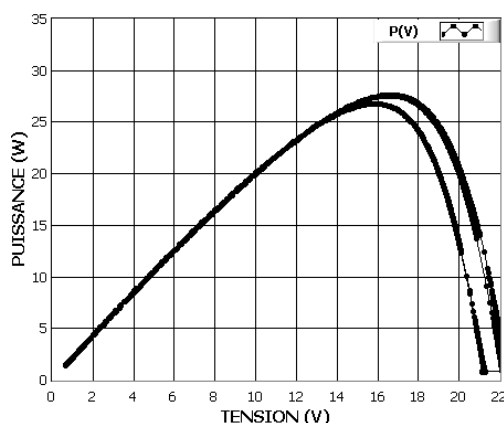


fig 5. Caractéristiques panneau amorphe *Sunslick27*.

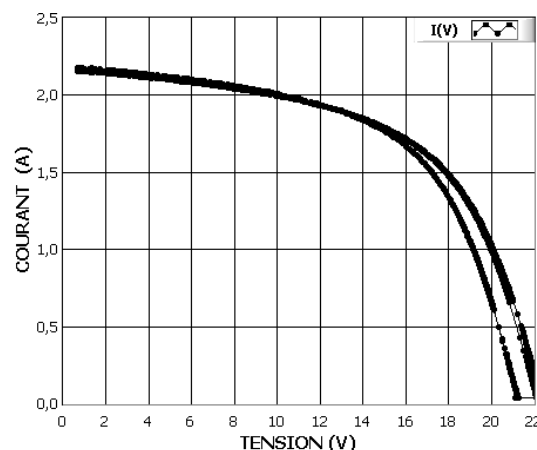


fig 5bis. Caractéristiques panneau amorphe *Sunslick27*.

4.2. Influence de l'inclinaison.

Un panneau PV étant un capteur sensible à l'irradiation lumineuse arrivant au sol avec une certaine incidence, l'exposition de ces capteurs a son degré d'importance. Elle dépend du site choisi (latitude, altitude et longitude). Prenons un exemple pour mieux comprendre

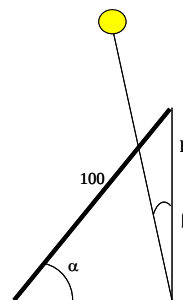
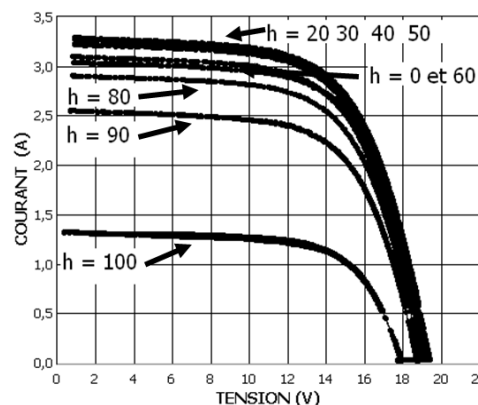


fig 6. lien entre h et α .

La longueur du panneau photovoltaïque est de 100 cm. Le panneau est orienté face au soleil, on fait varier la hauteur h (cf Fig. 6) et on relève les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ pour différentes inclinaisons (cf Fig. 7) - $\sin \alpha = h/100$ -. Le soleil est pratiquement au zénith lors des mesures ($\beta = 20^{\circ}$) et l'ensoleillement n'a pas varié pendant la durée des mesures.



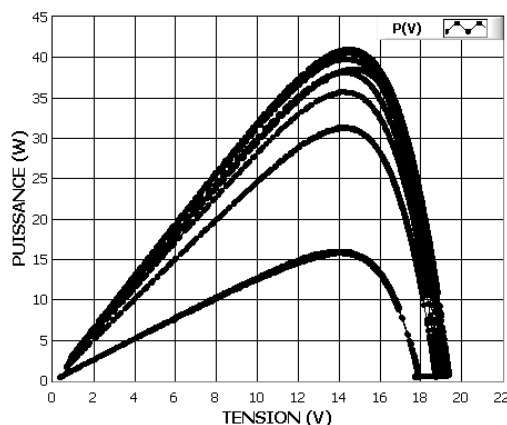


fig 7. Caractéristiques d'un panneau PW500 pour différentes inclinaisons.

On peut alors exploiter ces mesures et tracer les courbes $(P/P_{max}) = f(\alpha)$ et $\cos(\alpha - \beta) = f(\alpha)$ (cf. Fig. 8). On constate qu'il faut au moins 40° d'angle par rapport à l'inclinaison optimale pour perdre plus de 20% de puissance. En effet la surface normale au soleil touchée par le rayonnement direct est proportionnelle à $\cos(\alpha - \beta)$ et le cos est "plat" sur une certaine plage, ce qui explique ce manque de sensibilité et qui est finalement un avantage à exploiter lors de choix d'orientation des panneaux et surtout d'inclinaison des toits déjà existants.

La courbe $(P/P_{max}) = f(\alpha)$ est au-dessus de la courbe $\cos(\alpha - \beta) = f(\alpha)$, ce qui est normal car cette dernière courbe donne la composante direct du soleil, mais il y a aussi une composante diffuse et une composante réfléchiée. Ces deux dernières sont ici petites car lors des expérimentations, il y avait beaucoup de soleil dans un ciel sans nuage (peu de diffus) et la topologie des lieux minimise la composante réfléchiée.

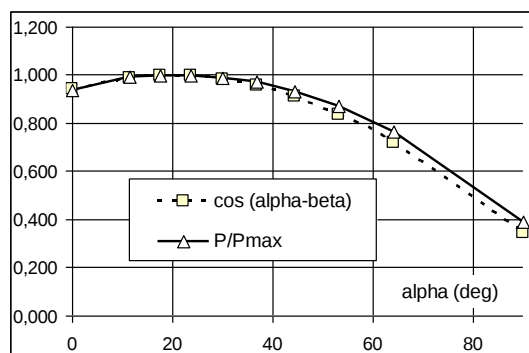


fig 8. Variation relative de la puissance avec l'inclinaison.

4.3. Effets d'ombrages et protections.

Cette partie permet d'expliquer le fonctionnement du panneau et des protections associées (diodes by-pass) lorsqu'une ou plusieurs cellules ne sont plus éclairées.

4.3.1. Caractéristiques d'une cellule solaire.

La figure ci-dessous (obtenue à partir des mesures faites sur un panneau complet) présente pour une technologie au silicium polycristallin, la partie utile d'une seule cellule au soleil et la caractéristique complète d'une seule cellule à l'ombre.

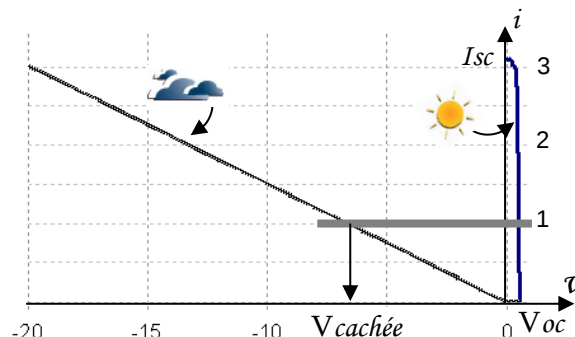


fig 9. Caractéristique d'une cellule dans le noir et d'une cellule au soleil.

Lorsqu'elle est éclairée, la cellule solaire fournit de l'énergie électrique. Le point de fonctionnement se situe dans le 1^{er} quadrant ($v > 0$, $i > 0$). I_{sc} (courant de court circuit) et V_{oc} (tension en circuit ouvert -environ 0,51 V) caractérisent la courbe de la cellule.

Lorsqu'elle n'est plus éclairée, la caractéristique :

- dans le quadrant 1 est pratiquement confondue avec l'axe des abscisses,
- dans le second quadrant, c'est une courbe de pente négative ; dans ce même quadrant, il est à signaler que la cellule devient réceptrice en énergie ($v < 0$, $i > 0$), celle-ci étant transformée en chaleur.

On note $V_{cachée}$ la tension aux bornes de la cellule à l'ombre. Soit, dans notre cas (trait épais de la figure 9) : pour $i = 1A$, $V = V_{cachée} = - 6,6$ volts.

4.3.2. Panneau solaire sans diode by-pass.

Le panneau (silicium polycristallin, PW500) est constitué de 36 cellules (deux groupes de 18 cellules) mises en série ; deux diodes by-pass sont placées (ou non, grâce à deux cavaliers) en parallèle sur chaque groupe de 18 cellules.

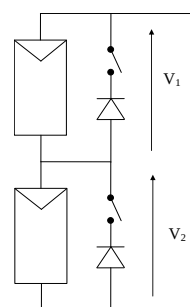


fig 10. Schéma du panneau PW500 avec les diodes bypass déconnectables.

V_1 et V_2 sont les tensions aux bornes de chaque groupe de 18 cellules : $V = V_1 + V_2$

Le même courant i circule dans chaque cellule, toutes les tensions s'additionnent pour donner la tension du panneau.

a) Lorsque toutes les cellules sont éclairées, la caractéristique $i = f(v)$ du panneau (courbe 1 de figure 11) a la même forme que celle d'une cellule mais avec : une tension en circuit ouvert égale à 18,5 Volts ($36 \times 0,51$) et un courant de court-circuit identique à celui d'une cellule.

b) Lorsque deux cellules sont cachées sur le 1^{er} groupe, les autres restant éclairées :

$$V_1 = 16 \times V_{\text{éclairée}} + 2 \times V_{\text{cachée}}$$

$$V_2 = 18 \times V_{\text{éclairée}}$$

$$V = V_1 + V_2$$

On obtient la courbe 3 dans le plan $i(v)$.

Pour $i = 1$ A, $V_1 = 16 \times 0,51 + 2 \times (-6,6) = -5,0$ volts

$$V_2 = 18 \times 0,51 = 9,25 \text{ volts ; } V = 4,2 \text{ volts.}$$

On constate que l'énergie fournie par 25 cellules ensoleillées est absorbée par les 2 cellules cachées.

La puissance maximum produite est alors réduite d'un facteur 6 par rapport au cas précédent !

c) Les courbes 2 et 4 correspondent respectivement au fonctionnement du panneau lorsqu'une cellule est cachée et lorsque six cellules sont cachées.

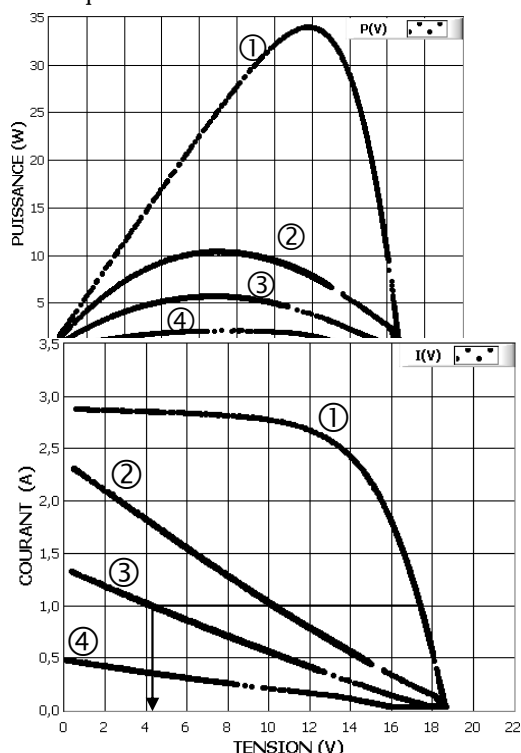


fig 11. Panneau PW500 sans diodes bypass (pas d'ombre, une cellule cachée, puis 2 et 6 $G=890$ W/m²).

4.3.3. Panneau solaire avec diodes by-pass.

En plaçant une diode by-pass en antiparallèle sur chaque groupe de 18 cellules, la tension V_1 (ou V_2) ne peut être inférieure à $-0,3$ V ; ces diodes court-circuitent le groupe des 18 cellules lorsque une ou plusieurs cellules sont cachées dans un même groupe.

Ainsi, lorsque 2 cellules sont cachées dans le 1^{er} groupe, pour $i = 1$ A :

$$V = V_1 + V_2 = (-0,3) + 18 \times 0,5 = 8,7 \text{ Volts}$$

On retrouve (cf. Fig12) pratiquement la caractéristique $i = f(v)$ de 18 cellules mises en série lorsque V_1 ou V_2 est négative. La puissance maximum est divisée par 2,5 par rapport à un éclairage complet du panneau, ce qui est tout de même moins dramatique que dans le cas précédent.

La diode by-pass permet de court-circuiter le groupe des 18 cellules dans laquelle se trouve la (ou les) cellule(s) cachée(s) et donc de récupérer la totalité de la puissance de l'autre groupe complètement éclairé.

Il faut cependant que ces diodes by-pass soient choisies à faible seuil pour dissiper le moins d'énergie possible et pouvant passer le courant maximal du panneau.

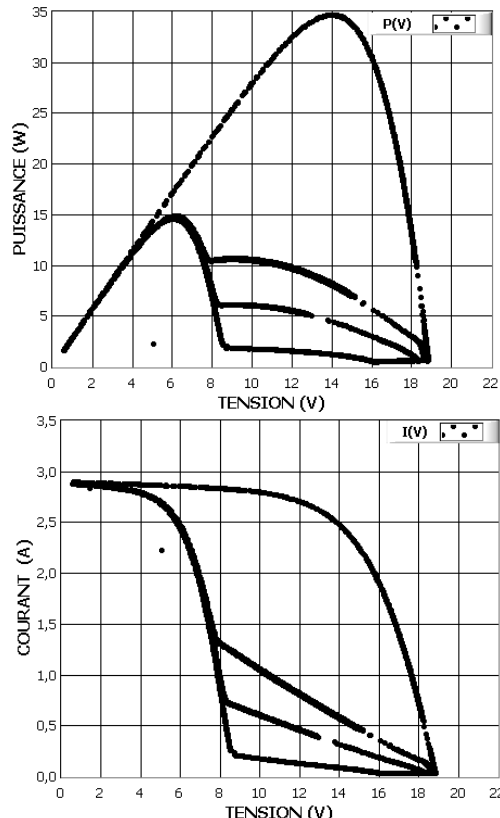


fig 12. Panneau PW500 avec diodes bypass (pas d'ombre, une cellule cachée, puis 2 et 6 $G=890$ W/m²).

5. Conclusion.

Dans cet article, nous avons présenté une partie des mesures que nous réalisons avec les étudiants. Dans une première approche, ils relèvent généralement les courbes point par point pour obtenir le relevé $I(V)$ classique d'un générateur photovoltaïque. Pour mener correctement ce travail, cela nécessite une bonne organisation du groupe (4 à 5 personnes) ... ce qui est intéressant pour leur formation mais pas toujours évident à mettre en œuvre ! Si l'on souhaite faire plusieurs relevés rapidement et/ou travailler un jour nuageux, il est alors nécessaire d'automatiser le dispositif de mesures pour pouvoir exploiter par la suite les mesures et surtout garantir leurs fiabilités pour une température et un éclairage donné. Cette dernière méthode donne de très bons résultats comparables aux datasheets. Elle permet de plus de caractériser le gisement solaire local.

Sur le même thème du photovoltaïque d'autres travaux pratiques sont également mis en place : (caractérisation de chargeur de batterie, d'onduleurs autonomes et d'onduleurs solaire connectés réseau).

Ce thème intéresse vivement nos étudiants sans que la mise en œuvre de ces essais somme toute basique soit couteuse et depuis 3 ans plusieurs d'entre eux obtiennent des stages et des emplois dans cette filière soit en bureau d'étude, soit au niveau commercial ou directement comme installateurs sur les chantiers.

6. Bibliographie.

[PH] <http://www.photowatt.fr>

[KZ] <http://www.kippzonon.com>

[JA] C. Jaouen, E. Lacombe, O. Bethoux, JP Kleider, "Etude didactique des systèmes photovoltaïques, optimisation thermique et électrique", revue 3EI n° 52 mars 2008.

Ouvrages sur le photovoltaïque :

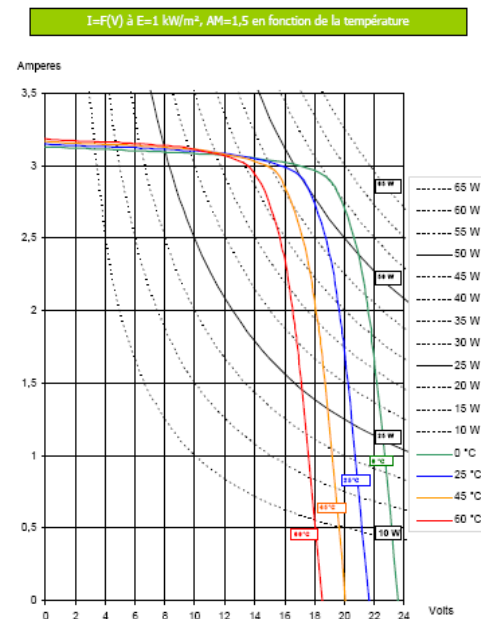
[1] F. Antony, C. Dürschner, K.H. Remmers, "Le photovoltaïque pour tous, Conception et réalisation d'installations", Ed. Observ'ER, ISBN-10:2-913620-38-8, 2006

[2] Anne Labouret, Michel Villos, "Energie solaire photovoltaïque, le manuel du professionnel", Ed. Dunod, 2003.

[3] Jacques Bernard, "Energie Solaire", Coll. Génie Energétique, Ed. Ellipses, 2004.

[4] L. Protin, S. Astier, "Convertisseurs photovoltaïques", Techniques de l'ingénieur, Ref D3360 - Vol DAB, <http://ti.idm.fr>

7. Annexe.



Extraits doc technique du panneau PW500 de Photowatt.

Configuration 12 V	
Puissance typique	W
Puissance minimale	W
Tension à la puissance typique	V
Intensité à la puissance typique	A
Intensité de court circuit	A
Tension en circuit ouvert	V
Tension maximum du circuit	V
Coefficient de température	%/°C
Spécifications de puissance à 1000 W/m² : 25°C : AM 1.5	
a = +1,46 mW/m²/°C ; b = -79 mV/°C ; γ PP = -0,43 %/°C	

EMBALLAGE	
Poids du module	kg
Dimensions du module	mm
Type d'emballage	modules
Dimensions de l'emballage	mm
Poids emballé	kg
Dimension max d'une palette (96 modules)	mm
Poids maximum d'une palette (96 modules)	kg

Extraits doc technique du panneau PW50

Réseau national de ressources en électrotechnique :

« RESELEC »

Historique, Missions et Perspectives



Jean-Paul CHASSAING, IGEN HONORAIRE (Cf. Chapitres 1, 2 et 3 : Contexte, Enjeux, Services RESELEC)

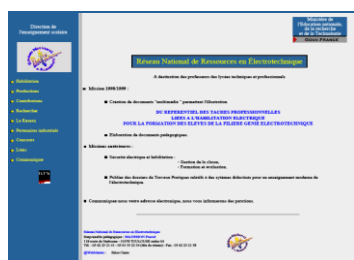
Claude BERGMANN IGEN actuellement en charge des filières de génie électrique (Cf. 4, 5 : Perspectives)

Résumé : Fondé sur la nécessité de procurer une aide concrète aux enseignants de la filière électrotechnique et initialement orienté pour l'aide aux maîtres non titulaires (auxiliaires et contractuels), le Réseau National de Ressources en électrotechnique « RESELEC » existe depuis 1991..

1. Rappel sur le contexte de la formation des maîtres en 1990 et émergence des missions du réseau national de ressources RESELEC

Le ministère de l'Education nationale a créé en 1991 le Réseau National de Ressources en Électrotechnique. Cette création, à l'initiative de l'Inspection Générale¹, s'intègre dans le dispositif de formation continue des enseignants qui avait été retenu par la Direction de l'enseignement scolaire (DESCO). Les missions des différents Réseaux nationaux de ressources correspondaient aux besoins de la formation des maîtres à la fin de la décennie 1980-1990. Ces missions concernaient la collecte, la production et la diffusion de ressources innovantes pour les différentes filières de Baccalauréats technologiques et professionnels et notamment pour le groupe des sciences et techniques industrielles en génie électrotechnique pour le réseau national RESELEC.

Les ressources issues de RESELEC devaient donc, dans le contexte précis du début des années 1990, correspondre aux nécessités de la formation des maîtres dans le domaine du génie électrique.



Extraits des attendus du réseau en 1991 :

Le dispositif national de ressources pour les enseignements technologiques a pour objectif de soutenir et d'accompagner la formation des enseignants des lycées techniques et professionnels en mobilisant et en rendant accessible un environnement de ressources actualisées, valides et adaptées.

Quatre fonctions principales définissent ce réseau :

- Contribuer au développement de l'information et de la documentation technique et pédagogique ;
- Participer à l'innovation documentaire et la promouvoir ;
- Servir d'appui et participer à la formation des formateurs ;
- Contribuer à l'établissement de liens avec le monde de l'entreprise.

A cette époque, la discipline comptait plus de 50% de maîtres non titulaires et les productions des animateurs² de RESELEC étaient centrées sur la réalisation de documents permettant la mise en œuvre de travaux pratiques d'élèves avec les moyens techniques matériels disponibles dans les établissements scolaires. Il s'agissait également de promouvoir une nouvelle orientation méthodologique pour des apprentissages où la notion d'étude de systèmes techniques, à caractère industriel, occupait une place prépondérante. Les recommandations de l'inspection générale, liées à la mise en place de nouveaux programmes en génie

¹ Au début des années 1990, l'IGEN en charge de la rénovation de la filière électrotechnique souhaitait la mise en place de systèmes techniques représentatifs d'un usage réel dans la formation des élèves au niveau du Baccalauréat STI génie électrotechnique. Cette disposition se substituait à la réalisation, par les élèves, d'un support didactique dans l'ensemble des établissements d'une Académie et tout au long de l'année. La réalisation pouvait être fonctionnelle mais, en général en fin d'année scolaire...

² Dès l'origine les moyens humains sont fournis avec le support de la DESCO :

- 1 poste d'enseignant permanent attaché à la communication et à la publication des productions
- ½ poste d'enseignant attaché initialement aux productions informatisées et désormais Webmaster
- un total d'environ 40 HSA réparties sur 39 professeurs dans l'ensemble du territoire pour l'année scolaire 2000-2001 dont 10 en capacité d'intervenir au niveau de la communication nécessaire à la tête du réseau à Toulouse.

électrotechnique, présentaient une didactique de la discipline fondée sur la description et l'utilisation de systèmes représentatifs de solutions industrielles actualisées. Ces supports techniques devaient être susceptibles de produire une valeur ajoutée observable (enrichissement de produits, d'énergie ou d'informations qui procure un service aux usagers). Dans ces conditions, au-delà des besoins éprouvés par les seuls maîtres auxiliaires, les professeurs ont pu bénéficier des publications (scénarios pédagogiques, synthèse de cours et travaux pratiques) initiées par le réseau de ressources dès les premières années de son fonctionnement. Les publications étaient censées alimenter les dispositifs pédagogiques retenus pour les différents laboratoires préconisés (étude de systèmes présentant une valeur d'usage, modélisation et spécification des systèmes supports des études, études des sous-systèmes, atelier de prototypage permettant des agencements de composants et des essais sur le matériel réel).

Les effectifs en professeurs de génie électrotechnique se partagent alors en deux familles principales, les professeurs de l'enseignement technique titulaires d'un Certificat d'aptitude professionnelle du domaine génie électrique (CAPET, CAPLP ou d'un concours équivalent) et les maîtres auxiliaires généralement titulaires d'un Baccalauréat plus deux ans (BTS ou DUT) ou, plus rarement, d'une licence en génie électrique. Les professeurs agrégés de génie électrique sont alors peu nombreux et trouvent facilement à s'intégrer dans l'enseignement supérieur. Les professeurs, qui n'ont pas eu de formation pédagogique, bénéficient parfois de stages de courte durée au sein des Mission Académiques à la Formation des Personnels de l'éducation nationale des rectorats (MAFPEN). Pour exemple, nous pouvons citer les *actions de recherche/formation*³ qui rassemblaient des professeurs chevronnés et qui étaient susceptibles de créer des supports d'enseignement actualisés et directement utilisables par les maîtres de l'enseignement technique et notamment les maîtres auxiliaires.

Dans le même temps, avec la création des IUFM, les nouvelles équipes de direction des Instituts de formation des maîtres, issues de l'Université, ont du mal à prendre en compte le besoin de formation des professeurs de

l'enseignement technique dont les compétences professionnelles recherchées ne correspondent pas toujours à une formation universitaire dispensée au niveau de la licence. En effet, les compétences attendues des élèves doivent tendre vers une meilleure prise en compte des situations de travail en milieu professionnel et des compétences spécifiques attachées à l'exercice d'un métier en pleine évolution. Les baccalauréats professionnels viennent d'être créés et commencent leur ascension dans l'esprit des responsables des entreprises, ils constituent une référence pour la qualification professionnelle. C'est dans ce contexte que les principaux pôles de formation des maîtres de l'enseignement technique et professionnel se structurent sur les pôles existants des ex Ecoles Normales Nationales d'Apprentissage (ENNA) qui, à l'instar des Ecoles Normales destinées à la formation des maîtres du premier degré, deviennent de la compétence des IUFM.

L'implantation de la tête du réseau « RESELEC » au sein de l'IUFM naissant de Midi-Pyrénées a considérablement contribué à la dynamique de formation initiale et continue des maîtres. En effet, la diversité des acteurs de RESELEC a permis de jouer un rôle dans la formation initiale des étudiants alors pré-recrutés au niveau BTS ou du DUT pour devenir enseignants dans les filières technologiques et professionnelles. A cette époque, et comme toujours en période de développement économique, les titulaires de la licence ou de la maîtrise étaient plus attirés par les emplois du secteur industriel, plus rémunérateurs, que par le métier d'enseignant. Le pré-recrutement à Bac + 2 (BTS ou DUT) constituait une solution privilégiée pour former des maîtres destinés à l'enseignement technique. Par ailleurs, les actions de « Recherches Formation » encouragées simultanément par la MAFPEN⁴ et le réseau RESELEC ont permis le développement de nouveaux partenariats avec les industriels susceptibles de produire les matériels didactiques nouveaux⁵ dont les enseignements technique et professionnel avaient besoin. De même, le fait que le premier responsable du réseau RESELEC désigné par l'IGEN soit également l'IPR en charge de la direction de l'UFTI à l'IUFM de Toulouse a pu jouer un rôle avec, également, la nécessité d'associer la

³ Les actions de recherche/formation réunissent des professeurs de différentes spécialités à propos d'une thématique commune. L'objet d'étude aboutit à une publication et, éventuellement, à la création d'un support matériel didactique.

⁴ Mission académique à la formation continue des personnels enseignants attachée au Rectorat de Toulouse

⁵ Il s'agissait de produire une didactique de la discipline fondée sur des équipements pédagogiques significatifs de comportements observables sur les systèmes industriels proposés par les recommandations de l'IGEN en fonction des nouveaux programmes de la filière du génie électrotechnique

culture STI⁶ du second degré et la culture propre des enseignants universitaires dans les cursus de formation initiale des maîtres destinés à l'enseignement technique.

Cette première phase de développement de RESELEC a pris fin alors que le secteur économique privé subissait une régression dans son développement. Dès lors, le statut d'enseignant titulaire avec un concours du CAPET ou du CAPLP2, apparaissait aux étudiants des licences EEA ou Ingénierie électrique plus attractif et plus sécurisant.

Avec l'effort national, très volontariste⁷, consenti par l'Etat en faveur du recrutement de professeurs de génie électrique au niveau Bac+3, une seconde phase du développement de RESELEC a été observée, elle correspondait à la diminution rapide du nombre de maîtres auxiliaires de génie électrotechnique, en fonction au milieu de la décennie 1990 – 2000.

Depuis, le nombre de postes proposés pour les concours de recrutement des maîtres de l'enseignement technique a considérablement baissé et certains concours sont désormais fermés en raison de la diminution des effectifs d'élèves, notamment dans les enseignements de baccalauréats technologiques. C'est ainsi que les concours externes de génie électrique sont fermés depuis 3 ans au niveau du CAPET et que le nombre de postes mis en place pour l'agrégation de génie électrique devient symbolique⁸. Dans ces conditions, le challenge de la formation continue des professeurs s'accroît en raison de la diminution des pôles de formation initiale constitués dans les IUFM concernés et donc des ressources en formateurs qu'ils soient universitaires ou du second degré. Le rôle des réseaux de ressources, et donc du réseau RESELEC en particulier, demeure très important.

2. Des enjeux stratégiques remarquables qui ont influencé l'activité du réseau RESELEC

Parmi les publications importantes de RESELEC, nous ne pouvons ici développer que quelques traits saillants qui ont marqué les productions et les échanges des professeurs au cours des 15 dernières années.

• L'électronique de puissance et l'automatique dans les procédés

Mots clés : électronique de puissance, caractérisation des sources et des charges, intervention conjointe des disciplines du secteur STI sur des procédés recommandés par l'IGEN, mesure d'une valeur ajoutée par transformation, déplacement ou stockage de matière, d'énergie ou d'information

De nouvelles approches ont été privilégiées pour une meilleure compréhension des relations qui lient le génie mécanique, les automatismes et l'électrotechnique. C'est ainsi que des systèmes didactiques sont désormais recommandés au niveau national. Ces ensembles didactiques sont agencés au moyen de constituants industrialisés dont les connexions font système. La construction d'un composant n'est plus souhaitée dès lors qu'il existe une référence commerciale réalisant la fonction dans un catalogue constructeur. Ces nouvelles dispositions privilégient les mesures à caractère industriel et l'utilisation des lois de la physique sert à justifier les transformations physiques des matières d'œuvre (produits, énergie ou information) présentes à l'entrée du procédé mis en œuvre, il s'agit de spécifier l'utilité du sous-système objet d'étude. Dès lors, ces dispositions pédagogiques, pour être comprises, doivent être promues dans des publications parmi lesquelles celles du réseau de ressources RESELEC.



Un exemple significatif de publication autour d'un matériel didactique : procédé de levage « Axe Z » pour un transgerbeur destiné à stocker des pièces mécaniques » : publication du RESELEC relayé par le CRDP de Toulouse.

Ce travail, qui s'est poursuivi jusqu'en 1993, donne à voir la nature des problèmes qu'il convenait de résoudre en matière de didactique liée à l'enseignement de l'électrotechnique autour des systèmes techniques. Les questions concernent principalement les propriétés, pour un axe mécanique de déplacement vertical d'une charge, de présenter un couple nominal à vitesse nulle, sans

⁶ Sciences et techniques industrielles

⁷ Augmentation considérable du nombre de places offert aux concours de recrutement des maîtres de l'enseignement technique

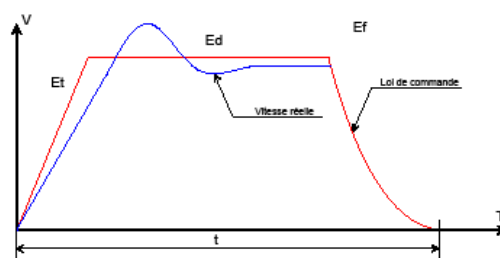
⁸ Une dizaine de postes par an pour une agrégation de génie électrique généraliste destinée à couvrir les besoins en électrotechnique, en électronique et en informatique industrielle.

l'utilisation d'un freinage mécanique, et de choisir une loi de commande en fonction de la nature de cette charge et des impératifs de précision du positionnement de l'axe. Alors que de telles propriétés pour un axe, liées à la mise en œuvre d'asservissements de couple, vitesse et position, se retrouvaient dans bon nombre d'applications industrielles, elles présentaient toujours des difficultés de compréhension pour nombre de professeurs et, en particulier, pour ceux⁹ qui n'avaient pas eu l'occasion de découvrir, au cours de leur scolarité, les principes et méthodes générales de caractérisation des structures liées à l'électronique de puissance et à l'automatique.

C'est ainsi que, grâce à l'accord de diffusion des travaux de synthèse de l'équipe de recherche¹⁰ en électronique de puissance de l'ENSEEIH de Toulouse, RESELEC a largement contribué à faire connaître les méthodes et principes attachés à la caractérisation des sources, des charges et des convertisseurs dans les architectures des procédés.

S'agissant de l'enseignement de l'automatique, de l'informatique industrielle et des automatismes en général, le problème de la prédétermination du comportement des boucles de régulation ou d'asservissement demeure un obstacle important, notamment au niveau du Baccalauréat. Le constat de l'indisponibilité partielle des outils mathématiques nécessaires à cette prédétermination a produit une réflexion spécifique des acteurs de RESELEC en remarquant que, lorsqu'il est difficile de prédéterminer, on peut souvent observer et mesurer¹¹. L'observation des tendances du comportement en fonction de différentes valeurs de réglages permet de renseigner un plan d'expériences destiné à optimiser le comportement attendu. Sur ce thème, des publications ont permis de présenter l'intérêt pédagogique des plans d'expériences et des tableaux de Taguchi pour présenter le réglage d'un système en regard d'une loi de commande spécifiée. De nombreuses modélisations correspondant à des performances différentes ont fait l'objet de comparaisons systématiques avec l'aller retour entre un modèle et le comportement réel observé. Ces travaux étaient destinés à mettre en évidence le maillon faible d'une chaîne fonctionnelle qui conditionne les performances globales d'un système. Ce maillon faible pouvant concerner aussi bien un

constituant de nature mécanique, électromécanique ou électronique qu'un agencement matériel correspondant à une structure fonctionnelle inadéquate.



CORRECTION TP AXE Z - VARIATEUR DIDACTISE

ELEMENTS DE CORRECTION

Page 3/5

Essais	Réglage des paramètres						Grandeurs Observées			
	Imax	K1	I	Vp	K4	P	Et	Ed	Ef	T
	Min : 6 Max : 8	Min : 140 Max : 250	Min : 0 Max : 10	Min : 400 Max : 500	Min : 12 Max : 24	Min : 1 Max : 10				
●	6	140	0	400	12	1	0,7	0	0,3	5,1
●	6	140	0	500	24	10	0,3	0	0,1	4,5
●	6	250	10	400	12	10	1	0	0	4,9
●	6	250	10	500	24	1	2,5	0,3	0,1	4,3
●	8	140	10	400	24	1	0,1	0,3	0,1	5,4
●	8	140	10	500	12	10	0,1	0	0	3,9
●	8	250	0	400	24	10	0,3	0	0,1	5,4
●	8	250	0	500	12	1	1,3	0	0,4	4,2

• Des méthodes d'investigation pour l'étude de systèmes complexes¹²

Mots clés : système pluritechnique, procédé, processus, agencement matériel significatif d'une fonction à remplir, mesures à caractère industriel, qualification de la valeur ajoutée

Ces méthodes ont toujours fait l'objet de débats passionnés au sein de l'institution scolaire. En effet, les méthodes d'investigation présentées aux élèves sont également la source d'approches pédagogiques ressenties comme concurrentes alors qu'elles se devraient être concourantes dans les stratégies d'enseignement pour l'étude des systèmes. Pour preuve, ces méthodes, bien que nécessaires à l'action pédagogique, n'ont jamais fait explicitement partie du programme de formation des formateurs et encore moins des élèves. Tout au plus, une notion d'approche descendante des systèmes complexes est-elle préconisée dans les recommandations pédagogiques particulièrement prudentes de l'IGEN. Dans le domaine du génie électrique, l'observation attentive d'un schéma électrique normalisé renseigne fort peu sur les fonctionnalités d'un agencement matériel constitutif d'une fonction technique. Par exemple, en l'absence de connaissances sur les données de configuration et sur

⁹ Les professeurs de construction mécanique, de génie électrique et de physique appliquée en charge des formations de Baccalauréat STI génie électrotechnique

¹⁰ Travaux placés alors sous la direction du Professeur Henri Foch

¹¹ Par exemple le comportement de l'axe Z pour une loi de commande particulière

¹² Au niveau du baccalauréat, les méthodes préconisées se limitent à la description de systèmes existants, elles permettent un repérage des agencements reconnus pertinents et induisent une réflexion pour la conception dans le cadre d'une approche comparative de systèmes présentant un usage similaire.

le programme implanté dans une structure programmable, il n'est pas permis de préjuger de sa capacité à conduire un processus spécifié dans le temps. A l'instar du comportement d'un fusible, ou d'un disjoncteur, qui n'est pas fixé par sa représentation schématique, un agencement de constituants n'est reconnu pertinent que par son aptitude à produire la valeur d'usage attendue.

Dans ces conditions, le réseau RESELEC a dû se résoudre à promouvoir une méthodologie fondée sur une triple approche des systèmes étudiés¹³. Cette méthodologie est à prendre en compte pour présenter les systèmes aux élèves, elle n'est pas objet d'étude, sauf en phase de lecture des représentations proposées par le professeur. Le choix de la décomposition fonctionnelle retenue est fonction des apprentissages visés conformément au point de vue développé par le pédagogue.

1) Proposition d'un découpage fonctionnel en procédés élémentaires d'un ensemble complexe qui produit une valeur d'usage spécifiée : le choix d'un découpage fonctionnel ne résultant pas de l'application de règles graphiques mais du choix des interfaces entre les fonctions que l'on donne à voir aux élèves. A cet égard, une grande confusion a perduré quelques années car beaucoup de professeurs ont confondu l'application de règles graphiques issues de la modélisation SADT¹⁴ avec la recherche des fonctions à isoler pour rendre compte des grandeurs physiques d'entrées et de sorties mesurables et reconnues comme pertinentes au plan pédagogique. Ici, nous recherchons **la photographie** fonctionnelle idéale d'un procédé délimité et présentant un agencement reconnu réutilisable éventuellement dans un autre système ; par exemple l'agencement fonctionnel d'un procédé asservi pour une application de levage ;

2) Ce découpage fonctionnel doit être associé aux éléments matériels constitutifs des fonctions identifiées. Par exemple : une chaîne cinématique, un moteur, un variateur, un convertisseur statique, une chaîne de mesures et un directeur de commande numérique...correspondent à un procédé permettant un enrichissement local qui est mesurable par des grandeurs physiques. Ces **éléments matériels** peuvent être représentés dans un langage graphique normalisé en schéma électrique ou en dessin de construction. Désormais, un aller retour entre les

fonctions désirées et les éléments matériels qui les synthétisent peut être entrepris avec les élèves, ils disposent ainsi d'une photographie reconnue significative d'un sous-ensemble délimité avec l'identification des points de mesures remarquables ;

3) Outre une photographie du procédé étudié et de la frontière qui délimite ce procédé des autres missions à accomplir au sein du système support d'étude, les élèves doivent disposer du processus de réalisation de la valeur ajoutée et donc du comportement observé au cours du temps. Ce processus, continu, discontinu ou mixte est généralement décrit par un GRAFCET prenant en compte les modes de marche et d'arrêt, il est complété localement par le programme qui traduit la loi de commande. Comme nous l'avons dit, ce processus temporel constitue **le film** d'élaboration de la valeur ajoutée localement, il est susceptible de réglages si le comportement réel mesuré ne suit pas complètement la loi de commande.

• L'habilitation électrique

Mots clés : santé et sécurité au travail, habilitation électrique, prévention des risques pour soi même et pour autrui, milieu professionnel, tâches d'intervention au voisinage

Si la première mission de RESELEC a consisté à accompagner les tâches de préparation des enseignements dispensés par les maîtres auxiliaires de la filière génie électrotechnique et a pu correspondre à l'avènement de *l'étude de système*¹⁵ comme contenu nouveau de la formation des élèves, le nouvel enjeu auquel la discipline électrotechnique a été confrontée est celui de la professionnalisation de la formation aux métiers de l'électrotechnique pour les diplômés du CAP, BEP, Baccalauréats technologiques et professionnels et BTS notamment. En effet, si la formation initiale des maîtres recrutés au niveau de la licence ne pose pas de problème particulier s'agissant de contenus académiques qui visent l'application des sciences, elle est cependant souvent défailante pour fournir des exemples concrets de situations de travail issues des milieux professionnels. C'est en fonction du constat d'un manque d'aptitude professionnelle à intervenir sur des systèmes techniques complexes en toute sécurité pour les jeunes diplômés recrutés dans les

¹³ Cette approche a été publiée par le Centre National d'Enseignement à Distance (CNED) pour la préparation aux concours du secteur génie électrotechnique.

¹⁴ SADT : system analysis and design technique

¹⁵ L'étude de système, où l'électrotechnique occupe une place prépondérante, s'oppose à l'étude de constituants électriques

déconnectés de leur contexte industriel d'application. Les systèmes utilisés dans la didactique de discipline sont réputés avoir un agencement des composants techniques homothétiques à la réalité industrielle et un comportement temporel similaire pour les grandeurs physiques observées.

entreprises qu'un accord-cadre a pu être signé entre la Caisse nationale d'assurance maladie (CNAM), l'Institut national de recherche sur la sécurité (INRS) et le Ministère de l'éducation nationale pour une formation nouvelle à la prévention des risques professionnels. Cet accord fournira l'occasion d'un nouvel élan pour les missions de RESELEC.

Parmi les outils susceptibles de procurer une meilleure maîtrise des risques, l'existence d'une habilitation électrique, à l'usage des professionnels électriciens, a permis de définir un groupe de travail destiné à produire un référentiel de formation à la maîtrise des risques électriques. Constitué dans le cadre des Commissions professionnelles consultatives (CPC), le groupe de travail a donc élaboré un référentiel de formation en vue de l'habilitation électrique des élèves immergés en milieu professionnel par les employeurs. Ce référentiel s'adresse à l'ensemble des élèves qui s'engagent dans une formation conduisant à l'un des métiers où le génie électrique occupe une place prépondérante.



Pour être validée, la formation s'appuie sur des savoirs théoriques et sur l'accomplissement de tâches professionnelles liées à un environnement de travail matériel où les risques électriques doivent être maîtrisés. Le référentiel fournit un cadre d'apprentissage qui associe des conditions matérielles d'intervention à un environnement technique donné et des procédures à respecter. Dans cette perspective, le réseau de ressources en électrotechnique a dû promouvoir des travaux pratiques significatifs de réelles situations de travail et nouer de nouveaux partenariats pour répondre aux nombreuses interrogations et sollicitations de l'ensemble du corps professoral. Il fallait répondre également aux questions juridiques qui étaient soulevées, notamment pour l'approche progressive de situations de travail potentiellement dangereuses en milieu professionnel. La délivrance d'un livret attestant la réussite des élèves à l'égard des tests

réalisés en milieu scolaire et destinés à valider leur formation à l'habilitation électrique constitue aujourd'hui un élément fondamental de professionnalisation.

C'est ainsi que de nombreux travaux ont pu être publiés en partenariat avec l'INRS, l'Union technique des électriciens (UTE) mais aussi avec des institutions comme la Fondation MAIF. Ces travaux ont accompagné la diffusion de produits logiciels¹⁶ de formation à la prévention des risques d'origine électrique, en direction des professeurs, des élèves et des étudiants et également en direction des professionnels concernés.

• La rénovation des diplômes professionnels

Mots clés : secteurs d'intervention électrique en milieu industriel et dans l'habitat, sobriété et efficacité énergétique, équipements communicants, chantier

En proposant des exemples concrets d'exploitations pédagogiques, le réseau RESELEC accompagne toujours les rénovations des diplômes.

En effet, au cours des six dernières années, l'ensemble des diplômes professionnels de la filière électrotechnique a été réalisé du CAP au BTS. Cette rénovation a été conduite en étroite relation avec les professionnels du secteur (industriels et installateurs électriciens). Elle s'est adossée à la rénovation du Bac Professionnel Equipement et Installations Electriques (EIE) qui est le premier niveau professionnel reconnu pour la capacité d'intervention, en autonomie, des titulaires de ce diplôme. La réflexion engagée pour prendre en compte la réalité des situations de travail du métier d'électricien a conduit le groupe de travail à proposer un nouveau concept susceptible de mieux traduire les compétences spécifiques nécessaires ainsi que les conditions d'exercice du métier, tant en milieu industriel que sur les chantiers réalisés dans l'habitat et les bâtiments attachés au secteur tertiaire. C'est ainsi que le constat d'un accroissement de la complexité des installations électriques a été fait, en particulier, il était nécessaire d'affirmer que la présence des courants faibles au voisinage des courants forts était une évolution mesurable dans les nouvelles installations. Les équipements électriques sont de plus en plus communicants et, pour des raisons liées à la nécessité d'une continuité de service, ils transmettent en permanence leur état de fonctionnement. Ici, les technologies de l'Internet

¹⁶ Produits « Aide sécurité » (UTE), « Certification des acquis théoriques » (INRS), « Ah ! Tension » (Fondation MAIF - INRS)

s'accroissent au point que des composants usuels sont désormais munis de serveurs Web embarqués qui préviennent, surveillent et optimisent l'énergie électrique dispensées aux équipements.

En amont du nouveau Baccalauréat professionnel ELEEC (électrotechnique, énergie et équipements communicants), la profession a souhaité maintenir un niveau V de formation pour les métiers de l'électricité. Il s'agissait de développer des compétences de réalisation selon les règles de l'art pour le CAP PRO ELEC (préparation et réalisation d'ouvrages électriques) et de renforcer la motivation des élèves de BEP métiers de l'électrotechnique sur des activités électriques plus proches d'installations observables par les élèves dans leur environnement. Les installations communicantes du secteur tertiaire fournissent des scénarios appropriés qui permettent aux élèves d'associer une pratique professionnelle en milieu scolaire aux exposés théoriques qui les préparent à une scolarité professionnelle profitable en milieu professionnel pendant les périodes en entreprise, en Bac Pro ELEEC tout particulièrement.



Logiciel Fiche TP pour les diplômes professionnels

En aval, la rénovation du BTS électrotechnique s'est logiquement développée sur un approfondissement du Baccalauréat professionnel ELEEC mais pas uniquement. Les problèmes à résoudre pour ce diplôme de niveau III concernent également le positionnement de ce Bac plus 2 dont les titulaires accèdent le plus souvent à des missions géographiquement éloignées de leur propre entreprise et qui doivent, tout à la fois, répondre à des exigences de représentation auprès de la clientèle tout en exerçant des compétences liées à une autonomie de décision dans des activités de chantier. De telles activités débouchent sur le management d'une équipe d'électriciens qui doit se coordonner avec d'autres acteurs professionnels. Pour l'ensemble de ces impératifs, le groupe de

travail a préféré adosser le référentiel de BTS électrotechnique sur ce qui devrait relever de la rénovation des baccalauréats technologiques STI qui est en débat au niveau national.

• Le rôle des énergies renouvelables : nouveaux concepts pour l'étude des applications

Mots clés : sobriété et efficacité énergétique, externalités, éco-conception et préférence pour le recours à des ressources renouvelables

En matière de rénovation des diplômes de l'enseignement technique, la réflexion la plus récente concerne la série de baccalauréats technologiques STI. Cette réflexion, conduite par l'IGEN STI et accompagnée par les groupes de physique fondamentale et appliquée et de mathématique, est fondée sur la nécessité de poursuites d'études scientifique et technologique au niveau Bac + 5 (diplôme d'ingénieur ou master de l'université) pour les nombreux élèves de la voie technologique qui en ont la possibilité mais dont l'ambition se limite souvent à Bac + 2 avec un BTS, un DUT ou plus récemment à Bac + 3 avec l'obtention d'une licence professionnelle. Il s'agissait de proposer de nouveaux programmes, confirmant l'usage d'une pédagogie inductive, mais nettement en rupture de professionnalisation au niveau du Bac technologique STI qui conserve encore une double finalité, au moins dans les programmes tels que rédigés au début des années 1990. La construction d'un pôle scientifique au sein des programmes proposés en juillet 2007 apparaissait de nature à participer à la diversification de la voie générale avec des contenus d'enseignements tournés vers la poursuite d'études.

Extraits du préambule pour un Baccalauréat technologique « énergie et environnement » se substituant aux Bac STI génie électrotechnique et génie énergétique actuels :

Ce projet de baccalauréat indiquait clairement une double préoccupation avec, d'une part, l'énergie qui conditionne dans une large mesure le développement humain et dont le coût s'accroît sans cesse en regard de la raréfaction des ressources fossiles, et, d'autre part, l'environnement qui est largement conditionné par les rejets des applications dans l'écosystème et l'épuisement des ressources en matières premières qui engendrent de fortes externalités¹⁷.

¹⁷ Les externalités désignent les effets positifs ou négatifs que les activités économiques d'un groupe d'agents peuvent avoir sur le bien-être d'un autre

groupe, et ceci sans que le marché les fasse rétribuer ou payer (la pollution est l'exemple type d'une externalité négative). Il peut également y avoir un "bénéfice

Les besoins vitaux de l'homme pour s'alimenter, se protéger, communiquer, se déplacer, se maintenir en bonne santé et se distraire sont à l'origine d'une consommation d'énergie croissante. Parallèlement, les réserves en ressources naturelles fossiles sont limitées. Associées au sein d'un même domaine, les notions d'énergie et d'environnement doivent s'inscrire dans la perspective d'un développement harmonieux et durable. La production des biens et des services se doit de respecter les ressources disponibles en limitant les rejets et les nuisances à des valeurs que l'écosystème et la biosphère peuvent absorber.

La conception des systèmes techniques, utilisateurs de l'énergie dans toutes les phases de leur cycle de vie, doit, à l'instar de la prise en compte des contraintes économiques, respecter les contraintes environnementales qui constituent désormais l'un des enjeux majeurs du développement. Ce nouvel impératif technologique peut trouver une réponse favorable dans l'Éco-conception¹⁸ des systèmes artificiels et la gestion optimisée de l'énergie. Des procédés nouveaux, respectueux des attentes liées à l'Éco-conception des systèmes et à la gestion optimisée de l'énergie, sont développés à travers un modèle énergétique efficace, respectueux des ressources et de l'environnement. La recherche et le développement d'applications, représentatives des usages¹⁹ courants dans la société, constituent autant d'opportunités pour l'intégration de tels procédés dans la technologie des systèmes qui utilisent, ou génèrent, des flux d'énergie, d'informations, de produits et des rejets. Ainsi, l'analyse des solutions constructives qui portent ces applications et de leurs impacts sur l'environnement, dans l'ensemble du cycle de vie où elles interviennent, constitue le champ d'étude de la spécialité « Énergie et Environnement ».

Les scénarios qui conduisent aux études liées aux applications précisent les enjeux²⁰ et le contexte fondateurs des utilisations. Ces scénarios s'intéressent à l'ensemble du cycle de vie des matériels et équipements mis en œuvre. Pour la modélisation de l'application, on s'intéresse

systématiquement aux procédés élémentaires²¹ consommateurs d'énergie (travail ou échange thermique).

De nombreuses fiches applicatives ont été publiées et sont disponibles sur le serveur RESELEC, elles traduisaient l'état d'esprit qui devrait prévaloir au sein d'enseignements nouveaux où le vecteur énergie électrique, non directement stockable de manière permanente, joue un rôle fondamental pour l'efficacité et la sobriété énergétique dans les applications terminales aussi bien que dans les nouvelles structures permettant sa génération et au plus près de l'utilisation qui en est faite (éolien, photovoltaïque, pile à combustible...). Les enseignants ont bien compris l'intérêt que portent les élèves et étudiants à ces orientations, ils essayent, sans dénaturer les programmes actuellement en vigueur, d'élargir la frontière des applications industrielles proposées aux élèves en intégrant la nécessité de comptabiliser les rejets depuis l'extraction des ressources jusqu'à leur recyclage et leurs impacts sur l'environnement et pour l'ensemble du cycle de vie des équipements nécessaires.

Les pôles d'étude suivants peuvent contribuer à la réflexion pédagogique des professeurs de génie électrique, ils doivent permettre de développer des orientations plus volontiers tournées vers le devenir humain dans le contexte de la mondialisation des ressources naturelles et de leur utilisation.

Pôle 1 – Éco-conception des systèmes artificiels et gestion optimisée de l'énergie, dont l'objet est de :

- Caractériser le besoin et le service rendu par une application ;
- Évaluer les effets produits sur l'environnement pour l'ensemble du cycle de vie du système ;
- Décrire et classer les éléments physiques constitutifs d'un système ou d'un équipement en fin de vie.

externe", comme la création d'une activité touristique autour du lac de retenue d'un barrage hydroélectrique.

¹⁸ L'éco-conception correspond à l'intégration des aspects environnementaux dans la conception ou la reconception des produits. Il s'agit de prendre en compte les exigences environnementales sur le produit : consommation de ressources, émissions atmosphériques, production de déchets, valorisation du produit dans l'ensemble du cycle de vie.

¹⁹ Les usages qui correspondent aux applications énergétiques visées concernent notamment le confort dans l'habitat, la qualité de l'air et de l'eau, la conservation des denrées alimentaires, la production de biens et les transports.

²⁰ Les enjeux concernent notamment l'environnement, l'économie, le marché, l'ergonomie, les externalités.

²¹ La matrice proposée ci-dessous synthétise les possibilités d'action des procédés susceptibles d'être exploités au sein d'une application :

Matière d'œuvre	Activités élémentaires nécessitant de l'énergie		
	Transformation T	Déplacement D	Stockage S
Produit P	TP	DP	SP
Énergie W	Tw	Dw	Sw
Information I	TI	DI	SI

TP représente la transformation d'un produit ; Dw représente le déplacement (transport) de l'énergie ; SI représente un stockage d'informations.

Pôle 2 – Étude comparée d'applications dans leurs contextes, dont l'objet est de :

- Décrire et représenter l'organisation fonctionnelle de systèmes ou d'équipements qui répondent à des usages et des performances à une date donnée ;
- Comparer des applications liées à un même usage et mettre en évidence des améliorations ;
- Argumenter le choix d'une solution²² d'alimentation en énergie pour le fonctionnement d'une application.

Pôle 3 – Analyse et validation de procédés, dont l'objet est de :

- Mettre en œuvre un système ou un équipement où l'énergie occupe une place importante ;
- Associer, dans un système, une solution constructive à un procédé technique ou à une fonction technique ;
- Identifier, par des essais, les modifications apportées par les procédés sur les matières, énergies et informations ;
- Exploiter une modélisation du réel pour prévoir un comportement ou valider un procédé technique selon un point de vue.

Pôle 4 – Innovation et veille stratégique, dont l'objet est de :

- Contribuer à un projet technique dans une démarche globale et pluridisciplinaire ;
- Situer une application dans son environnement historique et proposer des critères discriminants pour construire une base de données techniques stratégique destinée à une application actuelle présentant un usage similaire.

3. Les services offerts par RESELEC aujourd'hui

La plupart des productions et des contributions du réseau sont disponibles en ligne à l'adresse Internet <http://www.iufmrese.cict.fr>, elles sont le fruit de nombreuses expérimentations sur le terrain et également des améliorations enregistrées lors des critiques émises par les utilisateurs. En effet, dès l'année 1995, le réseau de ressources s'est doté d'un serveur Web²³ et les principales évolutions des services rendus par RESELEC sont associées à ce nouveau vecteur de diffusion qui permet, tout à la fois, de servir des ressources primaires et de recueillir les demandes et les contributions des utilisateurs de terrain.



1991 – 2008 : hier et aujourd'hui le réseau RESELEC

Au début de l'activité de RESELEC, de nombreuses publications, productions sur supports papier et logiciels sur disquettes, étaient acheminés par courrier postal²⁴. En 1995 quelques milliers d'accès au serveur étaient enregistrés au bénéfice de quelques établissements scolaires, c'est plus d'un million d'accès qui ont abouti sur le serveur à compter de l'année 2000.

Parallèlement, et pour améliorer la communication avec l'ensemble des acteurs du génie électrique, le service RESELEC a mis en place, depuis l'exercice 1999, une liste de diffusion modérée. Cette liste a aujourd'hui fait place à un forum qui permet, en France et à l'étranger, d'échanger des expériences pédagogiques, de poser des questions et d'obtenir des réponses, de faire connaître ses travaux et de mutualiser des idées. Pour la seule année 2000 ce sont 1800 messages qui ont été traités et échangés mais la croissance des échanges constatée sur le serveur pourrait aboutir à l'incapacité de traiter toute l'information en provenance des acteurs de terrain si les moyens humains nécessaires ne devaient plus perdurer.



Aujourd'hui, l'ensemble des missions confiées à RESELEC coexistent avec la volonté de servir des documents primaires directement exploitables par les utilisateurs. Le réseau encourage les initiatives qui visent les possibilités

²² L'électricité présente un cas particulier dénommé « vecteur d'énergie ». Ce vecteur constitue le carrefour des formes d'énergie utiles. Il assure la décentralisation des moteurs et des contrôles commandes. Hors usages calorifiques, il est le vecteur principal des énergies renouvelables et apparaît privilégié pour l'information. Son inconvénient majeur est de ne pratiquement pas être stockable.

²³ Dès le début de la mise en place de RESELEC, le réseau s'est doté d'un serveur Minitel (3614 Code RESELEC) qui permettait à

quiconque de se renseigner sur l'avancement des productions engagées par ses acteurs. Le serveur permettait une communication constante entre les enseignants grâce à sa messagerie accessible à tous. RESELEC a été le premier réseau à développer un serveur Web sur Internet dès 1993.

²⁴ Plus de 300 envois postaux en 1993, 16 seulement pour l'année 2000 et acheminements postaux très marginaux désormais

pédagogiques du multimédia et de la formation continue à distance. L'animation de procédés virtuels ou réels, pilotés à distance, ouvre de nouvelles perspectives qu'il faudrait développer à chaque niveau d'apprentissage. De même, la production de scénarios multimédia décrivant des contextes industriels authentiques en vue de la prise en compte de contextes professionnels d'intervention est nécessaire.

Outre son accès direct à Internet par <http://www.iufmrese.cict.fr>, et pour plus de lisibilité pour l'ensemble des personnes concernées, professeurs ou professionnels des entreprises, RESELEC est accessible depuis le portail du département STI du CERPET²⁵ par <http://www.cerpet.education.gouv.fr/>.

Il convient de remercier ici l'ensemble des acteurs, nombreux formateurs, professeurs du second degré, universitaires ou professionnels, qui ont permis le développement de serveurs comme RESELEC. La promotion d'échanges, de démarches innovantes et d'expériences professionnelles vécues sur le terrain, demeure l'un des meilleurs vecteurs du développement de la formation continue des maîtres de l'enseignement technique.

Jean-Paul CHASSAING
inspecteur général honoraire depuis septembre 2007

4. Vers de nouvelles missions pour les serveurs attachés à la formation en génie électrique

Le génie électrique plonge ses racines dans la lampe d'Edison (1879) et la machine de Gramme (1880). Aujourd'hui, qu'est ce que le Génie électrique ? L'électronique analogique « traditionnelle » du composant a disparu pour laisser place à la micro électronique. Une électronique numérique incluant une forte composante logicielle, le traitement du signal et la communication. L'électronique de puissance n'a pas disparu mais les convertisseurs de puissance sont intégrés à la commande, ces systèmes sont paramétrables, l'adaptation aux caractéristiques des moteurs électriques est automatique. Le dénominateur commun du génie électrique, c'est la communication, tous les systèmes communiquent à tous les niveaux. A l'origine des liaisons « série », maintenant des liaisons réseaux sont assurées par des supports filaires (Ethernet, Profibus, EIB/KNX) ou bien sans fil avec les techniques « WiFi » et

« Bluetooth ». Au sein des cartes électroniques, nous retrouvons également cette fonction communication avec des bus spécialisés « I2C » qui assure le dialogue entre les circuits complexes incluant également les phases de test (« JTAG ») et de maintenance. Le génie électrique associe la chaîne d'énergie et la chaîne d'information, il évolue très rapidement vers une approche fonctionnelle en intégrant des domaines théoriques connexes tels que l'informatique industrielle, l'automatique, l'instrumentation.

Les métiers du génie électrique connaissent plusieurs évolutions, qui concernent à la fois la fabrication des systèmes et les méthodes de réalisation des composants. Les composants de l'électronique ont disparu pour laisser place aux circuits programmables, la fonction désirée est obtenue par l'association du circuit (« FPGA ») et sa programmation. Les composants de puissances sont devenus intelligents par l'intégration de la commande. Cette première évolution offre une amélioration des performances par la réduction de la taille des cartes électroniques, une réduction et une plus grande maîtrise des flux thermiques et une amélioration de l'ergonomie des systèmes.

La deuxième évolution du domaine du génie électrique réside dans l'intensification de l'industrialisation de la production de composants qui transforme les métiers de la conception. La conception des éléments d'un système se fait à partir d'outils CAO partagés par l'équipe projet. La démarche projet requiert maintenant une approche projet pluridisciplinaire qui intègre dès la genèse du projet, toutes les phases de l'éco conception.

L'éco-conception correspond à l'intégration des aspects environnementaux dans la conception ou la re-conception de produits. Il s'agit de prendre en compte les exigences environnementales sur le produit : réglementation, image de marque, etc, ainsi que les conséquences environnementales du produit : consommations de ressources, émissions atmosphériques, production de déchets, valorisation du produit en fin de vie, etc...

Les exigences et les conséquences doivent être envisagées sur tout le cycle de vie du produit. En effet il s'agit d'obtenir une performance globale²⁶.

Il s'agit tout à la fois de mieux maîtriser les risques et les coûts liés au cycle de vie des produits, pour une meilleure prise en compte de l'environnement et faire de l'environnement un

²⁵ Centre d'études et de ressources pour les professeurs de l'enseignement technique

²⁶ Extrait de ECOBILAN
(http://www.ecobilan.com/index_fr.html)

levier de créativité lors des processus de conception de produit.

La formation des techniciens supérieurs en Génie électrique doit intégrer cette démarche et assurer une certaine polyvalence matérielle, logicielle. Le diagramme sagittal met en évidence les interactions entre les éléments du système et l'environnement. Une activité importante de l'équipe projet réside dans la veille technologique pour repérer les produits nouveaux et faire une comparaison critique des performances afin d'optimiser la conception en fonction des contraintes environnementales.

La troisième caractéristique de l'évolution du génie électrique est le développement au niveau numérique de l'électronique programmable. Ce développement permet la généralisation des séquences de test, la traçabilité des produits, un diagnostic des dysfonctionnements, une maintenance prédictive et curative faite à distance par l'intermédiaire des réseaux de communication. Aujourd'hui l'intervention des techniciens en génie électrique ne consiste plus à dépanner une carte et remplacer le composant défectueux mais à opérer à son remplacement et paramétrer le nouveau système.

Ces évolutions majeures nous amènent à formuler quelques constats, le logiciel a pris une importance croissante dans le développement des projets mais également dans la simulation. Le cycle de vie des produits est de plus en plus court. La documentation papier « data book » n'existe plus mais les informations sont disponibles sur les sites informatiques des constructeurs.

Quels sont les besoins des entreprises (PME, PMI) ?

Le développement des nouvelles énergies et de la maîtrise de l'énergie implique l'acquisition de nouvelles compétences, qui n'entrent pas aujourd'hui dans le cadre des compétences traditionnelles des électriciens. Les entreprises ont besoin de techniciens polyvalents pour la pose d'équipements dans de nouveaux environnements et à la frontière d'autres corps de métiers. On demandera à un technicien électrotechnicien d'installer et mettre sous tension un TGBT communicant mais également de paramétrer ce système et l'intégrer dans le dispositif de supervision du bâtiment. Dans le domaine de l'habitat, le technicien procédera à l'installation de puissance des appareils de chauffage (et climatisation) mais vérifiera également le paramétrage et le bon fonctionnement de l'installation pilotée par des

courants porteurs (CPL). Les électriciens sont amenés à maîtriser des techniques et des compétences de plus en plus complexes dans les domaines de l'énergétique, de la communication dans le respect des contraintes environnementales et en particulier connaître et respecter les normes en vigueur. Il faut préparer dès aujourd'hui les formations qui permettront de réunir ces compétences.

Des emplois nouveaux sont en émergence dans le bâtiment ²⁷ : *Le bâtiment est le secteur le plus consommateur d'énergie en France, 42,5 % de l'énergie finale totale. C'est chaque année, plus d'une tonne d'équivalent pétrole consommé par Français, avec une consommation moyenne annuelle d'énergie primaire de 240 kWh/m² alors qu'il est possible d'atteindre les 50 kWh/m², le bâtiment constitue une des clefs permettant de diviser par quatre nos émissions des gaz à effet de serre à l'horizon 2050. Tous les bâtiments et équipements publics devront être construits dès maintenant (2010) en basse consommation (50 kWh/m²) ou seront à énergie passive ou positive. Les énergies renouvelables les plus performantes seront systématiquement intégrées.*

Le domaine des énergies renouvelables (ENR) est également en expansion.

Si les énergies renouvelables sont aujourd'hui marginales dans la production d'énergie française (6,1% de la production nationale en 2006), les conclusions du Grenelle de l'Environnement prévoient de faire produire par les ENR 20% de l'énergie d'ici à 2020 (+ 20 Mtep). Triplant leur part en moins de 13 ans, les ENR vont donc connaître un développement accéléré dans les toutes prochaines années. La progression devrait particulièrement toucher le solaire (photovoltaïque et thermique), dans une moindre mesure les biocarburants et l'éolien, et à la marge les autres énergies. Les métiers de l'électricité se trouvent donc à la pointe de la révolution qui commence.

Les objectifs du Grenelle de l'Environnement (réduction de la consommation d'énergie et de développement des ENR) sont arrêtés et vont se décliner dans les prochains mois en mesures concrètes, qui vont nécessiter du personnel en plus grand nombre et possédant des compétences aujourd'hui émergentes.

Dans le cadre du réseau « RESELEC » et du « CERPET » des actions de formation peuvent être entreprises pour répondre à la demande des PME,

²⁷ Le Grenelle de l'environnement

PMI, former des enseignants pour répondre à la demande des entreprises, au durcissement des normes et à la hausse des qualifications, avec la double compétence d'énergies renouvelables et gestion de l'énergie. Les connaissances à maîtriser dans le domaine de l'énergétique s'étendent selon plusieurs axes :

- un axe administratif et réglementaire lié aux énergies nouvelles
- Maîtriser les techniques mises en œuvre dans la création de bâtiment et dans la rénovation.
- Pouvoir intervenir en maintenance sur des systèmes associant plusieurs sources d'énergie.

Les compétences à acquérir relèvent de différents domaines incluant l'électrotechnique, l'électrothermie, le chauffage, la climatisation. Ces actions de formation ne visent pas à transformer l'électricien en spécialiste de chaque domaine, mais à lui permettre de travailler en équipe, gérer un chantier, coordonner le travail de différents corps de métier au mieux de la réglementation et des règles de l'art, conseiller un client. Il est par conséquent indispensable que le technicien en Génie électrique ou énergétique possède une connaissance transverse de l'ensemble de ces compétences.

5. L'avenir proche et les évolutions de la recherche en Génie Electrique

La recherche dans le domaine universitaire s'articule autour de deux axes très complémentaires, les sciences de l'Énergie et celles de la Communication. Ces activités de recherche sont majoritairement menées contractuellement avec les entreprises, elles permettent de répondre à une forte demande de l'industrie et de la société. Cette complémentarité se retrouve dans la fusion de la chaîne d'énergie et de la chaîne d'information, condition indispensable pour maîtriser l'énergie et respecter les normes environnementales.

La maîtrise de l'énergie et la réduction de la pollution se retrouvent dans de nombreuses applications par exemple l'automobile :

- Réalisation d'alternateurs performants
- Assistance électrique d'un turbocompresseur
- Soupapes électromagnétiques

L'intelligence se retrouve dans la réalisation de systèmes mécatroniques, mais également dans la recherche des matériaux liés au génie électrique qui conduit à des réalisations dans de nombreux domaines. Les composants passifs du génie électrique utilisent des matériaux magnétiques (aimants, fer), des matériaux diélectriques, des

matériaux conducteurs (cuivre, aluminium) et semi conducteurs (silicium, gallium). Les évolutions en électronique de puissance conduisent à un développement des composants passifs monolithiques qui intègre des matériaux magnétiques, diélectriques et conducteurs pour réaliser une fonction. Les économies d'énergie et l'obligation de maîtriser les flux thermiques permettent une évolution rapide de l'intégration des convertisseurs de puissance en réduisant l'encombrement, le poids et en accroissant notablement la fiabilité et le rendement. Dans le même temps les normes relatives aux perturbations électromagnétiques conduites et rayonnées se sont durcies et le fonctionnement des convertisseurs en réseau nécessite une modélisation complexe dont l'objectif consiste à proposer une conception optimisée en termes de coût, de performances énergétiques des dispositifs de filtrage.

Les outils de la communication apportent également leur contribution à l'évolution des énergies renouvelables, par le développement des outils de l'automatique au service des applications du génie électrique. Par exemple, il est maintenant nécessaire de maîtriser et de décrire finement le modèle de connaissance d'un dispositif éolien (le couplage au réseau, le contrôle du convertisseur électromécanique, la conversion électrique et la structure mécanique). La réduction du modèle de connaissance permet d'élaborer un modèle de comportement qui conduit à une commande robuste des machines électriques dans un environnement complexe de réseau.

La veille technologique effectuée par le réseau « RESELEC » auprès des laboratoires de recherche et des entreprises assure l'information des enseignants et participe à l'autoformation indispensable pour accompagner les réformes des programmes.

Claude BERGMANN inspecteur général
l'éducation nationale

LEDs blanches et conversion DC-DC - 3^{EME} partie

Frédéric NARCY

Professeur de Physique appliquée

Lycée Léonard de Vinci - 91240 Saint-Michel-sur-Orge

Frederic.Narcy@ac-versailles.fr

Résumé : Cette dernière partie est consacrée à l'étude de quelques circuits dédiés à l'alimentation des leds, qu'elles soient de puissance ou non. Parmi le très grand nombre de produits existants on s'intéressera à quelques circuits intégrés parmi les plus simples. Leurs stratégies de commande originales permettent de diversifier l'étude des hacheurs élévateur et abaisseur.

On abordera aussi le « détournement » en source de courant de régulateurs de tension à découpage. Cette technique largement utilisée par les constructeurs pour alimenter des leds présente un grand intérêt pédagogique pour l'étude des systèmes en boucle fermée.

1. UNE MULTITUDE DE PRODUITS POUR ALIMENTER LES LEDS

1.1. Les drivers de leds

On ne compte pas moins d'une vingtaine de constructeurs de composants électroniques qui proposent leur propre gamme de circuits intégrés dédiés à l'alimentation des leds. Ces composants permettent de constituer des convertisseurs de très bon rendement et de très faible encombrement. Ils sont notamment utilisés pour alimenter les leds de rétroéclairage des petits écrans à cristaux liquides comme ceux des téléphones portables, des baladeurs MP3 ou des navigateurs GPS. On en trouve aussi dans les spots à leds qui commencent à être proposés en remplacement des lampes halogènes très basse tension. Ils servent aussi à fabriquer des alimentations pour leds, prêtes à câbler, qui prendront place ensuite dans des systèmes ou des installations.

Si beaucoup de ces drivers de leds se font concurrence car étant destinés aux mêmes utilisations, on est frappé par leur grande diversité. Du circuit minimaliste au très complexe, on trouve des stratégies de commande très variées. Dans ce domaine très concurrentiel et en pleine évolution, les constructeurs font preuve de beaucoup d'originalité et de créativité.

On notera que l'utilisation de ces circuits intégrés de technologie CMS (composants montés en surface), n'est pas encore généralisée. Beaucoup d'appareils de très grande série comme des lampes de poche ou des bornes lumineuses de jardin utilisent toujours des convertisseurs à composants discrets traversants ou CMS comme celui présenté par Hervé Ricard dans l'article précédent (La Revue 3EI n°48).

On n'abordera pas ici les convertisseurs à pompe de charge ou les structures complexes, mais seulement les hacheurs élévateur et abaisseur qui fonctionnent comme leurs aînés de puissance, même si leurs commandes ne reposent pas sur les mêmes principes.

Si leur mise en oeuvre n'est pas aisée en raison de leur petite taille, ces circuits intégrés peuvent faire aussi l'objet de problèmes et de simulations.

1.2. L'utilisation de régulateurs de tension à découpage

Grâce à leur rendement plus élevé, les régulateurs de tension à découpage chauffent moins que les régulateurs de tension linéaires. Ne nécessitant pas de dissipateur volumineux, ils sont destinés aux applications qui exigent une bonne efficacité énergétique et un faible encombrement.

Il s'agit de circuits intégrés permettant de constituer des hacheurs abaisseurs, élévateurs ou inverseurs en utilisant une bobine et quelques autres composants externes. Le montage complet est un système bouclé qui régule la tension de sortie avec un diviseur de tension en guise de chaîne de mesure.

Il est très facile d'obtenir une source de courant à partir d'un tel régulateur. Les constructeurs de ces circuits diffusent d'ailleurs des notes d'application qui expliquent comment les utiliser pour alimenter des leds. Ils trouvent là de nouveaux débouchés à des composants qui datent souvent d'avant l'avènement des leds de puissance.

Ces composants sont assez faciles à mettre en oeuvre car ils existent souvent en boîtier DIL et ne nécessitent que peu de composants externes.

circuit intégré	ZXSC310	ZXSC400	PR4401	ZXLD1360
constructeur	Zetex	Zetex	Prema	Zetex
boîtier	SOT23-5	SOT23-6	SOT23-3	SOT23-5
taille réelle				
type de hacheur	élevateur (abaisseur, inverseur)	élevateur (abaisseur)	élevateur	abaisseur
tension d'alimentation	0,8 V à 8 V	1,8 V à 8 V	0,9 V à 1,9 V	7 V à 30 V
intensité de sortie	transistor externe	transistor externe	22 mA	1 A
nombre minimum de composants externes	3	6	1	3

2. PRÉSENTATION DE QUELQUES CIRCUITS INTÉGRÉS SPÉCIALISÉS

On a retenu quatre circuits intégrés parmi les plus simples, ils sont présentés dans le tableau ci-dessus.

2.1. Le ZXSC310 de Zetex

Ce petit driver à 5 broches est destiné aux applications portables. Il permet d'alimenter jusqu'à 8 leds blanches en série à partir d'une source de quelques volts. La figure 1 montre le circuit minimal pour un fonctionnement en hacheur élévateur.

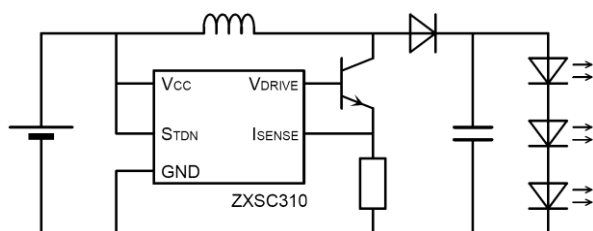


Figure 1 : Le ZXSC310 utilisé en hacheur élévateur

Peu de circuits intégrés, de quelque type que ce soit, présentent un schéma de principe aussi simple. Comme le montre la figure 2, on trouve une source de tension de référence $V_{REF} = 19 \text{ mV}$, un comparateur et un monostable de durée $T_{OFF} = 1,7 \mu\text{s}$.

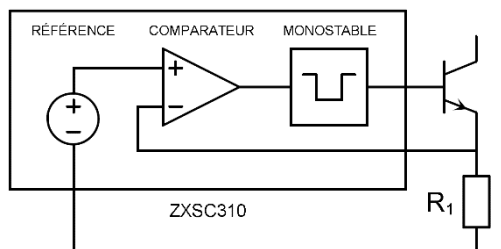


Figure 2 : Schéma de principe du ZXSC310

A la mise sous tension, le transistor est saturé et l'intensité i dans la bobine augmente progressivement. Quand la tension aux bornes de R_1 atteint V_{REF} , le comparateur commute et déclenche le monostable. Le transistor reste alors bloqué pour la durée T_{OFF} . Pendant ce temps, l'intensité i dans la bobine diminue. Quand le transistor est à nouveau passant, i augmente à nouveau

jusqu'à sa valeur maximale $I_{MAX} = V_{REF} / R_1$.

En imposant les deux paramètres I_{MAX} et T_{OFF} , le circuit intégré garantit un fonctionnement périodique sans surintensité, mais l'intensité moyenne dans les leds n'est pas indépendante de la tension d'alimentation. Suivant les valeurs des composants, on obtient une conduction continue ou une conduction interrompue comme sur la figure 3.

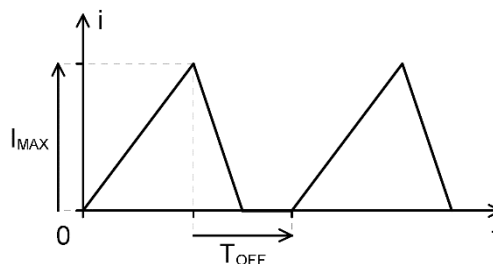


Figure 3 : Intensité dans la bobine (conduction interrompue).

Le ZXSC310 impose I_{MAX} et T_{OFF}

Quand on met en œuvre ce circuit, l'application impose la tension d'alimentation V_{IN} , la tension totale aux bornes des leds V_{LED} ainsi que l'intensité moyenne dans les leds I_{LED} . Compte tenu de V_{REF} et de T_{OFF} , il faut alors choisir les valeurs de R_1 et de l'inductance L de la bobine. A priori on peut choisir l'un de ces deux paramètres, ce qui fixe l'autre. Cependant, il ne faut pas dépasser la fréquence maximale de fonctionnement égale à 200 kHz mais aussi obtenir une conduction continue, ou presque, pour que I_{MAX} ne soit pas trop grande et ainsi optimiser le rendement.

Malgré un fonctionnement très simple du circuit, l'étude théorique est assez compliquée et conduit à des expressions très lourdes. D'ailleurs, le constructeur ne donne aucune formule pour déterminer R_1 et L mais indique des valeurs pour des cas précis. Par exemple pour quatre leds en série, $I_{LED} = 20 \text{ mA}$ et $V_{IN} = 3,3 \text{ V}$, il préconise $R_1 = 0,15 \Omega$ et $L = 68 \mu\text{H}$.

Au cours du fonctionnement, il n'y a guère que la tension d'alimentation qui est susceptible de varier. En effet, la source étant souvent constituée de piles ou d'accumulateurs, V_{IN} diminue au cours de l'utilisation. On observe en même temps une diminution de I_{LED} qui reste cependant acceptable pour de nombreuses

applications.

La société LUXDRIVE produit toute une gamme de hacheurs en boîtiers moulés, prêts à l'emploi. Le modèle MICROPUCK présenté figure 4 reprend exactement le circuit de la figure 1 autour d'un ZXSC310. Il a été dimensionné pour alimenter une led de puissance 1 W ($V_{LED} = 3,4 \text{ V}$ et $I_{LED} = 0,35 \text{ A}$) avec deux piles de 1,5 V ou deux accus de 1,2 V.

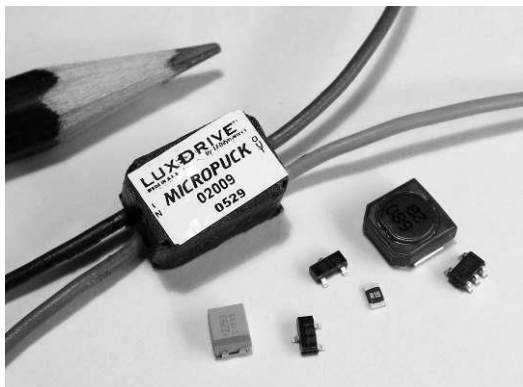


Figure 4 : Hacheur MICROPUCK en boîtier moulé prêt à l'emploi. Devant, les CMS qu'il contient.

Ce circuit a la particularité de pouvoir être câblé en hacheur élévateur, abaisseur ou inverseur. En comparant les figures 1 et 5, on retrouvera bien les structures des trois hacheurs non réversibles.

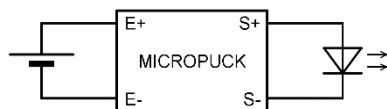


Figure 5a : Micropuck câblé en hacheur élévateur

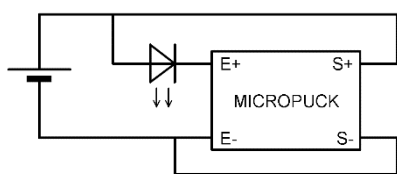


Figure 5b : Micropuck câblé en hacheur abaisseur

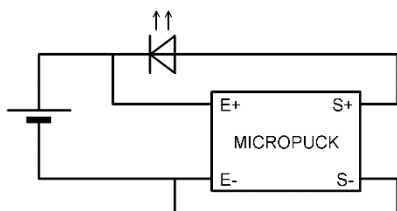


Figure 5c : Micropuck câblé en hacheur inverseur

On choisit la configuration suivant que la tension d'alimentation est plus faible, plus élevée ou du même ordre de grandeur que la tension de la led. Dans chaque cas, il n'y a qu'une seule valeur de la tension d'alimentation qui donne précisément l'intensité

nominale de 0,35 A dans la led.

Avec les configurations élévateur et inverseur, on peut même associer deux MICROPUCK en parallèle pour alimenter une led d'intensité nominale 0,7 A.

L'exploitation pédagogique du ZXSC310 est-elle possible ?

- Ce driver n'est pas celui qui se prête le mieux à la réalisation d'un TP. Outre les problèmes de mise en oeuvre des CMS qui seront abordés dans la partie 3, les résultats obtenus avec le ZXSC310 sont assez décevants. En effet, si on retrouve bien un T_{OFF} constant, en revanche I_{MAX} varie avec la tension d'alimentation. Cela est dû à la durée non négligeable des commutations successives aboutissant à l'ouverture du transistor. Une résistance entre la base du transistor et la masse, préconisée depuis peu par le constructeur, ne règle pas le problème. Cela n'enlève rien à l'intérêt pratique du driver mais ne permet pas de vérifier la loi de commande.

Les connexions internes du MICROPUCK n'étant pas accessibles, ce dernier ne peut servir qu'à faire des mesures de rendement ou à montrer concrètement ce qu'est un hacheur élévateur.

- On peut composer un problème consistant à faire tracer des chronogrammes pour des valeurs numériques précises. Après avoir fait calculer la dérivée de l'intensité i dans la bobine quand l'interrupteur est fermé puis quand il est ouvert, on demande de tracer de proche en proche la courbe $i(t)$. On pourra étudier deux cas, l'un avec une conduction continue et l'autre avec une conduction interrompue. On peut évidemment adopter des valeurs plus simples pour V_{REF} et T_{OFF} .

- Enfin, le ZXSC310 est très facile à simuler. La figure 6 montre sa modélisation avec le logiciel PSIM.

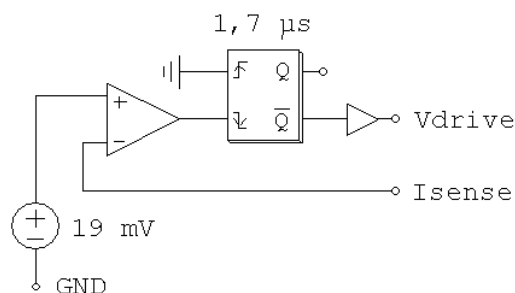


Figure 6 : Modélisation du ZXSC310 avec PSIM

2.2. Le ZXSC400 de Zetex

Ce driver fonctionne comme le ZXSC310, avec la même durée d'ouverture $T_{OFF} = 1,7 \mu\text{s}$ mais avec une tension de référence $V_{REF1} = 28 \text{ mV}$. Il comporte en plus la possibilité de réguler l'intensité dans les diodes. Comme le montre la figure 7, une tension image de l'intensité dans les diodes est ramenée sur la borne V_{FB} (FB pour feedback). Cette tension est comparée à une

tension de référence $V_{REF2} = 300 \text{ mV}$. Quand cette valeur est dépassée, le fonctionnement est inhibé jusqu'à ce que la tension image repasse sous ce seuil. Le constructeur ne précise pas s'il y a de l'hystérésis. Il s'agit de toute façon d'une régulation en tout ou rien.

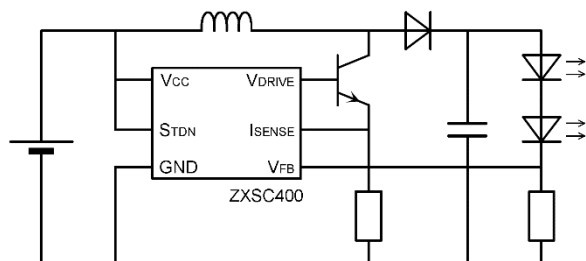


Figure 7 : Le ZXSC400 utilisé en hacheur élévateur

La valeur régulée de l'intensité est donc définie par la résistance R_2 placée en série avec les leds : $I_{LED} = V_{REF2} / R_2$. Comme l'illustre la figure 8, la régulation ne fonctionne pas en dessous d'une certaine valeur de la tension d'alimentation, la valeur régulée de l'intensité n'étant pas atteinte même avec un fonctionnement continu.

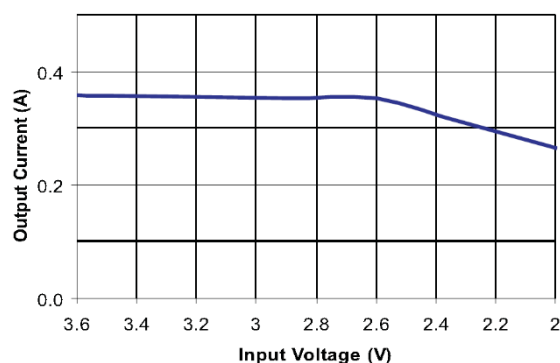


Figure 8 : Régulation de l'intensité par un ZXSC400
Intensité dans deux leds en série en fonction de la tension d'alimentation, $R_1 = 18 \text{ m}\Omega$, $R_2 = 0,82 \Omega$, $L = 22 \mu\text{H}$
(document Zetex)

Le ZXSC400 ne peut pas fonctionner en hacheur inverseur comme le ZXSC310, à moins de désactiver la régulation de courant en connectant la borne V_{FB} à la masse, ce qui fait perdre tout intérêt à ce driver.

2.3. Le PR4401 de Prema Semiconductor

Voilà un driver qui mérite d'être connu. Il est destiné à alimenter une led unique à partir d'une pile de 1,5 V ou d'un accu de 1,2 V. Ce petit circuit n'a que trois bornes, et ne nécessite qu'un seul composant externe : une bobine. Il ne comporte pas de détection de courant, même interne, et pourtant il garantit une intensité dans la led quasi indépendante de la tension d'alimentation ! La valeur de cette intensité est fixée par le choix de l'inductance de la bobine.

On retrouve bien sur la figure 9 la structure d'un hacheur parallèle. L'interrupteur électronique est un transistor interne placé entre les bornes V_{out} et GND . La led jouant à la fois le rôle de diode et de charge, elle est traversée par un courant pulsé.

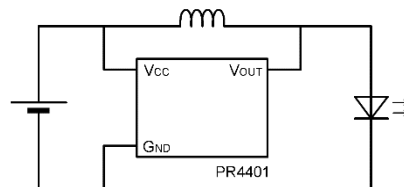


Figure 9 : L'utilisation la plus simple du PR4401

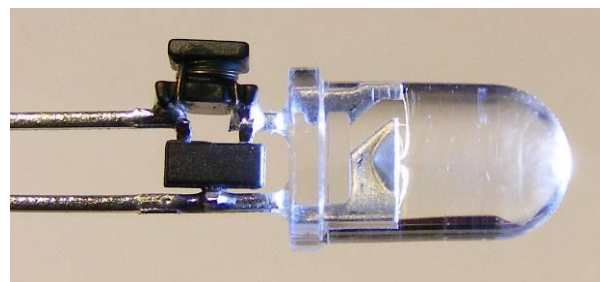


Figure 10 : Câblage minimal : le PR4401 est soudé entre les pattes de la led de diamètre 5 mm et la bobine d'inductance $L = 10 \mu\text{H}$ est au-dessus. Alimentation par un accu de 1,2 V.

Le schéma de principe du constructeur, beaucoup trop obscur, n'est d'aucun secours pour comprendre le fonctionnement de ce circuit intégré. Commençons par observer le chronogramme de l'intensité dans la bobine à la figure 11. On constate que le circuit fonctionne toujours à la limite entre conduction continue et conduction interrompue, et cela quelque soit la valeur de la tension d'alimentation.

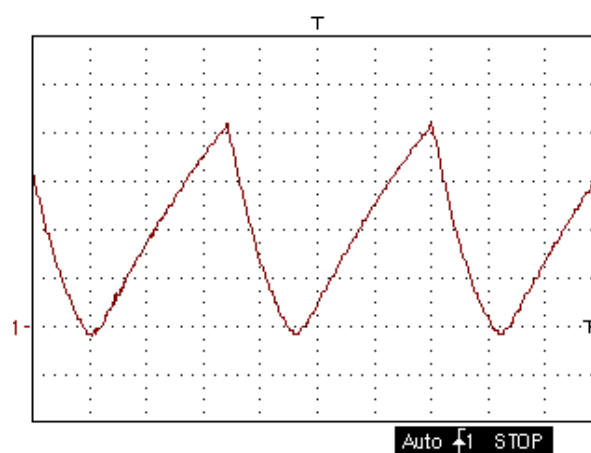


Figure 11 : Intensité dans la bobine du PR4401
horizontalement : $0,5 \mu\text{s/div}$ - verticalement : 40 mA/div

Pour obtenir ce résultat, il faut détecter l'annulation du courant dans la led. Cela est possible sans recourir à une détection d'intensité. En effet, quand la led est passante, le potentiel de la borne V_{OUT} est égal à V_{LED} .

mais une fois que la conduction est interrompue ce même potentiel devient égal à V_{CC} . Le circuit intégré compare donc le potentiel de V_{OUT} à une référence proche de 2 V, valeur inférieure à la tension d'une diode et supérieure à la tension d'une pile ou d'un accu. La fin de la conduction étant ainsi détectée, le transistor est mis en conduction.

Quel est maintenant le critère qui définit l'ouverture du transistor ? Rien d'évident n'apparaît sur les chronogrammes : la durée de fermeture et la valeur maximale de l'intensité varient avec la tension d'alimentation. Il faut donc faire une étude théorique et exprimer I_{LED} , l'intensité moyenne dans la led, en tenant compte du fait que le montage fonctionne à la limite de la conduction continue. On obtient notamment l'expression suivante :

$$I_{LED} = \frac{V_{CC}^2 \cdot T_{ON}}{2 \cdot V_{LED} \cdot L}$$

Pour que I_{LED} ne dépende pas de la tension d'alimentation V_{CC} , il suffit que le circuit ferme le transistor pendant une durée T_{ON} **proportionnelle à l'inverse du carré de V_{CC}** . Ainsi l'intensité est maintenue constante sans détection d'intensité. Attention, il ne s'agit pas d'une régulation car le circuit intégré agit alors en aveugle !

En fait l'étude précédente ne tient pas compte des différents défauts : résistance de la bobine, tension du transistor à la saturation, légères variations de la tension de la led avec l'intensité, etc. Aussi la loi adoptée pour le PR4401 est légèrement différente : grâce à un circuit non linéaire l'exposant de V_{CC} au dénominateur est légèrement inférieur à 2. On peut d'ailleurs le vérifier sur la courbe de la figure 12, obtenue expérimentalement en mesurant T_{ON} pour différentes valeurs de V_{CC} .

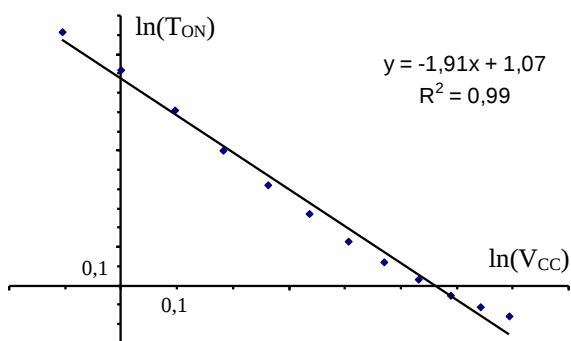


Figure 12 : La durée de fermeture du transistor T_{ON} est proportionnelle à l'inverse de V_{CC} à la puissance 1,9

Le constructeur indique dans un tableau la valeur de I_{LED} obtenue pour différentes valeurs de l'inductance L , par exemple 22 mA pour 10 μ H. Ces valeurs sont en accord avec l'expression de I_{LED} , à savoir que I_{LED} est proportionnelle à l'inverse de L . En plus du PR4401 qui

admet I_{LED} jusqu'à 22 mA, il y aussi le PR4402, identique par ailleurs, qui admet jusqu'à 40 mA.

Pour améliorer le rendement, on peut aussi rajouter une diode et un condensateur en parallèle avec la led comme dans une configuration classique de hacheur parallèle. La société CONRAD propose un petit circuit de ce type autour du PR4401, protégé par une gaine que l'on peut facilement retirer (référence 184816).

2.4. Le ZXLD1360 de Zetex

Ce driver permet de réaliser un hacheur série pouvant contrôler jusqu'à 24 W. Avec son transistor interne qui supporte 1 A, il est assez facile à mettre en œuvre et convient à toutes les leds de puissance.

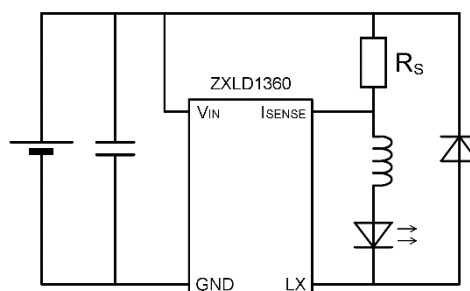


Figure 13 : La mise en œuvre du ZXLD 1360 nécessite peu de composants. Une borne ADJ, non représentée, permet de régler l'intensité dans la led.

L'interrupteur électronique est situé entre les bornes LX et GND. Grâce à la résistance R_s qui donne une image de l'intensité dans la charge, le driver effectue une commande en fourchette de courant dont la logique est résumée par la figure 14.

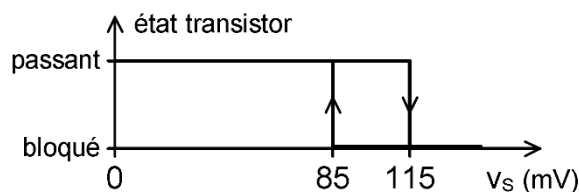


Figure 14 : Etat du transistor interne en fonction de la tension v_s aux bornes de la résistance R_s . (d'après les données du constructeur)

Cette commande est la plus simple qui permet d'obtenir un hacheur se comportant en source de courant, ce qui est indispensable pour alimenter une charge se comportant en source de tension comme une led. Avec les seuils de commutation imposés par le ZXLD1360, la valeur crête à crête de l'intensité dans la charge vaut 30 % de sa valeur moyenne. Ainsi, il n'est pas nécessaire de placer un condensateur en parallèle avec la led.

En observant la tension v_S aux bornes de R_S , on constate, comme le montre la figure 15, que les seuils de commutation ne correspondent pas tout à fait aux données du constructeur. Ce n'est pas seulement dû à la tolérance à la fabrication mais à la durée des commutations comme pour le ZXSC310. On le voit au fait que le dépassement du seuil haut augmente avec la tension d'alimentation et que celui du seuil bas augmente avec le nombre de leds en série.

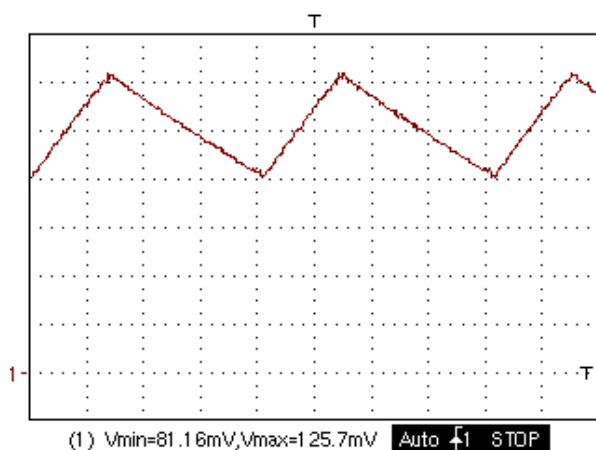


Figure 15 : Tension v_S aux bornes de R_S
Alimentation 12 V, $R_S = 0,33 \Omega$, 1 led de 1 W

Il est possible de mesurer les seuils de commutation par un essai statique comme cela avait été fait pour le hacheur série présenté dans le deuxième article (La Revue 3EI n°48). On rappelle le principe de cette mesure. En partant du circuit de la figure 16a, on retire la diode. On branche ensuite une lampe témoin entre la borne de sortie négative et le plus de la source pour visualiser l'état du transistor. On branche également une résistance réglable et un ampèremètre entre la borne de sortie positive et le moins de la source pour simuler l'intensité dans la charge sans qu'elle soit affectée par l'état du transistor. On obtient alors le circuit de la figure 16b.

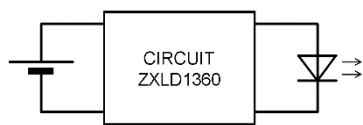
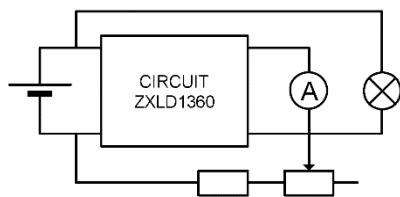


Figure 16a : Utilisation normale

Figure 16b :
Mesure statique
des seuils



En agissant sur la résistance, on fait varier l'intensité dans R_S et on relève les valeurs provoquant la commutation du transistor interne du ZXLD1360. On

peut alors retrouver la courbe de la figure 14, mais avec des valeurs d'intensités en abscisse.

La valeur moyenne de l'intensité dans la led dépend directement de la valeur de R_S : $I_{LED} = 0,1/R_S$. Elle est indépendante de la tension d'alimentation qui peut atteindre 30 V. Une fois que l'on a choisi R_S , on peut alimenter autant de diodes en série que l'on veut du moment que la somme de leurs tensions ne n'atteigne pas la tension d'alimentation.

Dans le premier article (La Revue 3EI n°47), on avait présenté le système d'éclairage de l'association Light Up The World : une batterie de 12 V, rechargée par un module photovoltaïque, alimente des luminaires comportant chacun une led blanche de 1 W. Le circuit autour du ZXLD1360 permet de constituer un tel système d'éclairage. Il est intéressant maintenant de le comparer aux autres solutions.

La solution la plus simple consiste à mettre juste une résistance entre la batterie et la led, ce qui donne évidemment un rendement désastreux. Comme le montre la figure 17, le circuit du ZXLD 1360 n'est même pas beaucoup plus gros que la résistance, et lui ne chauffe pas...

La maquette pédagogique de hacheur série présentée dans le deuxième article était réalisée avec des composants traversants non spécialisés. Il est intéressant de voir à quel point le circuit avec driver spécialisé et composants montés en surface est plus performant : surface vingt fois plus faible, quatre fois moins de composants, moindre coût, meilleur rendement, plus grande plage de tension d'entrée.



Figure 17 : Trois solutions pour alimenter une led de 1 W avec une batterie de 12V : une résistance, le hacheur utilisant le ZXLD1360 et des CMS (au milieu), le hacheur utilisant des composants traversants non spécialisés (au fond).

Le ZXLD1360 n'est pas trop difficile à mettre en œuvre et présente une grande souplesse d'utilisation. On peut étudier sa commande et le comparer à d'autres

solutions. En cela, il présente un intérêt particulier pour l'enseignement.

Le constructeur, Zetex, propose sur son site internet des feuilles de calcul Excel ainsi que des fichiers pour son simulateur libre. On en trouvera de nombreux pour le ZXLD1360 mais aussi pour le ZXSC310 et le ZXSC400.

3. MISE EN ŒUVRE DES COMPOSANTS MONTÉS EN SURFACE (CMS)

De nombreux composants n'existent que sous forme de CMS (Composants Montés en Surface ou SMD pour Surface-Mounted Device). C'est le cas de tous les drivers de leds.

La mise en œuvre des CMS dans les règles de l'art requiert du matériel et des compétences spécifiques que l'on ne trouve pas dans tous les établissements d'enseignement. Cependant, avec un petit équipement et de la patience il est possible de réaliser de petits circuits. On peut même éviter la réalisation d'un circuit imprimé à la condition de n'utiliser que les plus gros circuits intégrés montés en surface. Ainsi, les boîtiers du type SOT23 à 3, 5 ou 6 bornes sont utilisables sur une plaque d'essais à bandes. Tous les drivers décrits dans cet article ont été testés de cette façon.

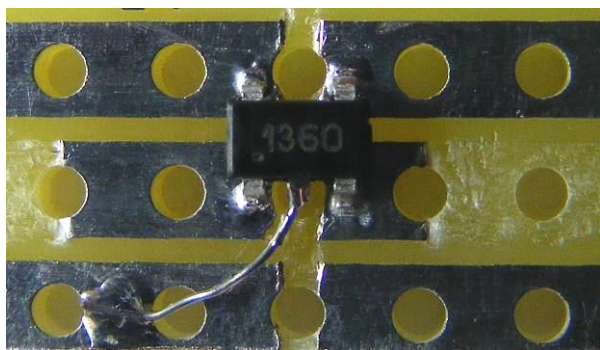


Figure 18 : On peut mettre en œuvre les boîtiers SOT23 sur une plaque d'essais à bandes.

Pour mener à bien ce genre de projet, il faut s'équiper de pinces très fines pour manipuler les composants, de la soudure en crème, un fer à souder avec une panne très pointue, une bonne loupe de table et du produit nettoyant pour éliminer les excès de soudure. La crème à souder est déposée à l'avance, ce qui libère une main pendant le soudage pour maintenir le composant en place en appuyant dessus avec une pince fine. On peut utiliser une loupe binoculaire pour le contrôle des soudures et du nettoyage.

Les drivers de leds ont quant à eux quelques exigences particulières. Ces circuits fonctionnant à fréquence relativement élevée, les inductances parasites peuvent s'avérer gênantes. Comme pour n'importe quel

hacheur, il faut veiller à ce que les connexions qui subissent des variations brutales d'intensité soient les plus courtes possibles. Les résistances qui donnent l'image d'une intensité doivent être choisies avec une inductance parasite la plus faible possible. En effet, avec une intensité triangulaire, l'inductance parasite ajoute à la tension de la résistance une constante positive ou négative suivant le sens de variation de l'intensité.

4. UTILISATION DE RÉGULATEURS DE TENSION À DÉCOUPAGE

Les régulateurs de tension à découpage sont des circuits intégrés permettant de réaliser de véritables hacheurs dont la tension de sortie est régulée. On peut les utiliser pour alimenter des leds de puissance, mais aussi comme support d'étude des systèmes bouclés.

Il existe de très nombreux régulateurs à découpage en boîtier DIL, faciles à manipuler. Beaucoup sont très polyvalents et très simples à utiliser comme le MC34063 qui peut fonctionner aussi bien en abaisseur, en élévateur ou en inverseur. La figure 19 montre le principe de la mise en œuvre d'un tel régulateur.

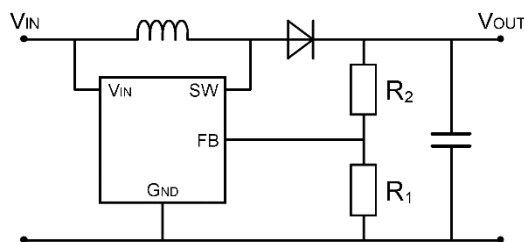


Figure 19 : Principe d'un régulateur de tension à découpage de type élévateur.

Très souvent, l'interrupteur électronique est interne, une de ses bornes étant repérée par SW pour switch. Un condensateur limite les variations de la tension de sortie et un diviseur de tension en donne une image qui est ramenée sur une borne repérée par FB pour feedback. La figure 19 ne représente que le minimum. Suivant les régulateurs, on trouve d'autres composants servant à la stabilité de la régulation, l'éventuelle horloge ou la limitation de l'intensité.

Les moyens de réguler la tension sont extrêmement variés. De la régulation linéaire avec circuit de compensation RC à la régulation en tout ou rien sur la base d'un fonctionnement à fréquence et rapport cyclique constants, on trouve de tout. Il n'est pas question ici de passer en revue toutes les solutions adoptées pour les régulateurs de tension à découpage. Par contre, nous allons nous intéresser à ce que tous ces composants ont en commun : une référence de tension et un comparateur. Comme le montre la figure 20,

l'image de la tension de sortie est comparée à la tension de référence V_{REF} .

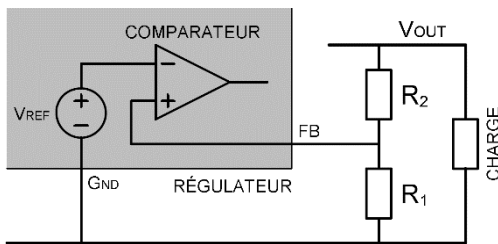


Figure 20 : Partie commune à tous les régulateurs de tension à découpage : la référence de tension et le comparateur à l'intérieur, le diviseur de tension le plus souvent à l'extérieur.

On retrouve là des éléments essentiels d'un système bouclé : la consigne matérialisée par la référence de tension, la chaîne de mesure constituée par le diviseur de tension et enfin le comparateur. Sur ce schéma, il ne manque que la chaîne d'action dont on ne se préoccupera pas du tout. Il suffit de savoir que lorsque le système fonctionne correctement, la tension d'entrée du comparateur, ou erreur, est nulle ou quasiment nulle. Il est même inutile de savoir si le comparateur est un comparateur simple ou à hystérésis ou s'il s'agit d'un soustracteur analogique. On peut alors écrire :

$$V_{REF} = V_{FB} = \frac{R_1 \cdot V_{OUT}}{R_1 + R_2} \quad \text{soit} \quad V_{OUT} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot V_{REF}$$

Ces régulateurs peuvent servir de support pour faire travailler les étudiants sur le « grand principe » des systèmes bouclés :

Quand un système bouclé fonctionne correctement :

- la tension d'entrée du comparateur est nulle
- le système effectue l'inverse de sa chaîne de retour

L'étude de la mise en œuvre d'un régulateur de tension à découpage est donc un bon moyen de faire comprendre aux étudiants ce qu'est un système bouclé, et cela avant même de commencer l'étude approfondie des systèmes linéaires et des correcteurs. A ce stade, on peut faire découvrir que V_{FB} reste égale à V_{REF} quelque soit le coefficient du diviseur de tension. Une fois le principe découvert, on peut demander de dimensionner un diviseur de tension pour obtenir une tension V_{OUT} donnée.

L'alimentation des leds de puissance est un prétexte pour pousser cette étude encore plus loin. Les leds de puissance doivent être alimentées par une source de courant, donc par un système qui régule l'intensité. En l'état, un régulateur de tension ne convient donc pas. Mais si ce dernier régule une tension quand on lui envoie une image de cette tension, pourquoi ne régulerait-il pas une intensité si on lui envoie une image de cette

intensité ? L'application de cette idée conduit au montage de la figure 21.

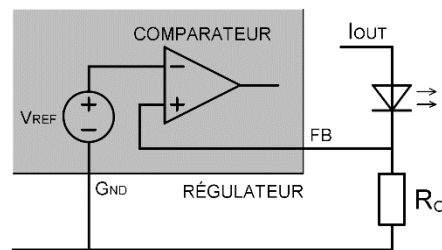


Figure 21 : Régulation de l'intensité d'une led avec un régulateur de tension.

Pour obtenir une image de l'intensité dans la led, il suffit de placer une résistance en série. Et ça marche ! La valeur de l'intensité dépend de V_{REF} et de la résistance :

$$V_{REF} = V_{FB} = R_O \cdot I_{OUT} \quad \text{soit} \quad I_{OUT} = \frac{V_{REF}}{R_O}$$

Cette technique est préconisée par de nombreux fabricants de régulateurs à découpage, par exemple par On Semiconductor pour le MC34063.

Il arrive cependant que la résistance R_O consomme une puissance non négligeable à cause d'une tension de référence trop élevée. Si par exemple $V_{REF} = 2,5 \text{ V}$, la résistance consomme plus de la moitié de la puissance d'une led. Pour remédier à cet inconvénient, on utilise une résistance plus faible et on amplifie sa tension avec un amplificateur non inverseur. Pour une led de puissance, l'économie sur la consommation de la résistance compense très largement la consommation de l'amplificateur opérationnel.

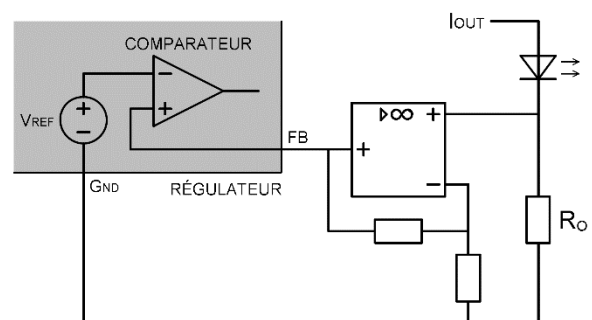


Figure 22 : Diminution de la consommation de la chaîne de mesure avec une résistance plus faible et un amplificateur.



Naissance et vie d'une équipe de recherche en Génie Electrique

Robert PERRET

208 cours de la Libération 38100 Grenoble

Résumé : Ce texte retrace 30 ans d'une équipe de recherche en électronique de puissance au laboratoire d'électrotechnique de Grenoble (LEG). Ecrit à sa manière par le responsable de l'équipe Robert Perret, il ne peut être d'une objectivité totale mais il présente un double intérêt, historique et humain. En effet, il s'agit d'une tranche d'histoire particulièrement active dans le domaine du Génie Electrique. Sur le plan humain, il montre ce que sont la vie et la « politique » dans un laboratoire.

L'Habilitation à Diriger des Recherches est une étape importante dans la carrière des personnels de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. Ce diplôme constitue de fait, une reconnaissance par l'établissement et par l'ensemble de la communauté nationale de la pertinence du projet de recherche proposé par le candidat. La suite logique, surtout dans le domaine des Sciences Appliquées, est la mise en place d'un groupe ou d'une équipe de recherche, suivant l'organisation du laboratoire d'appartenance ; en effet, l'un des objectifs principaux des laboratoires en Sciences Appliquées est de faire progresser les méthodes et les innovations techniques et de former des Docteurs-Ingénieurs capables de les faire émerger dans l'Industrie. Cette démarche impose donc le recrutement d'un nombre suffisant de doctorants et des collaborations bien calibrées avec les partenaires industriels.

Pour illustrer cette situation, je vais prendre comme exemple ma propre expérience, dont le début date de 30 ans; cette aventure implique, bien évidemment de nombreux collègues et amis qui, je l'espère ne seront pas vexés de voir apparaître leur nom au détour d'une phrase. Ce document n'a surtout pas l'ambition de présenter un modèle, mais veut simplement illustrer les aléas inévitables rencontrés dans un tel exercice.

Les débuts : l'enthousiasme

En 1974, je venais de terminer ma thèse d'état dans l'Equipe « Machines » du LEG sous la Direction de Michel Poloujadoff. Je me suis donné l'année 1975 pour réorienter ma recherche. Enthousiasmé par un Séminaire d'une semaine organisé à Toulouse par les copains du LEEI (merci Henri Foch, Bernard Trannoy, Bernard de

Fornel, Michel Lajoie-Mazenc...) sur l'Electronique de Puissance et l'Association Convertisseurs-Machines, j'essayais de trouver une voie dans ces disciplines, non traitées par le laboratoire ; j'ai aussi fait la connaissance de J.M. Peter (SESCOSEM – ST). N'ayant officiellement pas un « franc » et la mutualisation n'existant pas, je pris donc ma voiture pour aller lui rendre visite à Aix en Provence. J'ai découvert les premiers bipolaires de puissance et en ai ramené une vingtaine, un peu défectueux mais combien utiles.

Début 1976, J. Pérard et D. Roye ont sauté le pas et c'est ainsi qu'un Conseil de Laboratoire du mois d'Avril a créé l'Equipe Electronique de Puissance du LEG composée de 3 Maîtres de Conférence et 1 Doctorant.

Le programme de l'équipe était clair, mais certainement pas affiché en ces termes à l'époque. En effet, il s'agissait pour nous :

- de créer une nouvelle équipe capable sur une décennie de rivaliser avec les trois équipes du Laboratoire, en termes de contrats et de publication : Modélisation, Machines et Matériaux Magnétiques.

- de concurrencer les Toulousains en choisissant trois axes d'attaque : les transistors, au lieu des thyristors, la commande numérique avec les premiers microprocesseurs (D. Roye) et le rapprochement avec l'automatique grâce aux conseils avisés de M. Nougaret qui intégrait partiellement l'équipe en 77.

On arrivait ainsi à notre première thèse sur les hacheurs à transistors entrelacés (M. Rostaing-Puissant 1977 - n° 62¹). Puis en 78 et 79 les thèses illustrant bien notre démarche : E. Toutain sur le « hacheur Toutain » aussi appelé Cuk mais aussi sur le modèle moyen (1978 - n° 66) - A. Jakubowicz (78 n° 70) sur la première

¹ Les numéros indiqués à la suite des thèses font référence au Livre des Thèses du LEG



machine synchrone autopilotée qui démarrait « lancée au pied par M. Schneider (Ingénieur LEG) et votre serviteur » et enfin R. Feuillet sur la première commande par microprocesseur (1979 n° 74).

En 1980, H. Le Huy (1980 n° 80) réalisait la première machine synchrone autopilotée à commande numérique au niveau français et nous donnait les premières publications IEEE/IAS qui obtint un premier prix.

Durant cette époque, nous fonctionnions en collégialité totale : chaque permanent intervenait avec chaque thésard au bon moment et les profits étaient scrupuleusement partagés. Parmi ces 5 premiers thésards, 4 sont restés dans le système Enseignement Supérieur : E. Toutain MC (Maître de Conférences) à l'ENSIEG, R. Feuillet MC puis professeur à l'ENSIEG, A. Jakubowicz Prag à l'IUT de Grenoble puis MC à Annecy et enfin H. Le Huy Professeur à l'Université de Trois Rivières puis, après promotion, Professeur à l'Université Laval à Québec.

Petit à petit les trois fondateurs se sont spécialisés, D. Roye sur la commande, J. Pérard sur les structures et moi sur le reste. Trois thèses sont soutenues durant cette période.

Début 1981, je suis nommé Directeur du Laboratoire et Jacques Pérard prend la direction de l'équipe.

De 1982 à 1984, le nombre de thèses s'amplifie ; on note en particulier la thèse de E. Olivier (Rulière) (1982 n° 104) sur un onduleur MLI et les premiers Mosfet et le doctorat d'état de D. Roye (1983 n° 114) sur la modélisation et l'instrumentation pour la thermique des machines à induction ; il sera nommé PR à l'ENSIEG, 3 ans plus tard. En ne citant que les futurs permanents on trouve encore : G. Champenois (1984 n° 115) sur un asservissement extrémal pour éolienne et J-P. Ferrieux (1984 n° 116) sur la modélisation dynamique des convertisseurs à résonance et des alimentations à découpage.

En 1983, J. Pérard nommé Chef de Département à l'IUT a laissé la responsabilité de l'Equipe à D. Roye. On a recruté E. Rulière (MC, ENSIEG), G. Champenois (Prag IUT), J-P. Ferrieux (MC IUT) et enregistré le retour de R. Feuillet. L'équipe a été rejointe par C. Masselot (Prof. ENSIEG - Electronique), J-P. Keradec (MC IUT - Métrologie), R. Pacaud (MC ENSIEG - Machines) et par J-P. Rognon (Prag ENSIEG - commande).

En 1986, J. Pérard, à la fin de son mandat à l'IUT, redevenait opérationnel au Laboratoire. Pour mieux relancer les sujets, on a décidé de scinder l'équipe :

- Equipe « Electronique de Puissance » sous la responsabilité de J. Pérard avec J-P. Keradec ;

- J-P. Ferrieux, R. Feuillet, C. Masselot et E. Toutain (à nouveau reparti pour le Maroc) ;

- Equipe « Commande » sous la responsabilité de D. Roye avec G. Champenois, R. Pacaut, R. Perret, J-P. Rognon et E. Rulière.

L'équipe Commande s'est spécialisée sur les associations convertisseurs/machines et sur la commande numérique. L'équipe Electronique de Puissance s'est consacrée à l'étude des convertisseurs, en s'intéressant aux mécanismes de commutation, à l'introduction des nouveaux composants (MOSFET, IGBT, GTO ...), à la commande rapprochée et aux outils de modélisation. Elle se donnait 4 ou 5 ans pour affiner ses axes de recherche.

A cette époque, il existait un GdR Electrotechnique (GRECO) dirigé par B. Trannoy (LEEI) puis C. Sol (LESIR). Dans un premier temps, je coordonnais l'axe « Pertes et Echauffements » dans lequel je revendais inlassablement le logiciel Modtherm de Daniel Roye. Il y avait aussi les travaux de E. Rulière, S. Bahbouth et N. Ben Nasr qui, pour évaluer le surcoût en pertes dues aux harmoniques générés par l'onduleur, essayaient des méthodes inverses à partir de mesures d'échauffements.

En 1986, un axe Electronique de Puissance ayant été créé, J. Pérard a participé au GRECO et a commencé une bonne collaboration avec H. Foch (LEEI) et Ph. Leturcq (LAAS). Bien qu'officiellement dans l'équipe Commande, je participai activement aux tractations avec le LEEI pour créer un logiciel de simulation en électronique de puissance (EP) qui serait un peu l'équivalent de Flux. Aiguillonnés par J-C. Sabonnadière, on a essayé en vain d'obtenir un accord ; on décida alors de lancer un nouveau logiciel à partir du produit toulousain disponible dans le Greco. C'étaient les prémices de CIRCUIT que E. Euxibie a mis sur rails dans son DEA au sein de l'équipe Modélisation (1984). R. Feuillet s'est chargé du développement de CIRCUIT en collaboration avec la société Cedrat. C'était aussi le début d'une période de froid avec le LEEI.

Les périodes difficiles : il faut se battre

Les années 1985, 1986 et 1987 ont été plutôt creuses pour l'équipe qui avait surtout recruté des thésards pour la partie Commande. Dès 1986, l'équipe a relancé les sujets et recruté des DEA puis des thésards mais ce n'est qu'en 89 que les premières thèses furent soutenues dont celle de M. Brunello (1989 n° 179) qui traite de la résonance dans les UPS.

De 1983 à 1990, j'ai eu la chance d'être élu SGEN/CFDT au Comité National du CNRS. Avec Max Marty du LEEI et de l'INP de Toulouse et BU AI du LGET, nous avons pu présenter aux Directeurs

Scientifiques du SPI (M.Combarous et J.C. Charpentier) une bonne image du Génie Electrique et obtenir la plupart des postes CNRS de notre discipline. Le LEG n'a pas été oublié et a récupéré 6 ou 7 postes. Malheureusement, je n'ai jamais pu trouver les arguments pour qu'un de ces postes soit en EP ; cependant, cinq nouveaux chercheurs sont venus renforcer l'EP (LAAS, LEEI, CEGELY) qui ne comptait auparavant que 2 représentants chercheurs au LAAS.

En 1990, au mois de Janvier, un Comité d'Evaluation devait examiner les travaux du LEG et nommer le nouveau Directeur présumé : J-C.Sabonnadière. On voulait profiter de ce Comité (avec J.Pérard) pour présenter nos idées sur l'évolution des thèmes de l'équipe.

On a proposé :

- d'approfondir l'étude fine des commutations notamment sur les nouveaux composants IGBT (J.Pérard, J-P. Ferrieux)
- de poursuivre le développement du logiciel de simulation CIRCUIT (R. Feuillet)
- d'étudier les interférences avec le réseau (harmoniques...) (R. Feuillet)
- de se rapprocher du composant silicium en l'abordant par l'extérieur avec des études sur la connectique, la thermique et la tenue en tension (J.Pérard, R. Perret) :
- de mettre en place une métrologie et des appareils adaptés aux mesures en EP (J-P. Kéradec).

On n'a pas été compris par le Comité qui n'a pas jugé notre projet pertinent, ce qui a entraîné la démission de J.Pérard. Ce jugement du Comité a été très mal reçu par l'équipe qui a décidé de développer tout de même ce programme. Après concertation avec l'équipe Commande, on a réorganisé les deux équipes de la manière suivante :

- Electronique de Puissance : R. Perret, J-P. Ferrieux, J-P. Keradec, R. Feuillet et L. Pierrat (ce dernier venait d'obtenir un poste de Directeur de Recherche associé au CNRS).
- Commande : D. Roye, J-P. Rognon, G. Champenois, E. Rullière, R. Pacaut.

Donc en Avril 90, soit 14 ans après la création de l'équipe et 24 thèses auxquelles il faut ajouter celles (une dizaine) de la période 86/89 initiées dans l'équipe d'origine et soutenues sous la bannière de l'équipe Commande, on se retrouve donc avec 2 équipes s'appuyant sur 4 permanents HdR : R. Perret, D. Roye rejoins par J-P. Rognon (HdR 88) et J-P. Ferrieux (HdR 89). C. Masselot, devenu Directeur de l'ENSIEG n'apparaît plus dans l'encadrement de recherche.

Cette année 90 constitue un nouveau point de départ pour les deux équipes qui suivent des itinéraires indépendants mais coordonnés. Elles sont toutes les deux encore fragiles surtout en termes d'encadrants HdR disponibles (je vais très vite redevenir le Directeur « interne » du LEG dès la nomination en automne 90 de J-C. Sabonnadière au Ministère, D. Roye et J-P. Rognon sont très lourdement chargés en enseignement). Mais, du côté EP sur lequel je vais me consacrer, on avait de très bons thésards qui ont permis un bon fonctionnement de l'équipe : J. Roudet (1990 n° 203) propose un large tour d'horizon parmi les composants, les cellules de commutation et la CEM. Sa thèse correspond à un contrat EdF. J. Roudet et M. Brunello font maintenant partie des permanents de l'équipe, ce dernier pour faire de la thermique en EP mais qui ira surtout épauler J.P. Ferrieux sur l'aspect Structures.

A partir de 1991, on assiste à un renforcement important et continu de l'équipe qui enregistre recrutements et promotions de ses permanents. Cette année là, R. Feuillet vient renforcer le groupe des HdR de l'équipe sur le thème de la modélisation en EP et J. Roudet devient MC à l'IUFM.

Deux thèses encore en 92, dont celle de Ch.Schaeffer (n° 224) sur l'IGBT et son comportement thermique (direction de J-P. Ferrieux). Cette année, on enregistre la promotion de J.P. Ferrieux sur un poste PR à l'IUT et sa prise en responsabilité de la salle CEDMS.

En 1993, la politique de recrutement renforcée de thésards commence à donner des résultats puisqu'on compte 4 thèses et 1 mémoire CNAM. S. Bacha (n° 241, directeurs R.Perret et M. Brunello) propose une nouvelle méthode de modélisation et de commande pour l'EP.

Durant les années 1990-1992, l'équipe était en reconstruction ; j'étais le chef d'équipe mais mon engagement auprès de J-C. Sabonnadière à la direction du Laboratoire ne me laissait que peu de temps et je n'ai donc pas réellement encadré de thèses. Cependant j'ai pu travailler pour l'équipe à l'extérieur. J-C. Sabonnadière m'encourageait à attaquer le Silicium ; il m'a fortement aidé dans ma démarche vers le Composant. Le ministère m'a chargé d'une enquête sur le rôle stratégique des CEP de grande puissance. J'ai effectué des missions en Angleterre (Gec Plessey), en Suède (ABB), au Japon (Hitachi et Mitsubischi) et aux USA (Virginia Tech) en 90/91 lorsque l'on a commencé à parler d'IGBT en remplacement des GTO.

Dans cette démarche, j'ai fait la connaissance de P. Rossetti, Ph. Leturcq, P. Rossel, M.Pascal, J.B. Quoirin, A. Lhorte, A. Julien et R. Périot et toujours avec l'aide de J-C. Sabonnadière, on a initié le GIRCEP présidé par



P. Merle (il nous apportait un côté plus électronique). J'ai aussi fait participer mes copains J-P. Chante, D. Lafore et Ch. Sol mais je n'ai pas su convaincre le LEEI.

En 1991, je me retrouvai propulsé vers la direction du GdR Electrotechnique (succession de Ch. Sol). J'avais pour ambition d'introduire un thème EP dirigé par H. Foch et Ph. Leturcq. Cela n'a pas pu se faire et le financement important du GIRCEP (2 MF/an) m'a poussé à créer le GdR CEP en 1992. J'ai reçu l'aide de J-J. Gagnepain (CNRS/SPI) et commencé à travailler sur un programme CEP en m'efforçant de prévoir une place pour l'équipe qui, en 1991, n'était pas très armée dans ce thème.

On se retrouve tout de même :

- dans le thème métrologie codirigé par D. Lafore et par J-P. Kéradec ;

- dans le thème « pertes et échauffements » dirigé par Ph. Leturcq avec la thèse de Ch. Schaeffer et les modélisations sous Flux Therm de E. Clavel dans son DEA ;

- on est absent des deux autres thèmes (SiC dirigé par J-P. Chante et Technologie Si dirigé par P. Rossel).

En 1993, profitant de ma situation de chargé de missions « Microélectronique et Génie Electrique » de l'INPG et avec l'aide de J-J. Gagnepain et de J-C. Girardet, j'ai pu démarrer la Fédération Eléa. L'objectif était simple et ambitieux : devenir le LAAS dauphinois. En ce qui concerne l'équipe, je misais sur un rapprochement avec le LPCS, le LEMO et le CIME pour proposer une équipe capable de dialoguer avec le LETI, le CNET et ST Crolles. Dans cette aventure, je m'appuyais sur G. Kamarinos et S. Cristoloveanu (LPCS) et essayais d'introduire J-P. Ferrieux. La Fédération Eléa a été créée en 94 et j'en ai assuré la direction jusqu'en 1998. Pendant ce temps, l'équipe a continué à se renforcer.

En 1993, deux maîtres de conférences de l'équipe sont recrutés, Ch. Schaeffer à l'ENSIEG qui reste en EP et S. Bacha à l'IUT qui rejoint l'équipe Commande. Un partage des tâches est bien défini avec cette équipe : à nous la commande proche et à S. Bacha et D. Roye la commande éloignée.

En 1994, J-L. Schanen (n° 262, Directeur J. Roudet) apporte une nouvelle contribution en CEM et présente INCA. Cette année 94 voit aussi J. Roudet soutenir son HdR sur l'intégration des aspects CEM dans la conception EP. C'est le 4ème HdR de l'équipe qui en même temps perd R. Feuillet qui va renforcer l'équipe Réseaux ; J-L. Schanen est recruté sur un poste de MC à l'IUT.

A côté de l'effort de recherche, j'ai aussi tenté d'augmenter le poids de l'EP en enseignement ; en particulier en 1993, nous avons démarré l'Option EPTE qui sera dirigée par E. Rullière et qui fournira de nombreux thésards à l'équipe jusqu'à aujourd'hui. De son côté, J. Roudet renforçait la préparation au CAPET Génie Electrique à l'IUFM et recrutait des candidats motivés.

En 1995 et 1996, la série de 4 à 5 thèses par an s'est poursuivie : F. Mérianne (n° 295 Directeur J. Roudet) aborde en 96 le problème de l'interaction commande/puissance ; S. Raél (n° 302 Directeur Ch. Schaeffer) amène les bases théoriques de la thermique des modules et E. Clavel (n° 321 Directeur J. Roudet) poursuit l'étude d'outils pour la connectique et conforte INCA. Il faut noter, pour l'activité Thermique l'aide importante amenée par A. Bricard du CEA/Gréth dirigé à l'époque par R. Vidil; je les remercie tous les deux et aussi B. Mallet, omniprésent lors des réalisations expérimentales. Les thèses de S. Raél et E. Clavel étaient supportées par le contrat ONIX (Alstom/Villeurbanne). ***C'est le contrat le plus important jamais obtenu par l'équipe et qui récompensait notre approche thermique et connectique des modules.***

Il faut noter pour cette année 1996, l'HdR de J-P. Kéradec qui porte à nouveau à 4 notre potentiel d'encadrement ; il est le seul HdR non Docteur de l'équipe (hormis les 3 fondateurs). L. Pierrat arrive à la fin de son poste DR CNRS/Valorisation et quitte l'équipe.

Fin 1996, l'équipe compte donc 7 permanents : M. Brunello, J-P. Ferrieux, J-P. Kéradec, R. Perret, J. Roudet, Ch. Schaeffer, J-L. Schanen et sera renforcée en 97 par le recrutement de E. Clavel sur un poste MC de l'IUT dans le thème CEM. ***On n'arrive pourtant pas à forcer la porte du CNRS, test que je jugeais essentiel pour la reconnaissance de l'équipe.***

De façon naturelle, l'équipe s'était organisée en 4 axes :

- la thermique : Ch. Schaeffer
- la connectique et la CEM : J. Roudet, J-L. Schanen
- la métrologie et les passifs : J-P. Kéradec
- les convertisseurs : J-P. Ferrieux, M. Brunello

Pour ma part, je continuais mes activités extérieures à côté de la « Direction exécutive » du LEG, la Direction du GdR CEP 1992 à 1996 et la Direction de la Fédération Eléa 94 à 98. Ces deux dernières activités permettaient d'injecter des crédits sur des actions difficiles à rentabiliser (la métrologie, la modélisation thermique) ; la Fédération Eléa initialisait un rapprochement avec le LPCS (J. Boussey), le CIME et le LETI qui débouchera quelques années plus tard, après



un stage d'un an de Ch. Schaeffer au LETI, sur sa nomination à la Direction du CIME.

L'équipe enregistre à cette époque de nombreux contrats avec Alstom, PSA, Microspire. Elle devient le plus « gros financier » du LEG et rembourse en quelque sorte les « avances de trésorerie » faites durant ses premières années d'existence par les autres équipes.

Cinq nouvelles thèses sont soutenues en 97. Y. Lembeye (n° 324) apporte la dernière touche à la métrologie en EP (sous la direction de J-P. Kéradec) et affine notre modèle d'IGBT ; recruté PRAG deux ans plus tôt à l'IUT de l'Isle d'Abeau, il a poursuivi sa thèse et sera récompensé quelques années plus tard par une transformation de poste en MC à l'IUT de Grenoble. Thuy Ngo Le (n° 345 Direction Ch. Schaeffer) présente la première thèse du LEG sur un composant Silicium. Elle étudie la tenue en tension d'une diode conçue et réalisée au CIME avec l'aide de J. Arnould. **C'est la première fois que l'équipe ose « entrer » dans le composant** Une autre bonne nouvelle avec la promotion de J. Roudet sur un poste de PR à l'UJF (Université Joseph Fourier).

Encore 5 thèses en 98. On enregistre avec plaisir la promotion de J.P. Kéradec sur un poste de PR à l'IUT. Cette année marque aussi la fin de la Direction du LEG par J-C. Sabonnadière et mon « déclassement » en n° 3 du Laboratoire (Responsable Financier) dans l'équipe de Direction J.P. Rognon / G. Meunier.

L'année 99 constitue un record pour l'équipe qui va faire soutenir 6 thèses, notamment L. Aubard (n° 369 Directeurs J-P. Ferrieux, Ch. Schaeffer) qui renforce les compétences de l'équipe dans la modélisation des MOS de puissance ; J-C. Crébier (n° 370 Directeurs J-P. Ferrieux, M. Brunello) approfondit l'étude des perturbations conduites dans les redresseurs commandés.

Cette année 99 est aussi celle de l'HdR de Ch. Schaeffer qui devient ainsi le 5^e permanent habilité de l'équipe et du recrutement de L. Aubard sur un poste Prag de l'ENSERG.

Toujours fin des années 90, commençaient des actions de recherche sur l'Energie ; avec J-C. Sabonnadière, devenu Vice Président de l'INPG, nous avons travaillé pour faire entrer le Génie Electrique dans le programme Energie du CNRS. Je suis parvenu à monter une opération EP Haute Tension où on a pu, pendant un an ou deux, collaborer avec le LEEI (P. Ladoux / J-L. Schanen). Ceci s'est terminé fin 2002 lorsque Y. Brunet a pris le relais de J-C. Sabonnadière et choisi d'autres orientations.

Heureusement pendant ces années, le travail de base s'est poursuivi avec son lot de thèses et HdR. Dès 2000, J. Roudet est devenu le Directeur adjoint de l'équipe et petit à petit a pris en charge la démarche scientifique. C'est lui qui présentera en 2002 lors du Comité d'Evaluation le projet 03/06 de l'équipe. Cette année là, la 6^{ème} HdR de l'équipe était soutenue par J-L. Schanen à l'UJF.

On arrive à l'an 2000 ; l'équipe est composée de 4 Professeurs (R. Perret, J-P. Ferrieux, J. Roudet, J-P. Kéradec), 1 Maître de Conférences habilité (Ch. Schaeffer), 4 Maîtres de Conférences (M. Brunello qui quittera l'équipe en 2002, E. Toutain de retour à la recherche, J-L. Schanen, E. Clavel) et 2 Prag (Y. Lembeye et L. Aubard) et 2 Ingénieurs de recherche (J. Barbaroux et S. Catellani) qui travaillent à temps partiel pour l'équipe. J. Barbaroux se spécialise sur les structures et participe à des conseils aux entreprises alors que S. Catellani assure le lien avec la plateforme EPTE et développe des actions de mesure (tenue en tension, fiabilité...).

Au niveau national, j'étais toujours membre du bureau du GdR IEP dirigé par Ph. Leturcq (LAAS) (96/99) et j'ai introduit Ch. Schaeffer pour assurer la succession (96/99) dans le 3^{ème} GdR dirigé par J-L. Sanchez (LAAS).

La Fédération Elésa, maintenant dirigée par J.M. Dion (98/01) se voit confrontée par la volonté du CNRS à la « concurrence » avec la future Fédération FMNT. La fin de l'activité recherche du CNET de Meylan précipite le déclin du rapprochement microélectronique/électronique de puissance dans cette Fédération.

Cependant le stage de Ch. Schaeffer au LETI, l'apparition de l'association Alternative SiC à laquelle je participais (membre du bureau) laissaient encore espérer qu'un axe de recherche était possible en collaboration puissance-microélectronique. Pendant 4 ans, j'ai été nommé expert par le Ministère de l'Industrie pour suivre les contrats financés par ce ministère entre STM Tours et les laboratoires (STSI). J'ai pu lier des relations intéressantes avec J-B. Quoirin, R. Pezzani, A. Lhorte et faire participer le LEG à ce programme (financement des thèses de M. Coyaud et G. Verneau).

La maturité : tout va bien

Fin 2000, après 5 échecs consécutifs de nos candidats au CNRS, on n'avait toujours pas gagné le pari d'obtenir un poste de chercheur temps plein et toutes les informations provenant du Comité National montraient que nos programmes sur les composants n'étaient pas compris. Avec l'aide de J.J. Gagnepain,



Directeur Scientifique du SPI, j'obtenais enfin satisfaction avec un poste affiché sur notre thématique au sein du LEG. C'est ainsi qu'on a eu le plaisir de voir J-Ch. Crébier recruté au CNRS au printemps 2001.

Nouveau record de thèses en 2001 avec 8 soutenances. La première (et ma préférée, car il s'agit de ma fille Corinne !) est celle de C. Perret (n° 405 Directeurs Ch. Schaeffer et J. Boussey) qui porte sur un refroidisseur directement gravé dans le Silicium et réalisé au CIME en collaboration avec le LAAS au sein du GdR. P.O. Jeannin (n° 407 Directeur J-L. Schanen), dans le cadre d'un contrat européen HIPO avec Alstom, étudie finement le comportement des associations série/parallèle des MOS. J-M. Guichon (n° 421 Directeurs J. Roudet et E. Clavel) expose une démarche permettant la modélisation et le dimensionnement des jeux de barres. Y. Avenas (n° 442 Directeur Ch. Schaeffer) conçoit et réalise des microcaloducs plats très performants pour l'EP. Une bonne nouvelle : la promotion de Ch. Schaeffer sur un poste PR de l'ENSIEG.

Depuis quelques années, on pouvait affirmer que les objectifs fixés au départ de l'équipe étaient remplis au niveau du LEG. Nous étions devenus l'équipe qui produisait le plus grand nombre de thésards et qui amenait le plus de contrats.

Nous étions aussi l'équipe qui comptait le plus grand nombre de permanents : 5 Professeurs (R. Perret, J-P. Ferrieux, J. Roudet, J-P. Keradec, Ch. Schaeffer), 4 Maîtres de conférences (E. Toutain, J-L. Schanen (HdR), E. Clavel, Y. Lembeye) et 3 Prag (L. Aubard, P-O. Jeannin recruté en 2001 et Y. Avenas recruté en 2002).

La fatigue puis la relance

Le début des années 2000 correspond aussi à une forte charge de travail pour les permanents de l'équipe, J-P. Ferrieux est chef de Département à l'IUT, J. Roudet monte une grosse opération d'enseignement à l'UJF (maîtrise, IUP, Masters...) et Ch. Schaeffer après son stage au LETI devient Directeur du CIME. Fort heureusement les autres permanents et la capacité de travail des premiers cités, nous permettent de passer cette période difficile, avec cependant quelques petits problèmes d'encadrement vite réparés. Merci à tous.

Malgré ses charges en enseignement et sa nomination à la VP Recherche de l'UJF, J. Roudet formalise l'évolution des projets de l'équipe pour le

quadriennal (2003/2006) qui verra l'arrivée de Y. Brunet et de J-P. Ferrieux à la tête du LEG.

Cette grande activité doublée d'un engagement contractuel important conduit à une surcharge de travail peu favorable à une vie harmonieuse de l'équipe et à son positionnement aux niveaux national et international. Le GdR et la Fédération Eléa ne donnent pratiquement plus de retombées au LEG

Il en va de même pour le programme Energie et pour Alternative SiC où l'on s'essouffle. Pour maintenir notre présence au CNRS, on monte encore deux Actions Spécifiques : l'AS Energie Portable (merci J-M. Dion) et l'AS Mécanismes de défaillances (merci Y. Danto). Merci AUSSI à D. Frey et S. Catellani qui m'ont apporté « les biscuits nécessaires » pour justifier notre présence et notre dotation. Cette dernière opération qui s'est achevée en 2003 a été poursuivie en 2004 et 2005 par J. Roudet au sein de la Fédération Eléa en collaboration avec le L3S puis le LEMD.

Le dernier quadriennal (03/06) de ces trente glorieuses va encore voir la soutenance de 4 ou 5 thèses par an. Bravo à JL Schanen pour sa promotion PR à l'ENSEIG. Cette année correspond aussi au recrutement de J.M.Guichon sur un poste MC à l'IUT de L'Isle d'Abeau

Trois thèses en 2004, dont celle de H. Chazal (n° 472) Directeur J Roudet) qui étudie les applications des nouveaux matériaux magnétiques nanocristallins dans une collaboration avec Imphy (Th.Waacklerlé) et le laboratoire Louis Néel ; il sera nommé MC à l'ENSEIG en 2005.

2005 est une année productive avec 8 Thèses. Fin 2005, nous avons déploré la disparition accidentelle de J. Arnould² qui nous a énormément et bénévolement aidé à développer notre recherche dans le domaine du Silicium.

On achève, début 2006, la trentième année. Trois thèses sont programmées et c'est N. Popova qui aura l'honneur, le 13 octobre de soutenir la centième thèse de l'équipe sur un microcaloduc original (encadrement Y. Avenas et C. Schaeffer).

Fin 2004, J. Roudet a pris officiellement ma succession à la tête de l'équipe, après 14 ans de règne du mandarin que je fus. Début 2006, je suis très content de voir J. Roudet être élu à la Direction du LEG, ce qui va entraîner son remplacement à la tête de l'équipe par J.P.Ferrieux en janvier 2007.

² Voir Revue 3EI n°44, mars 2006, « Au revoir Jacques », page 3.



L'international

Le niveau international n'a jamais été notre point fort. Toutefois une piste intéressante est dégagée par J-L. Schanen qui petit à petit monte dans la hiérarchie de IEEE. J'espère qu'il va continuer pour donner enfin à l'équipe le rayonnement international qui lui manque. Les autres opérations sont plus ponctuelles : Ch. Schaeffer a poursuivi l'action qu'on avait initiée avec Ch. Masselot à Sofia. Elle lui a permis l'embauche de doctorants dans ses thèmes de recherche et d'inviter deux collègues sur des postes Past : V. Lazarov (00-02) et S. Tzanova (03/06).

La collaboration avec la Syrie initiée avec H. Oirkozek n'a donné lieu qu'au recrutement de deux doctorants. Les relations avec Virginia Tec, bien relancées par le séjour en Virginie de J. Roudet (1995), le stage d'un doctorant dans l'équipe et la participation de F. Lee aux jurys de la thèse de E. Clavel et de l'HDR de J.P. Kéradec (1996) se sont malheureusement arrêtées en 2000 après le stage de J-C. Crébier et le DEA de R. Caire.

Conclusion

Voilà donc résumées, à ma manière, 30 années de vie d'une équipe qui m'a apporté beaucoup de satisfactions, car elle a grandi en harmonie avec le LEG, en participant de manière importante au financement mutuel et au recrutement de permanents (22, toutes catégories confondues, certes en majorité pour l'équipe mais aussi pour le reste du Laboratoire).

Je suis particulièrement fier de notre bilan – 100 docteurs – dont la moitié est restée dans la recherche universitaire et, en août 2006, j'ai pu prendre ma retraite de manière sereine.

Je vois déjà les tutelles décrier le manque de mobilité, le recrutement exclusivement consanguin, etc... En effet, à part J-P. Kéradec et votre serviteur, tous les permanents sont des docteurs de l'équipe. Il y avait aussi Jacques Pérard qui nous a malheureusement quittés 2 ans après son départ à la retraite ; je lui dois beaucoup et, je pense, l'équipe aussi.

Pour répondre à ces éventuelles critiques, je ne peux que dire : « Alignez votre bilan et après on pourra discuter ! ».

Je crois réellement que l'équipe est au top niveau français et certainement au-delà, si elle fait l'effort de s'ouvrir davantage à l'international. J'en veux pour preuve la petite phrase du Comité d'Evaluation de Janvier 2006 « Quoi qu'il en soit, (l'équipe) développe une activité de recherche d'excellence, qui en fait l'un des pivots du domaine à l'échelle nationale et qui lui vaut une reconnaissance internationale méritée »

Cette histoire, ainsi racontée, est peut-être trop personnalisée (je vous laisse juge) ; j'espère qu'elle met

en évidence l'importance des relations humaines, des recherches de complémentarités et d'ouvertures dans les groupements. Elle met aussi en évidence le délicat problème du recrutement des permanents, du reclassement des anciens chefs, de la place à laisser aux jeunes...

Je remercie les 120 ou 130 personnes qui ont construit l'équipe et plus particulièrement les permanents avec un bonus à deux d'entre eux : Jean-Paul Ferrieux qui a été la cheville ouvrière de l'équipe surtout dans les années difficiles 85/95 et qui est toujours un des meilleurs spécialistes français des Convertisseurs et James Roudet qui dirige scientifiquement l'équipe depuis 2002, qui a œuvré pour faire reconnaître notre discipline, pour trouver de nombreux étudiants, qui a assuré les recrutements récents du LEG et qui est, depuis Janvier 2007, le nouveau Directeur du Laboratoire.

Je souhaite à tous mes jeunes collègues du Génie Electrique qui ont eu la volonté d'être HDR autant de joie professionnelle que celle que j'ai connue dans cette équipe de Grenoble et au sein de notre communauté. Notre discipline est minoritaire dans les différents Conseils qui nous évaluent : ce n'est qu'en présentant des programmes bien étayés dans des laboratoires et des groupements bien structurés qu'on arrivera à maintenir, voire à améliorer l'image de notre discipline. Je souhaite donc beaucoup de succès au Génie Electrique et en particulier au G2ELab qui a remplacé le LEG dès le début 2007.

CONCOURS DE
PERFORMANCES EN
VÉLOS
ÉLECTRIQUES
FÊTE DU VÉLO
PARIS
6-7 JUIN 2009

Association
meet

MAÎTRISE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE POUR LES TRANSPORTS

ValoTec

<http://www.association-meet.ens-cachan.fr>

association-meet@listes.ens-cachan.fr

ENS
C A C H A N

MAIRIE DE PARIS



SATIE

EEA

Vers des aéronefs encore plus électriques

Towards even more
electrical aircraft

28 -29 Janvier 2009

**Centre de Congrès Pierre Baudis
Toulouse**

Organisé par :



Avec la participation de :



Et le soutien de :



Site web : <http://www.see-125.eu/index.php?id=513>