

La Revue SEE



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



*Gisements
d'économies
d'énergie*

Publication trimestrielle du Cercle Thématique 13.01 de la SEE
ENSEIGNER L'ÉLECTROTECHNIQUE ET L'ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE



*Société de l'Électricité, de l'Électronique
et des Technologies de l'Information
et de la Communication*

N°51 Décembre 2007



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

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

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

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

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

<p>La Revue 3EI, Édition SEE, 17 rue Hamelin 75 783 PARIS CEDEX 16</p> <p>Directeur de la publication Alain BRAVO Président de la SEE</p> <p>Rédacteur en Chef François BOUCHER</p> <p>Adresser les propositions d'article à F. Boucher : revue3ei.art@voila.fr</p> <p>Communication Micheline BERTAUX communication@see.asso.fr</p> <p>Publicité en Régie TRENDICE CONSEIL</p> <p>Philippe MINGORI 01 45 74 96 47</p> <p>Martine FERRON 01 45 74 96 48</p> <p>Abonnement (4 numéros par an) déc. 2007, mars, juin, sept. 2008. tarifs TTC : <u>Individuel</u> : France et CEE.....36 € Pays hors CEE.....46 € <u>Collectivités</u> France et CEE.....52 € Pays hors CEE.....65 €</p> <p>Réalisation et impression Repro-Systèmes 23, rue de Verdun 77 181 Le Pin</p> <p>Routage et Expédition Départ Presse ZI les Richardets 93 966 Noisy le Grand</p> <p>Dépôt Légal : Décembre 2007 Commission Paritaire 1207 G 78028 ISSN 1252-770X</p>	<p style="text-align: right;">Sommaire du n°51</p> <p style="text-align: center;">Thème : Gisements d'économies d'énergie</p> <p>p. 2 Éditorial,</p> <p>p. 3 Publications, Informations,</p> <p>p. 4 Une nouvelle révolution industrielle en Europe A. Brugier Lycée Clément Ader Athis mons</p> <p>p. 14 Les nouvelles technologies au service des systèmes d'éclairage urbain G. Zisis R. Ruscassie N. Pigenet Université de Toulouse P. Sajous</p> <p>p. 23 Gestion de l'énergie en traction ferroviaire G. Arnautou SNCF R. Dardevet lycée Emmanuel Héré Nancy M-M Le Bihan Lycée Jules Ferry Versailles</p> <p style="text-align: center;">Hors thème</p> <p>p. 30 Influence de la température sur l'évolution du déséquilibre de tension pour un module de supercondensateurs 56V / 96 F N. Rizoug P. Bartholomeüs P. Le moigne Ecole centrale de Lille</p> <p>p. 37 Caractérisation d'un accumulateur plomb acide E. Odic C. Esteban P. Vidal J. Robert Supélec</p> <p>p. 45 Commande d'une pompe par un générateur photovoltaïque A. Arzandé T. Eon F. Escourou Supélec</p> <p>p. 51 L'installation électrique de notre établissement scolaire D. Bethencourt Lycée Lazare Carnot Arras</p> <p>p. 55 Energie thermique et électricité V. Fichet Lycée Jules Fil Carcassonne</p> <p style="text-align: center;">Sciences appliquées</p> <p>p. 58 Calcul du couple par la méthode de la variation de la coénergie D. Derks Université de Valenciennes F. Gillon P. Brochet Ecole centrale de Lille</p> <p style="text-align: center;">Histoire des Sciences et techniques</p> <p>p. 66 La lente diffusion des idées nouvelles en automatique en France au cours des années 1950 P. Remaud Ecole supérieure d'ingénieurs de Poitiers</p>
--	--

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

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

Nous commençons cette nouvelle année de parution sous le signe de la couleur verte de l'esérance avec le thème annoncé des **gisements d'économies d'énergie**.

L'ensemble des articles regroupés sous ce thème, tout à fait d'actualité, sera réparti dans les numéros de Décembre et de Mars. Dans ce numéro vous trouverez la première partie de l'article d'Arnaud Brugier sur la consommation des utilités et entraînements industriels, puis une étude de l'énergie consommée en traction ferroviaire de Gilles Arnautou et Romain Dardevet, et un article sur l'efficacité énergétique dans l'éclairage de Georges Zissis.

La seconde partie de l'article d'Arnaud Brugier sera publiée en Mars avec trois articles concernant davantage le bâtiment : Olivier Sidler nous parlera de la maîtrise de la demande d'énergie tandis que Jean Bonal et Jean François Sergent s'intéresseront à l'efficacité énergétique dans le bâtiment et que Joseph Virgone nous parlera des bâtiments à haute performance énergétique.

Dans la rubrique **Histoire des Sciences** nous publions le dernier article sur l'histoire de l'automatique de Patrick Remaud et Jean-Claude Trigeassou que nous remercions chaleureusement pour nous avoir fait découvrir le travail et l'organisation naissante des automaticiens dont nous utilisons si souvent les noms en cours d'automatique sans plus penser au travail de ces chercheurs.

Les articles regroupés dans la partie hors thème abordent des sujets divers et pour certains ont été annoncés depuis longtemps comme « L'influence de la température sur un module de super condensateurs » écrit par N. Rizoug et le « Vieillissement de batteries au plomb » écrit par E. Odic et « La commande d'une pompe par générateur photovoltaïque » écrit par A. Arzandé.

Dans la rubrique **Sciences Appliquées**, nous pouvons enfin publier l'article de Didier Derks, Pascal Brochet et Frédéric Gillon sur le « Calcul du couple par variation de la co-énergie »

Merci à tous les auteurs de ces deux rubriques pour leur patience !

Les thèmes abordés dans les numéros suivants seront, comme prévu, la pile à combustible et les FPGA (Field Programmable Gate Array). Le numéro académique de Septembre sera consacré à l'académie de Toulouse avec la collaboration de Pascal Maussion que nous remercions vivement.

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...

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.

Ré-abonnez-vous rapidement pour éviter les lettres de relance fastidieuses et coûteuses

N'OUBLIEZ PAS DE VOUS ABONNER OU RE-ABONNER !!!

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 Revue3EI

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
Sylvaine LELEU
Pascal LOOS
Claude OBERLIN
Oviglio SALA
Jean-François SERGENT
Jean-Claude VANNIER
Pierre VIDAL

Pour vos insertions
publicitaires, contacter :
TRENDICE CONSEIL

Philippe MINGORI
01 45 74 96 47

Martine FERRON
01 45 74 96 48

Abonnement à la Revue 3EI, année 2007-2008 :

Numéros : 51 (décembre 2007), 52 (mars), 53 (juin) et 54 (septembre 2008).

<u>Abonnement individuel :</u>	<u>Abonnement collectif souscrit par bon de commande (bibliothèque, CDI, laboratoire, entreprise, etc.)</u>
France et Pays de la CEE : 36 €, TTC	France et Pays de la CEE : 52 €, TTC
Pays hors CEE : 46 €, TTC	Pays hors CEE : 65 €, TTC

Une seule adresse :

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

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



	<p>Calcul de champ électromagnétique : Exemples d'applications Collection . EDF R&D</p> <p>VÉRITÉ Jean-Claude, DUCREUX Jean-Pierre, TANNEAU Gérard, BARATON Philippe, PAYA Bernard Editions Tec et Doc Lavoisier</p> <p>Calcul de champ électromagnétique est consacré à la résolution des équations de Maxwell par des méthodes numériques. Son objectif est de montrer les applications du calcul de champ électromagnétique par des exemples très concrets d'études effectuées par EDF R&D. Pour chaque cas présenté, les auteurs se sont attachés à décrire non seulement la partie technique du travail avec la modélisation et les hypothèses utilisées, mais aussi à démontrer tout l'intérêt que présente la simulation numérique à base de calcul de champ électromagnétique. L'éventail d'applications recouvre divers domaines présentés suivant la chronologie des investigations dont ils ont été l'objet : machines tournantes électriques, transformateurs, contrôles non destructifs par courants de Foucault, compatibilité électromagnétique, électrothermie, matériel de transport de l'énergie électrique... Cet ouvrage avant tout pratique est illustré et présente en annexes les grandes familles de formulations employées dans les principaux logiciels utilisés (types FLUX2D, BIFOU, TITAN, ACDC, FLUX3D, PH13D, TRIFOU, TubGV, FOUCO...).</p>
	<p>Les convertisseurs de l'électronique de puissance Vol. 2 : La conversion alternatif-alternatif (3^e Edition.)</p> <p>DELARUE Philippe, ROMBAUT Christian, SÉQUIER Guy Editions Tec et Doc Lavoisier</p> <p>Les convertisseurs de l'électronique de puissance, volume 2, est le deuxième ouvrage d'une série de cinq consacrée à l'étude approfondie des convertisseurs. Les quatre premiers traitent du fonctionnement et des caractéristiques des quatre grandes familles de convertisseurs, tandis que le cinquième présente les procédés de commande. Le volume 2 est consacré aux convertisseurs statiques alternatif-alternatif, c'est-à-dire principalement aux convertisseurs directs, sans élément de stockage de l'énergie entre l'entrée et la sortie, et les convertisseurs à commutation naturelle, dont les semi-conducteurs ne nécessitent pas une action spécifique d'extinction. La 1^{re} partie de cet ouvrage traite ainsi des gradateurs, tandis que la 2^e partie présente les changeurs directs de fréquence. Cette nouvelle édition inclut deux chapitres inédits sur les gradateurs à commutation forcée et les convertisseurs matriciels. Les Facts (flexible alternative continu transmission systems) sont aussi largement abordé</p>
	<p>Capteurs : Principes et utilisations</p> <p>F. Baudoin, M. Lavabre Editions Casteilla</p> <p>L'ouvrage, destiné aux techniciens, techniciens supérieurs (DUT, BTS) et étudiants du premier cycle de l'enseignement supérieur, a pour but d'assister l'utilisateur non spécialiste dans un choix raisonné de capteurs. Lorsqu'on doit, dans un projet ou un process industriel, effectuer la mesure et le suivi d'une grandeur physique, il est souvent difficile de trouver dans la jungle des différentes déclinaisons technologiques le dispositif utile et adapté. La lecture de cet ouvrage permet d'explorer rapidement les solutions existantes et d'en voir les limites d'utilisation, très souvent liées au principe physique du capteur utilisé. Ces principes sont rappelés en tête de chapitre puis un large choix d'exercices avec solutions brèves ou réponses (extraits d'annales, d'épreuves de BTS, de contrôles en premier cycle d'ingénieur) permet au lecteur de se familiariser avec l'électronique qui accompagne la mise en œuvre d'un capteur. Le contenu de cet ouvrage se veut à la fois théorique, parce que les phénomènes physiques sont expliqués, et pratique puisque la description et la mise en œuvre des capteurs y sont traités.</p>
	<p>Les réseaux de neurones Présentation et applications</p> <p>Pierre Borne, Mohamed Benrejeb, Joseph Haggège Editions Technip</p> <p>Cet ouvrage présente les propriétés essentielles des réseaux de neurones artificiels ainsi que leurs applications les plus communément utilisées. Il met l'accent sur les aspects fondamentaux de ces réseaux et convient tout particulièrement aux étudiants, ingénieurs et chercheurs désirant se familiariser avec ces concepts et les approfondir. Après une description détaillée des principales propriétés des réseaux de neurones artificiels et des techniques d'apprentissage, supervisé ou non, les plus courantes, les applications suivantes sont présentées :</p> <ul style="list-style-type: none"> * Analyse en composantes principales ; * Classification et reconnaissance de patrons ; * Identification et optimisation par les réseaux de Hopfield ; * Modélisation et commande par les réseaux neuro-flous ; * Commande des processus ; Approximation de fonctions.

Une nouvelle révolution industrielle en Europe ?

Arnaud BRUGIER

Lycée Clément Ader,

37bis rue Geneviève Anthonioz-De Gaulle,

91200 Athis-Mons

arno.brugier@wanadoo.fr

Résumé :

Cet article vise à présenter le contexte énergétique dans lequel l'Europe et donc la France évoluent et les différentes pistes et outils que les pouvoirs publics comptent promouvoir afin d'améliorer sensiblement l'efficacité énergétique des systèmes de production et de consommation d'électricité. L'auteur a privilégié le domaine industriel pour illustrer le propos.

1. Contexte européen

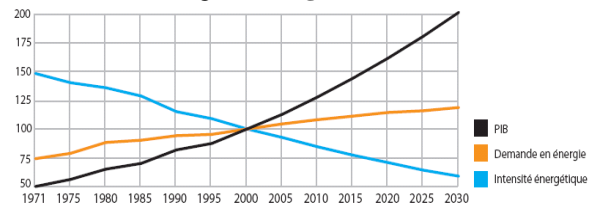
En 2000, c'est un livre vert sur la sécurité de l'approvisionnement en énergie (contexte, bilan) qui a conduit la Commission Européenne à élaborer :

- une **directive sur la performance énergétique des bâtiments** (04/01/2003 - date de transposition limite : 04/01/2006),
- une **proposition de directive sur l'éco-conception des produits consommateurs d'énergie** (1/08/2003),
- plusieurs nouvelles **directives sur l'étiquetage et les niveaux minimums d'efficacité requis des appareils électroménagers**. (La dernière en date (réfrigérateurs et congélateurs) : 29/07/2003 - date de transposition limite : 29/06/2004)),
- une **directive sur la co-génération** (21/02/2004 - date de transposition limite : 21/02/2006),
- plusieurs **programmes** : « **Energie Intelligente Europe** », « **Energy Star** », ... ,
- des **mesures dans le domaine des énergies renouvelables**.

C'est donc logiquement que la Commission Européenne publie au mois de juin 2005 un nouveau livre vert¹ dédié à l'efficacité énergétique² qui dresse un bilan des avantages à tirer d'une politique accrue en matière d'économies d'énergie :

- moyen le plus rapide pour diminuer les émissions de gaz à effet de serre (GES) et ainsi atteindre les objectifs de Kyoto en matière de lutte contre le réchauffement climatique fixés en 1997. Le secteur de l'énergie représente 80% des émissions de GES dans l'UE. La tendance actuelle est une augmentation de 55% d'ici à 2030 des émissions mondiales de CO₂ (75% des GES) et de 5% dans l'U.E. 20% d'économies d'énergie pourraient ainsi générer une baisse de 50% des émissions de CO₂.

- sécurisation des approvisionnements énergétiques. L'UE importe actuellement 50% des ses besoins en énergie. D'ici à 2030 l'UE pourrait être à 93% et 84% dépendante respectivement des importations de pétrole et de gaz et voir sa demande en électricité grimper de 1,5%/an (importation alors de 65% de ses besoins en énergie). Cf **figure 1**.

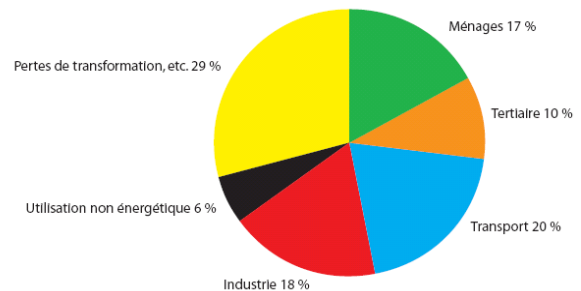


L'intensité énergétique diminue en moyenne de 1,6 % par an.

Sources: Statistiques de l'AIE et projections (scénario de référence) de European energy and transport: Scenarios on key drivers. Commission européenne, 2004.

Figure 1 : Evolution du PIB à long terme, de la demande en énergie et de l'intensité énergétique (rapport de la consommation primaire d'énergie sur le PIB brut marchand en volume). Scénario de référence UE-25 (an2000=100).

- réduction de la facture énergétique brute (1725MTEp (**figure 2**), soit 500 Milliards d'euros, soit 1000 euros/hbt chaque année dans l'Europe des 25).



Source: Estimation basée sur des bilans énergétiques d'Eurostat

Figure 2 : estimation de consommation brute d'énergie (1725 MTEp) par secteur en 2005 (UE-25)

- L'UE pourrait économiser 20% de sa consommation énergétique actuelle (c'est-à-dire la consommation de la Finlande et de l'Allemagne réunies), avec la mise en place d'outils ayant un rapport coût/efficacité satisfaisant (10% avec des outils déjà existants dans le bâtiment, les appareils domestiques, la production de chaleur et les transports et 10% avec de nouvelles mesures). Des exemples de potentiels d'économie sont donnés : extension de la directive bâtiments : 30MTep, éco conception : 30MTep, transports : 45MTep, production d'électricité et cogénération : 70MTep. Dans ce dernier cas, notons que plus des deux tiers de l'énergie nécessaire pour produire cette électricité est perdue dans le processus de production-transport-distribution. Seuls 25% à 60% des combustibles sont convertis en énergie d'où la nécessité de mise en œuvre de technologies de production d'électricité à partir de cycles combinés au gaz, du développement de la production d'électricité décentralisée, de la production combinée de chaleur (co-génération)...
- développement de la compétitivité de l'économie européenne avec des coûts énergétiques un peu mieux maîtrisés, le développement de produits à haut rendement et de services d'efficacité énergétique (S2E),
- coopération internationale (intérêts géopolitiques, commerciaux et contribution de l'efficacité énergétique au développement économique et social) bien que l'EU ne soit pas pionnière en matière d'efficacité énergétique et que d'autres membres de l'OCDE aient lancé ce chantier depuis longtemps déjà (Etats-Unis, Japon...).

D'autres arguments plaident en faveur de mesures fortes dans le domaine de l'efficacité énergétique :

- le coût total de production d'un kWh électrique est environ le double du coût permettant de l'économiser (en raison du grand investissement en capital exigé), d'où la fameuse expression : « le kWh le moins cher est celui que l'on ne consomme pas ». Le groupe III du GIEC, réuni à Bangkok début mai 2007³, a d'ailleurs émis des pistes à suivre rapidement pour réduire les émissions de GES. Ainsi, dans le domaine de l'énergie, il préconise « d'investir dans l'amélioration de l'efficacité énergétique » (les négajoules, cf. **figure 3**) plutôt que dans de nouvelles capacités de production.

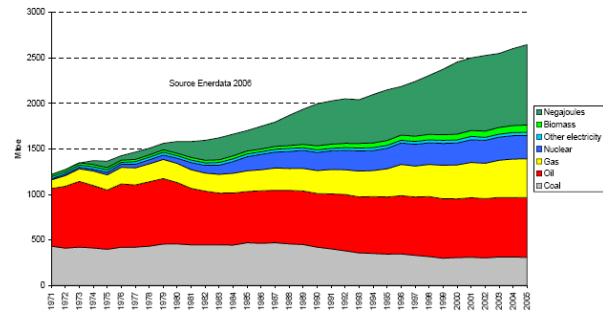


Figure 3 : Evolution de la demande d'énergie primaire et des «négajoules» (négajoules = économies d'énergie calculées d'après l'intensité énergétique en 1971)

- des effets bénéfiques sur l'emploi : les investissements dans l'efficacité énergétique au stade de l'utilisation finale créent 3 à 4 fois plus d'emplois que des investissements comparables dans la production d'énergie. Une estimation de deux millions de créations d'emploi dues à la mise en œuvre des actions d'économies (1/3) et à l'utilisation des fonds économisés (2/3) est avancée. Citons également le fort besoin de formation et de R&D.

Plusieurs obstacles sont identifiés par la commission :

- manque de mesures structurelles profondes depuis le choc pétrolier pour stabiliser la demande d'énergie,
- obstacles financiers, réglementation insuffisante, absence de marché de l'efficacité énergétique,
- manque d'informations à la disposition de chacun sur sa consommation, sur les technologies existantes, sur les coûts d'investissement dans les alternatives de l'efficacité énergétique et leurs bilans « coût – bénéfice ». Le gaspillage d'énergie est en grande partie du aux technologies inefficaces, aux habitudes de consommation peu économes (ex. : lampe à incandescence) et à son faible coût. Ajoutons à cela le refus du risque pour les particuliers et les entreprises,
- manque d'information et d'éducation,
- manque de techniciens et d'ingénieurs formés et sensibilisés,
- prix non transparents ne reflétant pas les coûts réels de l'énergie (non prise en compte des coûts externes : pollution, démantèlement, raréfaction des ressources...),
- utilisation non optimale des moyens financiers et des aides des états.

La Commission envisage dans ce livre vert de renouer avec un taux d'amélioration de l'efficacité énergétique satisfaisant car il plafonne à 0,5% par an actuellement. Pour cela elle souhaite s'appuyer sur les

instruments du marché déclinés à différents niveaux mais en demandant aux pouvoirs publics de donner l'exemple et d'intervenir afin de remédier aux « carences » de ce marché. Ces différents niveaux sont :

- **UE** : efforts accrus de recherche et renforcement du programme « Energie Intelligente Europe » dédié à l'efficacité énergétique et aux énergies renouvelables, marchés publics, invitation à ce que les états membres donnent la priorité à la promotion de l'efficacité énergétique (plans d'action nationaux, analyse et mise en œuvre des meilleurs outils européens...), mesures spécifiques (bâtiment, produits domestiques, véhicules, information du consommateur...),...
- **National** (niveau le plus adéquat pour contraindre) : meilleure utilisation des politiques fiscales et aides de l'état, rationalisation des subventions, mise en place des certificats blancs en tant qu'instrument du marché pour l'efficacité énergétique, marchés publics pour soutenir les nouveaux produits, régulation et amélioration des activités de réseau (transport, distribution, livraison, production, comptage) pour augmenter l'efficacité énergétique (ex : pertes en ligne), information meilleure et plus ciblée, prêts globaux et intermédiaires appropriés, développement des sociétés de service énergétique (SS2E), ...
- **Régional et local** : renforcement des synergies entre les villes, les réseaux d'agences locales, les programmes d'actions pilotes ou spécifiques (par ex. à destination des PME), ...
- **Sectoriel** : tertiaire, industrie, domestique.

1.1. Le plan d'action pour l'efficacité énergétique

S'ensuit donc en octobre 2006 un document baptisé « Réaliser le potentiel »⁴ qui répond à l'appel pressant des chefs d'état et de gouvernement du printemps 2006 de définir une stratégie en faveur de l'efficacité énergétique et qui s'adresse au grand public, aux décideurs politiques et aux acteurs du marché. L'objectif d'économiser 20% de l'énergie primaire d'ici à 2020, c'est-à-dire de doubler le rythme actuel d'amélioration de l'efficacité énergétique en agissant sur les modes de production et de consommation, y est inscrit. Ces 20% correspondent, par an, à :

- 390MTep (100 milliards d'euros d'économies),
- 780MT de CO₂ (2 fois plus que ce que prévoit Kyoto pour 2012).

L'engagement est également pris de réduire d'au moins 20% les émissions de GES de l'UE en 2020 par rapport au niveau de 1990 et il est proposé 30% si les autres pays industrialisés suivent dans le cadre d'un

accord international. Les organisations écologistes estiment sur ce point que tout objectif inférieur à 30% ne permettra pas de limiter la hausse de la température à 2°C par rapport à ce qu'elle était pendant la période pré-industrielle, c'est-à-dire le seuil au dessus duquel les études scientifiques montrent que le changement climatique serait catastrophique⁵. Sur le plan international, l'objectif est d'obtenir une baisse mondiale de 50% des GES d'ici à 2050 toujours par rapport au niveau de 1990, d'où une baisse de 60% à 80% dans les seuls pays industrialisés sur la même période.

Cela sous entend des actions plus importantes qui s'appuieront sur deux directives récentes pour modifier les comportements et pour mettre sur le marché des techniques et produits plus économes :

- la **directive sur l'éco-conception des produits consommateurs d'énergie (EUP)**⁶ (11/08/2005 – date limite de transposition : 10/08/2007) qui vise à diminuer les impacts environnementaux pour tous les produits consommant de l'énergie :
 - soit par des exigences spécifiques sur des aspects particuliers (ex : consommation d'énergie).
 - soit par des exigences génériques d'éco-conception. Aux industriels de définir les plans d'action volontaires (ex : programme de réduction des consommations de matières premières).
- la **directive sur l'efficacité des utilisateurs finaux et les services énergétiques**⁷ (17/05/2006 – date limite de transposition : 17/05/2008). Celle-ci définit les objectifs en matière d'économies d'énergie et les outils de promotion des utilisations finales efficaces de l'énergie et des services énergétiques puis indique dispositions finales à mettre en œuvre.

Dans son Annexe III (*Liste indicative d'exemples de mesures admissibles visant à améliorer l'efficacité énergétique*), on retrouve les éléments suivants qui nous intéressent plus directement (tertiaire / industrie / enseignement) :

Mesures dans le secteur industriel

- h) *procédés de fabrication (Exemples: utilisation plus efficace de l'air comprimé, des condensats et des interrupteurs et vannes, utilisation de systèmes automatiques et intégrés, modes de veille efficaces);*
- i) *moteurs et systèmes de transmission (exemples: utilisation accrue de commandes électroniques, variateurs de vitesse, programmes d'application intégrés, conversion de fréquences, moteurs électriques à haut rendement);*
- j) *ventilateurs, variateurs de vitesse et ventilation (exemples: nouveaux appareils ou systèmes, utilisation de la ventilation naturelle)*

Mesures au niveau intersectoriel

p) normes visant principalement à améliorer l'efficacité énergétique des produits et des services, y compris des bâtiments;

q) systèmes de spécification du rendement énergétique;

r) meilleur établissement des relevés, systèmes de relevés intelligents tels que des compteurs individuels gérés à distance, et factures explicatives;

s) formation et éducation entraînant l'application de technologies et/ou de techniques à haut rendement énergétique;

Et dans son Annexe V (Liste indicative des marchés et segments de marché de la conversion de l'énergie pour lesquels des valeurs de référence peuvent être établies) :

4. Marché des moteurs et systèmes d'entraînement dans l'industrie

La commission décrit son plan sous la forme de mesures regroupées en trois familles et qui ciblent les meilleurs potentiels d'économie identifiés dans le bâtiment, les transports puis dans l'industrie manufacturière (figure 4).

Secteur	Énergie consommée en 2005 (Mtep)	Énergie consommée en 2020 (Mtep) (statu quo)	Potentiel d'économies d'énergie en 2020 (Mtep)	Potentiel d'économies d'énergie (Mtep) dans sa totalité
Ménages (habitations)	280	338	91	27%
Bâtiments commerciaux (tertiaire)	157	211	63	30%
Transports	332	405	105	26%
Industrie manufacturière	297	382	95	25%

Figure 4 : Estimations du potentiel total d'économies d'énergie dans les secteurs d'utilisation finale

En premier lieu, les prescriptions dynamiques en matière de performances énergétiques pour une vaste gamme de bâtiments, de services et de produits. On y trouve donc des mesures de renforcement (actions prioritaires) des directives passées :

- prescriptions d'étiquetage des appareils et équipements consommateurs d'énergie et mise en place de normes minimales de performance énergétique pour 14 produits prioritaires (résidentiel, tertiaire et industriel, figure 5) sur la base de la méthode du coût du cycle de vie le plus bas déjà inscrit dans la directive d'éco conception (on estime que plus de 80% des impacts environnementaux sont liés à la phase de conception d'un produit).

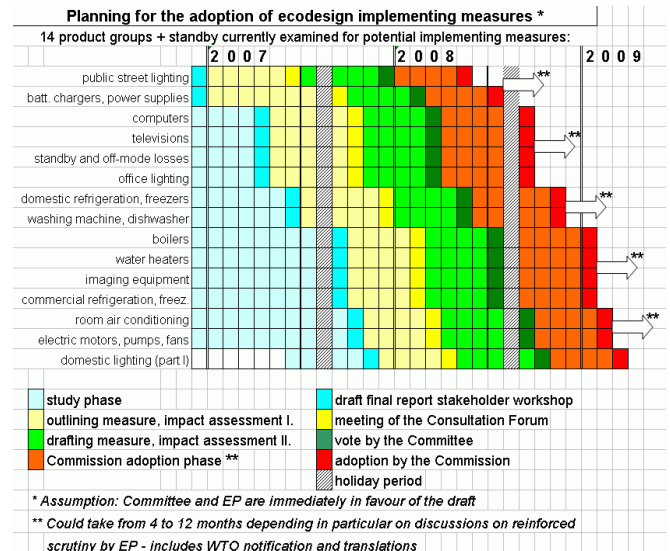


Figure 5 : calendrier d'adoption des mesures renforcées (font office d'obligations légales pour les constructeurs). Site du groupe d'experts en charge du lot « motorisation électrique » : <http://www.ecomotors.org>

- Parallèlement s'ensuivra l'adoption le 6/07/2007 d'un plan de travail pour réaliser d'ici à 2010 un marché intérieur d'autres produits consommateurs d'énergie (éclairage domestique 2nd volet, aspirateurs, ...). La remise à jour des classifications d'étiquetage et des labels tous les 5 ans ou lorsque l'évolution technologique le justifiera permettra de réserver le label A aux 10% à 20% des produits et des équipements les plus performants. Notons ici qu'un constructeur sera obligé d'avoir au moins un produit de classe A dans sa gamme pour obtenir le marquage CE,
- prescriptions applicables à la performance énergétique des bâtiments et des bâtiments à très faible consommation d'énergie (« habitations passives »),
- améliorer l'efficacité de la production, du transport et de la distribution d'électricité et de chaleur,
- améliorer l'efficacité énergétique des moyens de transport et promouvoir les transports publics, faire supporter aux consommateurs le coût réel des transports,
- faciliter le financement approprié des investissements dans l'efficacité énergétique pour les PMI/PMI et les sociétés de services énergétiques,
- promouvoir l'efficacité énergétique dans les nouveaux états membres,
- utiliser de façon cohérente les outils fiscaux,
- susciter, faciliter et renforcer un comportement rationnel et responsable. Cela passe par des actions d'éducation et de formation (programmes scolaires

et matériels pédagogiques, plans de formation destinés aux gestionnaires de l'énergie dans les entreprises et les compagnies de gaz et d'électricité), par des audits et la certification des bâtiments communautaires d'ici à 2009, par le développement et la promotion de systèmes de gestion efficace de l'énergie en cofinancement avec des programmes communautaires, par un plan environnement pour les PME avec « boîte à outils de l'efficacité énergétique »...

- efficacité énergétique dans les zones urbaines,
- promotion de l'efficacité énergétique dans le monde et signature d'un nouvel accord international entre les pays de l'OCDE et les principaux pays en développement (Chine, Brésil, Inde...) afin de restreindre l'utilisation de produits qui ne satisfont pas à des normes minimales et afin de définir une approche commune pour économiser l'énergie.

En second lieu, les signaux appropriés et visibles sur les prix.

Enfin, l'innovation et la technologie (un *plan stratégique relatif aux technologies énergétiques* sera adopté en 2007).

1.2. Le paquet intégré de mesures⁸

Toutes les dispositions avancées précédemment et concernant l'efficacité énergétique et son renforcement s'intègrent donc normalement au paquet de mesures et de réformes « communiquées » le 10 janvier 2007 par la Commission au Conseil Européen. Ce « paquet énergie », constitué d'objectifs stratégiques et d'un plan d'action concret (énergies renouvelables, biocarburants, efficacité énergétique, marché intérieur de l'énergie...), fait office de point de départ d'une politique énergétique européenne cohérente (lacune, alors que c'est une des bases de la création de l'U.E. (Déclaration de Messine de 1955)). Il doit permettre de « transformer l'Europe en une économie à haut rendement énergétique et à faible taux d'émissions de GES, d'engager une nouvelle révolution industrielle » et à l'Europe de ne « représenter à l'avenir que 15% des nouvelles émissions de CO₂ et en 2030 de ne consommer que 10% de l'énergie mondiale ». Cependant, si ces objectifs sont louables, ils risquent d'être difficile pour l'Europe de les atteindre tant il y a de contradictions entre les souhaits de la commission et les politiques intérieures des états membres : « libéralisme contre intervention de la puissance publique, fédéralisme et souveraineté des états, court terme énergivore et long terme sobre, quête de la croissance et vision édénique d'une Europe *Low Carbon Energy* »⁹. Ces mesures ont été soumises aux dirigeants européens lors de leur sommet du printemps 2007 en vue de propositions législatives à venir.

1.3. Le programme « Europe – Energy Intelligente »

Il s'agit du dispositif européen visant à promouvoir l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables. Il soutient et finance de nombreux projets dont, pour ce qui est des domaines tertiaire et industriel :

- « *Motor Challenge Programme (MCP)* »¹⁰, « *Dissemination and Extension of the Motor Challenge Programme (DEXA-MCP)* » et « *Motor Challenge Programme – Energy Efficiency Electric Motor Systems in New Member Candidate Countries (4EM-MCP)* »¹¹ : promotion des systèmes motorisés électriques efficaces dans l'industrie européenne, notamment pour les systèmes d'entraînement, de pompage, de ventilation, de compression d'air, de production et de distribution de froid ainsi que pour les transformateurs et les réseaux de distribution électriques qui sont à l'origine d'une grosse partie de la consommation d'énergie industrielle en Europe. Le projet, qui est relayé dans les projets nationaux d'économie d'énergie, encourage et accompagne les entreprises dans l'acquisition du label « Motor Challenge », aide à mettre en place des audits et un support technique, conçoit des outils de prise de décision, des plaquettes d'information : « formation au Motor Challenge », « Guides des solutions d'optimisation des systèmes motorisés », modules techniques spécifiques ...
- la plateforme d'information et d'outils logiciels en ligne « ProMot »¹² qui permet d'évaluer les économies potentielles de ses équipements électriques (compression d'air, pompage, froid et systèmes d'entraînement) et donne accès à une base de données regroupant les produits des principaux constructeurs,
- « *Technologie Procurement for Very Energy Efficiency Circulation Pumps* » : se concentre sur les circulateurs d'eau dans les circuits domestiques et le tertiaire et qui représentent 2% à 3% de la consommation d'électricité de l'U.E. Le gain espéré est de 60% (- 25TWh/an et -10MT de CO₂ / an) par l'utilisation de variateurs et la standardisation des matériels.
- Différents projets relatifs aux économies d'énergie dans des secteurs particuliers : « euRECIPE » pour l'industrie européenne de la plasturgie, « EMS TEXTILE » pour les entreprises textiles grecques, portugaises, espagnoles et bulgares, « AMETHYST » pour les PME viticoles françaises, italiennes, allemandes et espagnoles, « CERAMIN » pour l'industrie céramique...

- « Odyssée » vise depuis 1992 à définir et produire des indicateurs d'efficacité énergétique dans les différents secteurs (industrie, transport, etc...) à un niveau détaillé par usage. L'objectif est l'établissement d'une structure technique permanente qui permet de suivre l'évolution annuelle des progrès sectoriels en matière d'efficacité énergétique et des émissions de CO₂, au niveau national et européen.
- « mure » est une base de données sur les politiques d'efficacité énergétique en Europe. Une combinaison de ces deux dernières démarches permet de relier les politiques énergétiques aux indicateurs d'efficacité énergétique.

2. Contexte national

En terme d'émissions de GES, en 2005, la France était comme en 2004 en dessous (-1,8%) des émissions de 1990 mais le protocole de Kyoto fixe pour objectif une réduction de 8% des émissions de GES à l'horizon 2010 par rapport à 1990¹³.

2.1.1. Quelques chiffres ^{14 15 16}

- consommation finale = 427,6TWh (cf. **figure 6**), soit +1% (430,2TWh, soit +1,5% en données corrigées du climat). Industrie = 125TWh (-1,2%).

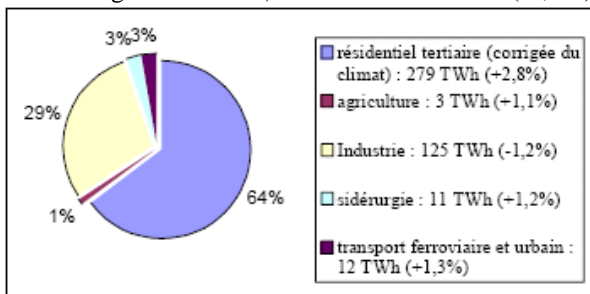


Figure 6 : La consommation finale d'électricité en 2006 : 430 TWh (+1,5%)

- la consommation finale d'électricité a triplé depuis 1970 (cf. **figure 7**). L'évolution en valeur absolue a été de +2%/an dans l'industrie et de +5%/an dans le résidentiel/tertiaire. En 1970, l'industrie représentait 50% de cette consommation contre 35% au résidentiel/tertiaire. En 2006 elle représente seulement 32% contre 35% pour le résidentiel et 30% pour le tertiaire.

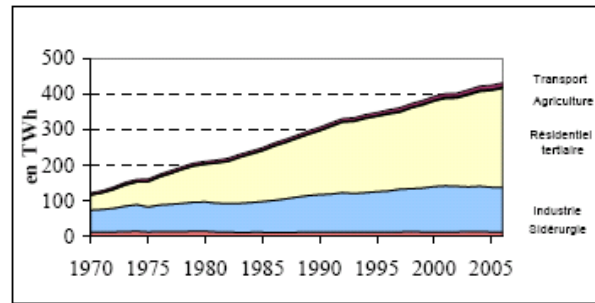


Figure 7 : Consommation finale d'électricité par secteur, corrigée du climat, en TWh

- entre 1991 et 2006, la consommation finale d'énergie électrique dans l'industrie a augmenté de 1%/an mais elle a baissé de 0,7%/an entre 2001 et 2006 (inversion de tendance).
- depuis 1996, on note une amélioration de l'intensité énergétique et une amélioration de l'efficacité énergétique de 1,2%/an. De 1970 à 2004, l'intensité énergétique dans l'industrie a chuté de 62%. Cela est du :
 - o aux rendements minimaux imposés aux chaudières industrielles ainsi qu'au contrôle périodique des installations de combustion supérieures au MW,
 - o aux moyens incitatifs élaborés par l'ADEME en faveur des PME : aides à la décision (diagnostics énergétiques), opérations exemplaires, instruments financiers (fonds de garantie des investissements de maîtrise de l'énergie), ...
 - o aux mesures fiscales (amortissement des investissements sur un an, ...),
 - o à la poursuite de l'amélioration de l'efficacité énergétique, notamment par l'instauration d'un marché du permis d'émissions. 1081 sites industriels sont soumis aujourd'hui au plan national d'allocation de quotas d'émission de CO₂ qui limite de 2005 à 2007 les émissions à 156,5 millions de tonnes de CO₂ par an. Le plan de 2008 à 2012 réduit le volume de ces émissions à 132,8 millions de tonnes de CO₂ par an. Pénalité payée à l'état de 100 euros par tonne de CO₂ dépassant le quota.
 - o aux engagements volontaires de certains industriels.
- l'industrie (hors production d'énergie) est le secteur qui fait le plus d'économies d'énergie depuis 1973 (premier choc pétrolier) : de 36% de la consommation finale d'énergie corrigée du climat à 24,3% en 2005, soit 39,1MTep.
- consommation de 33,62MTep par an pour le secteur manufacturier et 5,46MTep par an pour la

sidérurgie, soit au total 25% de l'énergie consommée en France en 2005 (dont 30% d'électricité).

- la part de la consommation actuelle d'énergie dans l'industrie susceptible d'être économisée s'élève à 30% selon l'ADEME (estimée sur la base d'un baril de pétrole à 30\$, cela représente 12MTep par an).
- on observe sur le tableau de la **figure 8** l'importance de la consommation d'électricité à des fins de force motrice dans les procédés industriels. Selon l'ADEME, le gisement d'économies atteindrait 10% à 35% sur les 90TWh/an absorbés par ce poste.

Secteur industriel	Force Motrice	Chaudières électriques	Autres usages thermiques	Autres usages	Total
Ensemble de l'industrie (hors industrie agricole et alimentaire (IAA), y compris sidérurgie)	65,4	2,4	13,1	19,0	100,0
Ensemble de l'industrie (y compris sidérurgie et IAA)	69,4	2,3	11,6	16,7	100,0

Figure 8 : Synthèse de la répartition de la consommation d'électricité par secteur industriel en 2004 (en pourcentage¹⁷). Sont concernés les établissements de plus de 100 salariés.

2.1.2. Outils et programmes

La loi de programme du 13 juillet 2005 fixant les orientations de la politique énergétique¹⁸ impose de réduire de 2% par an d'ici à 2015 et de 2,5% d'ici à 2030 l'intensité énergétique finale alors que le rythme actuel est de l'ordre de 0,8%. Elle soutient aussi l'objectif de diviser par deux les émissions de CO₂ dans le monde d'ici à 2050, ce qui se traduirait par une division d'un « facteur 4 » en France (annoncé en 2003 par le gouvernement). Le « plan climat » de la France (et ses réactualisations) a pour objectif de sécuriser l'atteinte des objectifs de Kyoto, ce qui va être difficile, même en considérant les apports du nucléaire et de l'hydraulique, traditionnellement mis en avant. L'organisation d'un « Grenelle de l'environnement » à l'automne 2007 devrait permettre de pointer le potentiel d'économie d'énergie dans notre pays et réinitialiser un certain nombre de documents en vigueur si les conclusions sont suivies d'effet.

Comme l'ensemble des états membres, la France a remis en 2007 à la Commission Européenne son Plan national d'action d'efficacité énergétique (PNAEE) visant à réaliser une économie moyenne minimale de 1% par an d'ici à 2016. Une des principales mesures de maîtrise de la demande d'énergie exposée est la mise en

œuvre par décret¹⁹ du certificat d'économie d'énergie. Le PNAEE doit également présenter les outils de mesure et d'évaluation des progrès réalisés ainsi que les actions exemplaires du secteur public et les outils d'information grand public envisagés.

Elle est, de plus, également impliquée via l'ADEME dans le programme européen SAVE (Efficacité énergétique des bâtiments, Excellence industrielle dans l'énergie, Efficacité énergétique des produits) de l'agence européenne de l'énergie intelligente (IEEA).

2.1.2.1. Le certificat d'économie d'énergie (ou certificat « blanc »)²⁰

Il est défini dans la loi de programme no 2005-781 du 13 juillet 2005 fixant les orientations de la politique énergétique et notamment son article 15.

Complémentaire des autres outils existants (réglementation, crédit d'impôt au titre de la recherche, TVA...), il s'agit d'un dispositif phare permettant la réalisation d'économies d'énergie. Le principe inscrit dans la loi du 13 juillet 2005 repose sur l'obligation faite aux vendeurs d'énergie (électricité, gaz, chaleur, froid et fioul domestique) par les pouvoirs publics de réaliser des économies de 54TWh sur la période allant du 1/07/06 au 30/06/09, au prorata de leur part de marché, et sous peine de se voir infliger un pénalité libératoire de 2c€/kWh. Rien que pour EdF, l'astreinte est fixée à 30TWh cumac. Toutes les actions sont alors possibles de la part du vendeur : information, incitations financières, prime pour l'acquisition d'un équipement, aide aux travaux, service... Les vendeurs reçoivent ensuite des certificats délivrés par la DRIRE sur la base de forfaits en kWh calculés par type d'action et en contrepartie du constat d'investissement effectué par les consommateurs (**figure 9**). Il s'agit d'un marché puisqu'il est possible d'acheter des certificats aux « éligibles », c'est-à-dire ceux qui en ont obtenus (industriel, office HLM...). Ce système, également mis en place en Italie et au Royaume-Uni, est préconisé dans la directive relative à l'efficacité énergétique dans les utilisations finales et aux services énergétiques et permet plus facilement de financer des économies d'énergie diffuses autrement peu faciles à mener (habitat des particuliers...).

Certificats d'économies d'énergie

Opération n° IND-UT-01

Moteur haut rendement EFF1

1. Secteur d'application : Industrie.
2. Dénomination : Mise en place d'un moteur haut rendement appartenant à la classe de rendement européenne EFF1.
3. Conditions pour la délivrance de certificats : Le label EFF1 doit figurer sur la plaque du moteur.
4. Durée de vie conventionnelle : 15 ans.
5. Montant de certificats en kWh cumac :

MONTANT EN kWh cumac EN FONCTION DE LA PUISSANCE DU MOTEUR Pn EN kW		
Type de moteur	Type d'application	
	Pompes, ventilateurs, compresseurs, convoyeurs	Autres moteurs
1500 tr/min (4 pôles)	790 x Pn + 5200	480 x Pn + 3500
3000 tr/min (2 pôles)	640 x Pn + 3500	330 x Pn + 2400

Certificats d'économies d'énergie

Opération n° IND-UT-02

Système de variation électronique de vitesse sur un moteur

1. Secteur d'application : Industrie.
2. Dénomination : Installation d'un système de variation électronique de vitesse (VEV) sur un moteur de puissance comprise entre 0,37 kW et 630 kW.
3. Conditions pour la délivrance de certificats : Sans objet.
4. Durée de vie conventionnelle : 10 ans.
5. Montant de certificats en kWh cumac :

APPLICATION	MONTANT UNITAIRE EN kWh cumac/kW	PUISSANCE DU MOTEUR EN kW P
Ventilation	15 000	
Pompage	12 000	
Air comprimé	5 900	

Figure 9 : Exemples de certificats attribués par le ministère de l'économie, des finances et de l'industrie pour 2 opérations standardisées dans le secteur de l'industrie (Arrêté du 19 juin 2006 définissant les opérations standardisées d'économies d'énergie). Définition des kilowattheures cumulés actualisés (kWh cumac) : Les kWh cumac sont des kWh économisés durant la durée de vie conventionnelle fixée d'un équipement, corrigé d'un coefficient d'actualisation annuel de 4%. Ainsi, un congélateur de classe A+, permettant d'économiser 50 kWh par an pendant une durée de vie de 10 ans, se verra attribuer 420 kWh cumac.

2.1.2.2. L'ADEME

L'ADEME relaye en France le programme « Motor Challenge » du programme « Energie Intelligente – Europe » et soutient, conseille et oriente les entreprises qui souhaitent se lancer dans cette démarche.

En plus de l'énoncé de ses missions dans le domaine de l'utilisation rationnelle de l'énergie dans les secteurs de l'agriculture et de l'industrie et d'un rappel historique des problématiques environnementales, elle propose également sur son site (www.ademe.fr) un ensemble de documents, d'outils et d'applications permettant d'agir pour une meilleure efficacité énergétique dans les entreprises :

- analyse, par secteur industriel, de différentes opérations présentes dans les procédés industriels ou dans les utilités et auxiliaires et de méthodes à préférer d'un point de vue énergétique. Il est possible de consulter des fiches ressources (ex : « pompage et variation électronique de vitesse », « ventilation et variation électronique de vitesse » ainsi qu'un certain nombre d'exemples industriels

de bonnes pratiques qui ont permis de substantielles économies²¹.

- consultation d'outils permettant d'engager des opérations d'économies d'énergie : cahiers des charges pour des prédiagnostics et des diagnostics énergétiques, guides techniques et éditions relatives aux économies d'énergie, une application en ligne d'information et d'auto-évaluation d'une installation de ventilation « ventilation », la plateforme d'outils logiciels et d'information en ligne « ProMot »
- guide des aides pour la délégation et la conduite des projets des entreprises liés à l'utilisation rationnelle de l'énergie (aides à la décision, à l'investissement, à la recherche et au développement) ainsi que des aides financières (FOGIME : fonds de garantie des investissements de maîtrise de l'énergie, DEMETER : fonds d'investissement en capital développement).

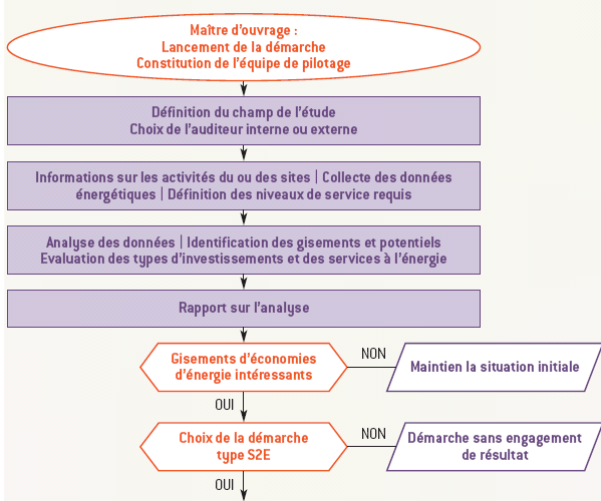
2.1.2.3. Les sociétés de services d'efficacité énergétique (SSEE) et le ClubS2E

Le ClubS2E²² est une plateforme d'échanges visant à contribuer au développement du marché de l'efficacité énergétique. Il publie le Guide sur « les Services d'Efficacité Énergétique »²³, pour expliquer la démarche d'efficacité énergétique, ses enjeux sur le marché français et son application concrète par un professionnel. Ce guide clarifie les orientations de la Directive européenne sur les Services d'Efficacité Énergétique et s'adresse aussi bien aux industriels qu'aux maîtres d'ouvrage, gestionnaires de patrimoines tertiaires et résidentiels (logements collectifs) des secteurs public ou privé, soucieux de réduire leurs consommations énergétiques et d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments dont ils ont la charge. Il traite des S2E confiés à un tiers opérateur dont la mission générale est de réaliser un programme de mise en oeuvre combinée ou séparée de technologies et de services, produisant un montant quantifiable d'économies d'énergie, garanties par ce tiers opérateur dans la durée.

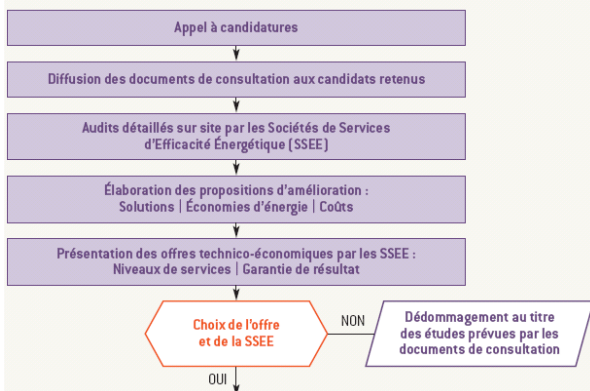
Le guide propose une méthodologie de mise en oeuvre de ces projets depuis les phases de diagnostic et d'audit, jusqu'à la garantie de la performance, en passant par le suivi et le contrôle.

Méthodologie proposée par le clubS2E pour les services d'efficacité énergétique :

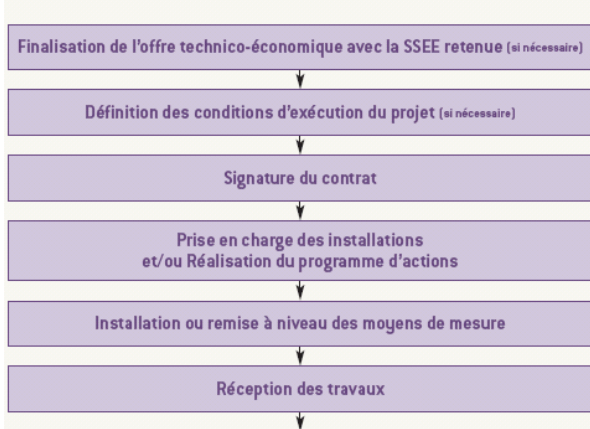
PHASE 1. PRÉPARATION DU PROJET



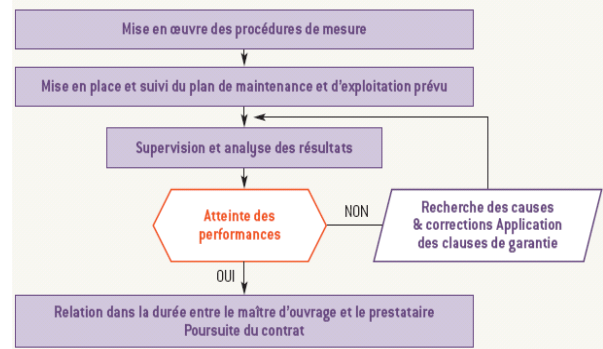
PHASE 2. ÉLABORATION DES OFFRES ET CHOIX DE LA SOCIÉTÉ DE SERVICE D'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE (SSEE)



PHASE 3 : CONTRACTUALISATION DU PROJET ET RÉALISATION DU PROGRAMME D' ACTIONS



PHASE 4. SUIVI ET GARANTIE DE LA PERFORMANCE DANS LA DURÉE



Le diagnostic énergétique dans l'industrie peut s'appuyer sur le référentiel BP X30-120 publié en mars 2006 par l'AFNOR ou sur les cahiers des charges « prédiagnostic d'une utilisation rationnelle de l'énergie » et « diagnostic » publiés par l'ADEME.

Si les compétences d'énergéticiens ne sont pas disponibles en interne, les entreprises peuvent donc faire appel à des bureaux d'étude spécialisés ou à d'autres spécialistes²⁴ :

- fournisseurs d'énergie, notamment dans le but d'obtenir leurs quotas de « certificats blancs »,
- fournisseurs de systèmes de gestion technique du bâtiment et d'automatismes (Siemens©, Schneider Electric© qui propose notamment des « contrats pour la performance énergétique », ...). Certains d'entre eux proposent de financer les investissements nécessaires par les économies d'énergie,
- gestionnaires délégués en énergie (Dalkia©...)
- centres techniques spécialisés dans certains procédés,
- spécialiste du comptage et de la qualité de l'énergie électrique (Enerdis©, Actenium©...).

3. Perspectives

Les politiques européennes actuelles traduisent l'inquiétude de ses dirigeants, relayée par l'opinion publique, d'une raréfaction inéluctable des ressources énergétiques peu chères dans un système économique schizophrène qui cherche à produire (et donc consommer) toujours plus tout en respectant son environnement. Si l'amélioration de l'efficacité énergétique des moyens de production est une voie intéressante, la réduction drastique des consommations électriques pour un même service fourni apparaît comme la solution incontournable pour générer la croissance tant espérée. Ainsi, agir sur :

- la mauvaise utilisation des équipements et installations électriques,

- leurs disfonctionnements,
- la minimisation des consommations insoupçonnées (veilles, pompes de circulation...),
- la mise en œuvre de constituants très efficaces et déjà présents sur le marché,
- l'intégration de fonctions de gestion intelligentes au cœur des procédés de conversion de l'énergie,
- le comportement des usagers,

constitue autant de moyens d'ores et déjà disponibles, ne nécessitant pas de rupture technologique, mais représentant un potentiel d'économie important. Cette première phase de bon sens doit s'accompagner d'actions de formation et de sensibilisation pour sa mise en œuvre (voire de quelques coups de pouces réglementaires) ainsi que d'efforts importants de recherche pour imaginer les procédés et produits futurs.

4. Références

¹ Commission Européenne. Livre vert sur l'efficacité énergétique. Consommer mieux avec moins. [COM(2005) 265 final du 22/06/05]. http://europa.eu.int/comm/energy/efficiency/index_fr.htm

² «efficacité énergétique» : le rapport entre les résultats, le service, la marchandise ou l'énergie que l'on obtient et l'énergie consacrée à cet effet; DIRECTIVE 2006/32/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 5 avril 2006 relative à l'efficacité énergétique dans les utilisations finales et aux services énergétiques et abrogeant la directive 93/76/CEE du Conseil. Journal Officiel de l'Union Européenne. Le terme « efficacité énergétique » est parfois utilisé. Il s'agit simplement d'un anglicisme.

³ Quotidien « Libération » du samedi 5 et dimanche 6 mai 2007. Article de Sylvestre Huet.

⁴ Commission Européenne. Plan d'action pour l'efficacité énergétique : réaliser le potentiel. [COM(2006)545 final]. http://europa.eu.int/comm/energy/efficiency/index_fr.htm

⁵ Quotidien « Libération » du jeudi 11 janvier 2007. Article de Julie Majerzak.

⁶ Directive cadre 2005/32/CE du 6 juillet 2005 visant à la fixation d'exigences en matière d'éco conception applicable aux produits consommateurs d'énergie.

⁷ Directive 2006/32/CE du 5 avril 2006 relative à l'efficacité énergétique dans les utilisations finales et aux services énergétiques et abrogeant la directive 93/76/CEE du Conseil. Journal Officiel de l'Union Européenne.

⁸ Communication de la Commission au Conseil Européen et au Parlement Européen. Une politique de l'énergie pour l'Europe. 10/01/2007.

⁹ Quotidien « Libération » du mercredi 10 janvier 2007. Article de Grégoire Biseau et Sylvestre Huet.

¹⁰ www.motor-challenge.fr

¹¹ www.mcp-europe.eu

¹² www.eu-promot.org

¹³ Quotidien « Libération » du jeudi 11 janvier 2007. Interview de Jean-Claude Gazeau, président de la mission interministérielle de l'effet de serre (MIES) par Alexandra Schwartzbrod.

¹⁴ L'Electricité en France en 2006 : une analyse statistique. Direction Générale de l'Énergie et des Matières Premières (DGEMP). Observatoire de l'économie de l'énergie et des matières premières. Observatoire de l'énergie - Télédéc 162 - DGEMP - 61, boulevard Vincent Auriol - 75703 Paris Cedex13. Mél :

dgemp.oe@industrie.gouv.fr <http://www.industrie.gouv.fr/energie>. Avril 2007

¹⁵ L'évolution de la demande énergétique en France dans les secteurs industriel, résidentiel, et des transports. DGEMP-DIDEME. © Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie, modifié le 16/10/2006

¹⁶ Répartition de la consommation d'électricité par usage et par secteur industriel en 2004. DGEMP-Observatoire de l'énergie. Source : Observatoire de l'Énergie d'après SESSI (EACEI 2004)

¹⁷ Source : Observatoire de l'Énergie d'après SESSI (EACEI 2004) © Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie, DGEMP, 27/04/2006

¹⁸ www.industrie.gouv.fr

¹⁹ Décret no 2006-603 du 23 mai 2006 relatif aux certificats d'économies d'énergie, et notamment son article 2 ; Arrêté du 30 mai 2006 relatif aux modalités d'application du dispositif de certificats d'économies d'énergie.

²⁰ DGEMP, www.industrie.gouv.fr/energie/certificats.htm

²¹ Egalement en version papier : « bonnes pratiques énergétiques dans l'industrie pour une meilleure efficacité et rentabilité », 15 fiches présentant des applications industrielles variées (dont VEV en pompage, ventilation et compression d'air). ADEME.

²² Clubs2e, 28 rue de la pépinière, 75008 Paris. www.clubS2E.org. Membres co-fondateurs du club :

- FG3E : Fédération française des entreprises Gestionnaires de services aux Equipements, à l'Énergie et à l'Environnement. <http://www.fg3e.fr/>

- Gimélec : Groupement des industries de l'équipement électrique, du contrôle commande et des services associés. <http://www.gimelec.fr/>. A organisé avec le concours de la revue J3E la conférence-débat « Efficacité & optimisation énergétiques pour les procédés industriels et des grandes infrastructures » le jeudi 7 décembre 2006 à Paris Nord Villepinte.

- SERCE : Syndicat des entreprises de génie électrique. <http://www.serce.fr/>

- UCF/FFB : L'UCF, Union Climatique de France, professionnels en climatisation, ventilation et chauffage. <http://www.ucf.fr/>

- UFE : Union Française de l'Electricité. <http://www.ufe-electricite.fr/>.

²³ Guide sur les services d'efficacité en France à destination des clients privés et publics. Club s2e, 20 juin 2007.

²⁴ Dossier « énergie, chassez le gaspi dans vos usines, revue Industrie et Technologie n°887, mars 2007 ».

Les nouvelles technologies au service des systèmes d'éclairage urbain

Georges ZISSIS¹, Robert RUSCASSIE¹, Patricia SAJOUS², Nazim PIGENET¹

¹ Université de Toulouse, LAPLACE, CNRS-UPS-INP, 118 rte de Narbonne, 31062 Toulouse cedex 9, georges.zissis@laplace.univ-tlse.fr

² Consultante en aménagement urbain, 24, rue de la Grosse Borne, 27200 Vernon

Résumé : L'Homme a toujours voulu continuer à vivre normalement après la tombée de la nuit, l'éclairage des villes est donc un besoin primordial car il aide à la sécurité routière et il facilite la circulation de tous les usagers. L'éclairage urbain consomme de par le monde 265 TWh d'électricité par an (presque 2% de l'électricité produite dans une année). Ainsi, les systèmes d'éclairage urbain hautement efficaces constituent un moyen d'aider les gouvernements à réduire la consommation énergétique des villes et par conséquent à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Par ailleurs, l'éclairage urbain est un fort poste de dépense pour les communes. Pourtant, impossible de réduire le nombre de lampes ou leur luminosité : les citoyens se sentent alors moins en sécurité et protestent vigoureusement. Il faut donc améliorer l'efficacité de l'éclairage, pour dépenser moins à service égal. L'objectif de cet article est de montrer comment les progrès technologiques de ces dernières années peuvent contribuer à la conception des systèmes d'éclairage urbain innovants respectueux des ressources énergétiques, de l'environnement et de l'utilisateur.

1. Introduction

L'éclairage électrique a profondément bouleversé notre vie quotidienne. Il serait aujourd'hui inimaginable de s'en passer, du moins dans les pays développés, et son utilisation ne fait que croître : On estime à environ 33 milliards le nombre de lampes électriques en service sur la planète. Les chiffres en termes d'énergie ne sont pas moins impressionnants. La consommation mondiale en éclairage dépasse les 2 650 TWh d'énergie électrique par an [Mils 02], soit 19% de la production mondiale d'électricité pour la même période (ceci équivaut à 3% de nos ressources énergétiques primaires annuelles). Compte tenu de l'augmentation de la population terrestre, l'amélioration des conditions de vie et la diminution de la fraction de population n'ayant pas accès à l'électricité, les besoins en éclairage de l'Humanité ne feront qu'augmenter. Ainsi, nos estimations actuelles montrent que la quantité de l'énergie utilisée pour l'éclairage pourrait être multipliée par 1,8-1,9 d'ici 2030.

Aujourd'hui, l'éclairage urbain représente, en moyenne, 10% de cette quantité (tandis que l'éclairage résidentiel correspond à 30% et celui des bâtiments à usage tertiaire et industriel sont de l'ordre de 60%) ; le graphique de la figure 1 illustre cette répartition. Ici le terme « éclairage urbain » couvre l'éclairage de tous les types de routes et voies de passage, il aide à la sécurité

routière et il facilite la circulation de tous les usagers. Mais, il joue aussi un rôle social important, en aidant à réduire la criminalité et le sentiment d'insécurité ; il peut également contribuer à animer une vie commerciale et sociale nocturne dans les centres-villes et les lieux touristiques.

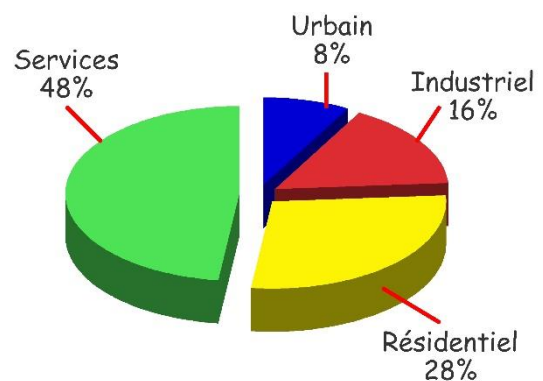


Figure 1 : Répartition par principal secteur d'activité des 2650 TWh d'électricités consommées dans le monde pour l'éclairage

Dans ce contexte, le secteur de l'éclairage urbain est en pleine expansion, et la consommation d'énergie correspondante croît très rapidement. Par ailleurs, les villes cherchent à mettre en place des systèmes d'éclairage urbain garantissant une meilleure qualité de vie et une sécurité accrue pour leurs citoyens sans oublier, bien sûr, la mise en valeur de la ville elle-même.

En premier lieu, les systèmes d'éclairage urbain hautement efficaces constituent un moyen d'aider les gouvernements à réduire la consommation énergétique des villes et par conséquent à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Ainsi, l'optimisation des lampes, des caractéristiques des ballasts et des propriétés optiques des luminaires, associée aux avantages induits par des systèmes spécifiquement conçus pour la perception visuelle de l'œil humain dans des conditions d'éclairage mésopique (c'est-à-dire à dire prenant en considération les caractéristiques spécifiques de l'œil en vision nocturne), offrent une capacité significative de réduction de la consommation énergétique pour l'éclairage routier. De tels systèmes permettraient d'améliorer aussi bien la qualité visuelle, le rendement énergétique que l'efficacité des systèmes d'éclairage. Pour l'Europe, l'économie d'énergie envisageable pourrait dépasser les 20 TWh (Ce qui représente quasiment 3 tranches de centrale nucléaire). Si on se réfère aux centrales thermiques, ces chiffres correspondent à une réduction de plus de 10 millions de tonnes de CO₂. La réduction des gaz à effet de serre qui en résulte pourrait atteindre environ 4 % de l'engagement total de l'UE prévue par les accords de Kyoto.

L'objectif de cet article est de montrer comment le développement des systèmes d'éclairage innovant aide à réaliser d'importantes économies d'énergie et à contribuer ainsi au développement durable. L'étude sera illustrée par l'utilisation des résultats récemment obtenus dans le cadre d'un projet de recherche européen de grande envergure mené dans le cinquième programme cadre (5^e PCRD) dont l'objectif était le développement de systèmes intelligents d'éclairage urbain (voir encadré). Mais, étudions tout d'abord les évolutions dans le domaine de l'éclairage urbain.

2. Les évolutions de l'éclairage urbain

Aujourd'hui, et depuis plusieurs années déjà, les produits les plus couramment utilisés pour l'éclairage urbain arrivent à "saturation" [ZIS 05]: Dans plusieurs parties de l'Europe, l'éclairage des routes utilise exclusivement des lampes à sodium à basse pression (LPS). Les lampes LPS sont facilement reconnaissables par leur lumière orange caractéristique et par leurs formes étroites et allongées (sur les autoroutes belges par exemple). Bien que les lampes LPS constituent une source de lumière très efficace (200 lm/W), leur capacité à restituer les couleurs est très médiocre en raison de leur émission monochromatique. Or, les recherches récemment effectuées concourent à démontrer qu'un bon rendu des couleurs offre une sécurité accrue pour l'éclairage des routes. Ce type de produit peut donc être considéré comme "décadent" et un grand effort est

actuellement consenti pour en limiter l'utilisation. La source de lumière la plus utilisée pour l'éclairage des routes en Europe est la lampe à sodium haute pression (HPS). Ces lampes sont plus intéressantes que les lampes LPS mais produisent-elles aussi une lumière notablement orange à laquelle de nombreux usagers sont hostiles, et comme illustré plus loin dans la présente étude, les lampes HPS, dans des conditions de variation de l'intensité lumineuse (gradation), dégradent sérieusement les conditions de sécurité sur les routes.

L'industrie de l'éclairage est en permanence à la recherche de nouvelles technologies qui pourraient remplacer (ne fût que partiellement) les produits actuels. Ces nouvelles technologies doivent être plus efficaces, mieux adaptées aux exigences du monde moderne et, bien entendu, garantir un taux de croissance plus élevé pour l'industrie proprement dite. Ces dernières années, des sources lumineuses blanches, telles que les lampes à décharge aux halogénures (ou iodures) métalliques (MHL) ont commencé à être utilisées pour l'éclairage routier et public non seulement pour améliorer la qualité esthétique des installations mais également pour quantifier les améliorations en termes de sécurité routière lorsque des sources lumineuses offrant un bon rendu des couleurs sont employées. L'apparition récente des lampes à décharge aux halogénures métalliques avec un tube à arc en céramique (C-MHL) a donné lieu à une nouvelle génération de sources lumineuses à haute efficacité, disposant d'un indice élevé de rendu des couleurs, ce qui les rends particulièrement bien adaptées aux applications d'éclairage extérieur (figure 2).



Figure 2 : Lampe C-MHL 150W développée dans le cadre du projet NumeliTe™

Cette dernière génération de lampes à décharge aux halogénures métalliques présente des atouts supplémentaires par rapport aux anciennes lampes à tubes à arc fabriqués à partir de silice fondue : les plus importants pour l'éclairage des routes sont une efficacité lumineuse supérieure et une durée de vie plus longue. Enfin et surtout, la ville et ses habitants peuvent tirer pleinement profit des possibilités offertes par les nouvelles technologies. Il convient ainsi de souligner premièrement les économies substantielles que les villes peuvent réaliser sur leur budget d'éclairage urbain,

deuxièmement le fait que les usagers de la route se sentent dans de meilleures conditions de sécurité lorsqu'ils circulent ou conduisent dans la ville.

Par ailleurs, Il existe aujourd'hui de nombreux dispositifs permettant de réguler et/ou de faire varier la puissance des lampes. Lorsque ces dispositifs sont situés dans l'armoire de commande on parle de « régulateurs/variableurs », et lorsqu'ils se situent au niveau des points lumineux on parle de « ballasts électroniques ». Outre leur rôle stabilisateur pour les lampes, ces dispositifs permettent de moduler la puissance absorbée par les sources de lumière (et donc leur flux lumineux) en fonction de l'heure. De plus, les ballasts électroniques, en maintenant à une valeur proche de 1 le cos ϕ des installations, contribuent à réduire considérablement les pertes en lignes survenant sur les réseaux d'alimentation d'éclairage public sous dimensionnés. La rentabilité économique de tels systèmes devra donc être soigneusement étudiée au regard du service rendu et comparée aux autres solutions proposées plus haut. Surtout dans le cas où le processus de gradation ne respecte pas la physico-chimie de la lampe ce qui peut raccourcir considérablement sa durée de vie et ses performances. Aujourd'hui, une nouvelle génération des lampes C-MHL a vu le jour, ces lampes du sont spécialement conçues pour supporter cette gradation sans diminution de leurs performances et durée de vie. De plus, pour ces lampes lorsque la puissance est réduite, le spectre émis est volontairement décalé vers les plus faibles longueurs d'onde (bleu). Ceci pour prendre en compte les particularités de l'œil humain, afin d'accroître les gains d'énergie sans dégrader notablement le confort et l'uniformité. On exploite ici la zone de vision « mésopique ». Mais, qu'est-ce la vision mésopique ?

3. La vision mésopique et l'éclairage urbain

L'une des caractéristiques les plus fascinantes de la vision humaine est sa capacité à bien voir dans une plage d'éclairage allant du clair de lune à la lumière du soleil, ce qui correspond à plusieurs ordres de grandeur en termes d'intensité lumineuse. Ce fonctionnement est atteint par le biais de l'implication de deux types de photorécepteurs : les cônes, qui permettent de voir dans des conditions de forte luminosité et les bâtonnets, qui permettent de voir dans des conditions de faible luminosité. En effet, la vision des personnes peut être caractérisée par trois plages de luminance. Les conditions de vision « photopique » (vision à l'aide des cônes) se réfèrent à une valeur de luminance supérieure à 10 cd/m², par exemple la lumière du jour. Les conditions de vision « scotopique » (vision à l'aide des bâtonnets) se réfèrent à une valeur de luminance

inférieure à 0,01 cd/m², par exemple la lumière ciel étoilé. La plage comprise entre 0,01 et 10 cd/m² est appelée « mésopique », par exemple éclairage au clair de lune. La vision mésopique décrit donc la zone de transition entre la vision à l'aide des bâtonnets (scotopique) et la vision à l'aide des cônes (photopique), là où les signaux des bâtonnets et des cônes sont actifs simultanément pour contribuer à la réponse visuelle. La vision mésopique couvre approximativement quatre unités logarithmiques et comporte une plage de niveaux de luminosité rencontrée souvent dans l'environnement urbain éclairé. A tous égards, il n'existe pas encore de normes acceptées au niveau international concernant les mesures du flux lumineux qui reflète la sensibilité spectrale de l'œil dans la plage mésopique. Tout le monde reconnaît toutefois que le système de la photométrie dans le domaine mésopique est nécessaire afin d'assurer que l'éclairage dans les environnements urbains.

Mais quelle est l'incidence de la vision mésopique dans le domaine qui nous intéresse ?

Les performances énergétiques des sources lumineuses sont souvent mesurées en termes d'efficacité lumineuse, η , c'est-à-dire de quantité de lumière produite dans le visible (flux lumineux, Φ_{vis}) en lumen par puissance fournie (P_{el}) en watt. Cette quantité est définie par la relation suivante :

$$\eta = \frac{\Phi_{vis}}{P_{el}} = \frac{\kappa_o \int_{380}^{680} P(\lambda)V(\lambda)d\lambda}{P_{el}} \quad \text{avec } [\kappa_o = 683 \text{lm/W}]$$

Toutefois, la définition du lumen est dérivée de la fonction d'efficacité lumineuse spectrale pour la vision photopique uniquement : La sensibilité de l'œil est définie dans les normes publiées par la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) pour les conditions photopiques et scotopiques. Dans les conditions photopiques, la sensibilité de l'œil humain est à son maximum à 555 nm. Lorsque la luminance diminue, la sensibilité maximale se déplace vers des longueurs d'onde inférieures. Dans les conditions scotopiques, elle est atteinte à 507 nm. Ces données sont connues sous le nom de fonctions d'efficacité lumineuse spectrale ou courbes $V(\lambda)$ (figure 3).

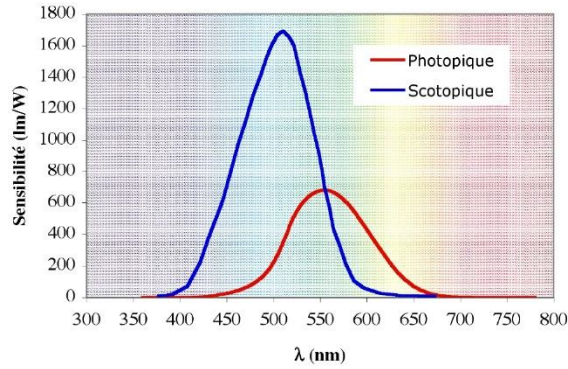


Figure 3 : La sensibilité de l'œil humain en conditions photopique et scotopique.

En réalité, sous conditions photopiques la sensibilité de l'œil humain atteint son maximum à 555 nm et une puissance rayonnée de 1W à cette longueur d'onde correspond, selon les normes, à un flux lumineux de 683 lm. Lorsque la luminance diminue, la sensibilité maximale se déplace vers des longueurs d'onde inférieures (vers le bleu). Ainsi, le pic de sensibilité dans les conditions de vision scotopique se situe à 507 nm mais dans ce cas une puissance d'entrée de 1W correspond à 1 700 "lumens scotopiques". Donc notre œil est bel et bien plus sensible à la lumière dans la pénombre qu'en plein jour, surtout si la lumière utilisée se situe dans la région des courtes longueurs d'onde du spectre.

Dans le domaine mésopique l'efficacité de la source lumineuse dépend étroitement du spectre d'émission de la lampe¹. Selon sa répartition énergétique, l'efficacité de la source peut aussi bien augmenter ou diminuer [ZIS 06]. Nous allons illustrer ce phénomène à l'aide d'une expérience virtuelle :

Pour simplifier, la figure 4 montre deux répartitions spectrales énergétiques théoriques émises par deux lampes virtuelles. Le spectre à deux raies correspond aux émissions du thallium à 535 nm et du sodium à 590 nm. Le spectre à trois raies dispose en outre d'un rayonnement correspondant à l'émission de spectre de l'indium à 450 nm. La puissance totale rayonnée dans chaque spectre est de 30 W. En utilisant les normes existantes dans les conditions de vision photopique on peut prouver que la première lampe produit un flux de 16 900 lm tandis que la deuxième un flux de 14 800lm.

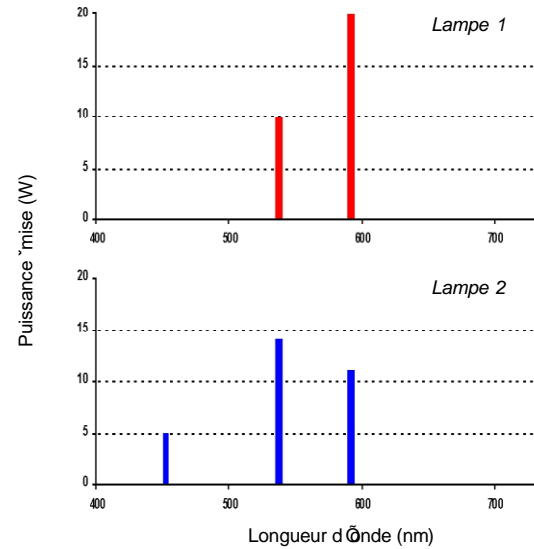


Figure 4 : Spectre des deux lampes « virtuelles »

La Figure 5 illustre ces deux spectres en relation avec les courbes de sensibilité de l'œil en vision scotopique, mésopique et photopique (l'ensemble étant normalisé à l'unité).

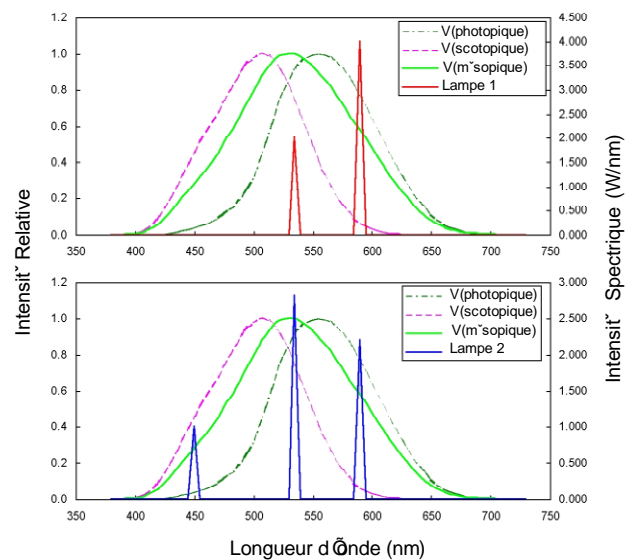


Figure 5 : Relation entre les courbes de réponse en vision scotopique, mésopique et photopique et répartition spectrale énergétique caractéristique

La courbe de vision mésopique représentée ici est obtenue à partir de la méthode décrite par He et al. [HE 97] à une luminance de 0,5 cd/m². Nous pouvons donc calculer le flux lumineux exprimé cette fois en « lumens mésopiques ». Nous avons utilisé le terme « lumens mésopiques » dans cette étude pour représenter la

¹ En toute rigueur, la définition de la réponse de l'œil humain sous conditions mésopiques n'est pas encore normalisée

somme des produits de l'énergie spectrale et la courbe de réponse en vision mésopique à chaque longueur d'onde :

$$\Phi_{mes}(\lambda, L) = \kappa(L)V_{mes}(\lambda, L)$$

Bien évidemment cette valeur dépend maintenant de la valeur de luminance, L . La figure 6 montre les lumens mésopiques calculés en fonction de la luminance pour les deux spectres.

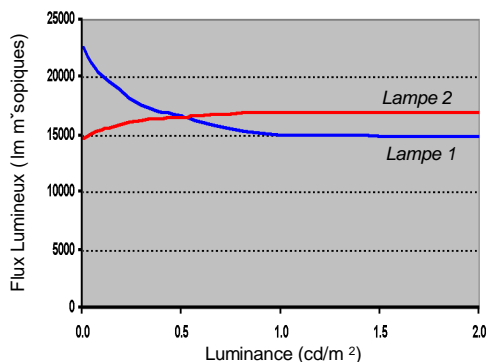


Figure 6 : Lumens mésopiques en fonction de la luminance

Il est évident que lorsque la luminance décroît, les lumens mésopiques diminuent dans le cas du spectre à deux raies et augmentent dans le cas du spectre à trois raies. Cet effet donne lieu à l'opportunité de concevoir la répartition spectrale énergétique qui montre une augmentation de l'efficacité lumineuse lorsque les niveaux de luminosité sont réduits à partir du domaine photopique. Cette augmentation de l'efficacité lumineuse sous une luminance faible, tel qu'utilisée dans l'éclairage des routes, peut alors être considérée comme une économie d'énergie plutôt qu'une augmentation du niveau d'éclairage "effectif".

Ce principe s'applique aux lampes réelles. A partir de ces observations, nous pouvons conclure que la gradation lumineuse de 150W à 70W (correspondant à une réduction de 53% de la puissance d'alimentation) pourrait se traduire par une variation importante de la couleur avec tendance au « bleuissement ». Comme nous l'avons vu cette variation est profitable à la visibilité dans les conditions de vision mésopique.

4. Un exemple concret : l'expérience d'Albi

Le projet NumeLiTe™ mené sur une période de trois ans en collaboration avec onze partenaires universitaires et industriels de six pays européens, se proposait de mettre en valeur leurs compétences dans divers domaines de la conception des composants pour donner naissance à un ensemble d'outils interactifs permettant de concevoir un système complet d'éclairage. Il s'agissait en particulier d'améliorer l'efficacité lumineuse des sources ainsi que leur rendu des couleurs

— c'est-à-dire d'avoir une lumière qui reproduit bien les couleurs du monde qui nous entoure sans pour autant polluer le ciel nocturne par une lumière parasite.

L'objectif final du projet était d'installer un nouveau système d'éclairage urbain mis en oeuvre dans la ville d'Albi. Cette ville chargée d'histoire de 70 000 habitants est la capitale du Tarn. Elle est connue pour sa cathédrale Sainte Cécile (classée au patrimoine mondial de l'Unesco) et pour sa collection des peintures de Toulouse-Lautrec.

Les recherches menées dans le cadre du projet NumeLiTe™ conduisirent à la création de lampes aux halogénures métalliques avec enveloppe céramique (150 W) produisant, avec une excellente efficacité lumineuse (98 lm/W), une lumière blanche de très bonne qualité (IRC 97). Ces lampes supportent les variations d'intensité lumineuse (gradation) sans dégradation notable de leurs caractéristiques. La durée de vie de ces nouvelles lampes est de 16 000 h alors que celle des lampes existantes de technologies similaires ne pouvait dépasser les 8 000 h. Par ailleurs l'enveloppe céramique, combinée au design global de la lampe (géométrie, électrodes...), garantissent une excellente stabilité de couleur tout au long de la durée de vie. Elles fonctionnent indifféremment en position verticale ou horizontale. Le temps de montée en régime est bien plus court que celui d'une lampe à sodium de puissance équivalente. La tension nominale reste stable ($\pm 5\%$) pendant la majeure partie de la durée de vie tandis que pour la plupart des lampes sodium haute pression cette même tension augmente fortement avec l'âge de la lampe.

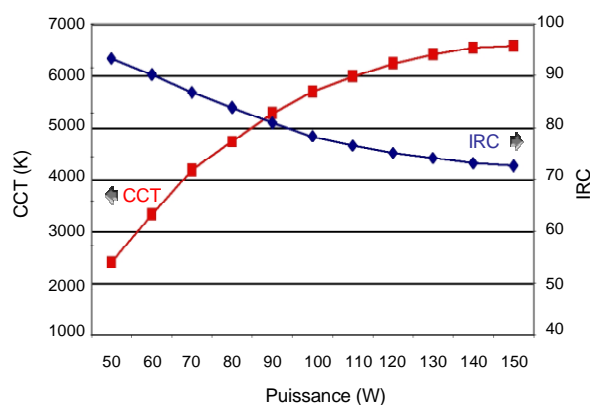


Figure 7 : Variation de température de couleur (CCT) et de l'indice de rendu de couleur (IRC) de la lampe NumeLiTe™ en fonction de la puissance électrique.

Comme le montre la figure 7 ci-dessus, la réduction de la puissance absorbée d'une lampe à décharge aux halogénures métalliques avec tube à arc en céramique de 150 W met en relief des variations importantes des propriétés photométriques. La température de couleur

proximale (CCT) augmente et l'indice de rendu des couleurs (IRC) diminue.

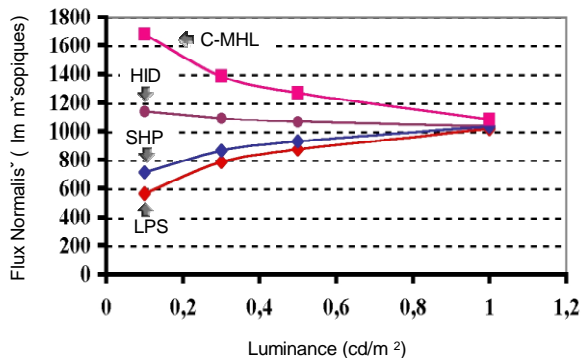


Figure 8 : Comparaison des différents types de lampes utilisées en éclairage public. C-MHL : lampe à halogénures métalliques céramique ; HID : lampe à mercure haute pression (« ballon fluo ») ; SHP : sodium haute pression ; LPS : sodium basse pression.

La figure 8 montre les résultats du calcul lorsque le flux lumineux de la source a été normalisé à 1 000 lumens photopiques, on peut voir que les lampes aux halogénures métalliques d'une température de couleur proximale de 4000 K, à un niveau de luminance de 0,1 cd/m² est d'environ deux fois et demi plus efficace qu'une lampe à sodium à haute pression qui est aujourd'hui la plus couramment utilisée dans nos villes. Comparées donc aux autres lampes de technologies existantes, les nouvelles lampes aux halogénures métalliques assurent une meilleure visibilité dans les conditions de gradation lumineuse correspondant à la vision mésopique. Autrement dit, les systèmes d'éclairage basés sur ce principe assureraient un meilleur niveau de sécurité et des économies d'énergie substantielles. De toute évidence, la lumière blanche générée par ces lampes améliore le confort visuel. De plus, elle est mieux perçue par l'utilisateur final. Tous les points évoqués plus haut ont été soumis à essai et confirmés par le démonstrateur du projet NumeLiTe™ installé à Albi.

Ces lampes sont placées dans des luminaires dont les réflecteurs sont spécialement dessinés pour mieux distribuer la lumière sur la route et éviter les problèmes de pollution lumineuse (seul 3% du flux s'échappe vers le ciel). Deux types de luminaires sont concernés. Un direct, « Decostreet »®, destiné à un éclairage purement fonctionnel et un indirect, « Aviso »® destiné également à un éclairage fonctionnel mais s'intégrant mieux dans l'environnement urbain. Ce dernier (figure 9) est équipé d'un réflecteur « mosaïque » composée de 24 tuiles

composites qui assurent une meilleure distribution de la lumière sur la route².

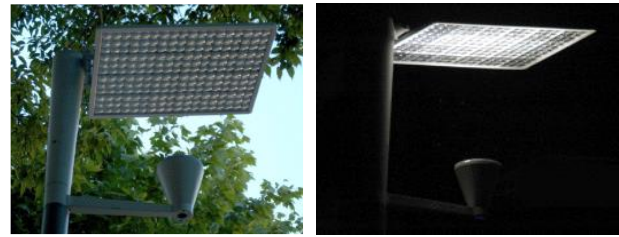


Figure 9 : Luminaire Aviso® développé dans le cadre du projet NumeLiTe™

Les lampes sont alimentées par de nouveaux ballasts électroniques. Les ballasts électroniques sont moins encombrants et moins lourds que les ballasts ferromagnétiques. Ils assurent à la fois les fonctions d'amorçage, de contrôle de montée en régime, et de maintien de la puissance absorbée à un niveau défini. La durée de vie de ces ballasts est estimée aux alentours 40000 h ce qui représente environ 10 ans pour une utilisation en éclairage urbain, cependant cette valeur est fortement dépendante des conditions de fonctionnement notamment du point de vue de la température [YAN 06]. La forme d'onde du courant fourni par le ballast à la lampe est un créneau basse fréquence ce qui permet d'assurer une bonne continuité de la puissance fournie à la lampe à l'échelle d'une période. La décharge est ainsi plus stable, en particulier en gradation. La puissance fournie à la lampe peut être régulée grâce à une boucle de contrôle et maintenue optimale toute au long de la durée de vie de la lampe même en cas de fluctuation de la tension réseau. Comme nous le verrons par la suite, le ballast électronique présente également la spécificité de pouvoir imposer une montée en régime à la lampe. D'un point de vue énergétique, ces ballasts permettent, suivant les modèles, de faire varier la puissance fournie à la lampe de manière continue ou bien par une série de paliers jusqu'à 50% de la valeur nominale pour 60% de réduction du flux lumineux.

En analysant les données accumulées sur site par un enregistreur autonome au cours d'une semaine (figure 10), on constatera qu'il est ainsi possible de fixer un ou plusieurs niveaux d'éclairement réduits qui seront intermédiaires entre la puissance nominale et la gradation maximale. En conséquence, l'éclairement commence à être réduit en milieu de soirée lorsque la fréquentation du site baisse mais qu'un certain confort doit subsister, pour tomber à son niveau minimal plus tard dans la nuit lorsque l'activité nocturne a disparu.

²Ce luminaire a été par ailleurs primé à Londres par «The Lighting Design Awards 2004 ».

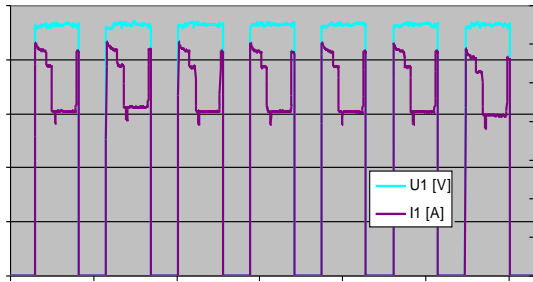


Figure 10 : Evolution de la tension réseau et du courant absorbé par une rue équipée de ballasts électroniques gradables sur une durée d'une semaine [RUS 07].

Ces ballasts gradables présentent enfin l'avantage d'avoir un rendement supérieur à 90% et des pertes proportionnelles à la puissance qu'ils débitent (donc réduites en gradation). Aujourd'hui les ballasts NumeLiTe™ permettent la gradation en sept niveaux, mais, une gradation continue est déjà en projet pour les versions futures. Du point de vue du réseau électrique, ces ballasts intègrent un étage d'absorption sinusoïdale de courant (PFC) qui permet d'obtenir un facteur de puissance compris entre 0,93 et 0,97. On a donc une puissance absorbée par l'ensemble du système qui est quasi sinusoïdale et une distorsion harmonique faible (THDi proche de 9%).

Ces nouveaux ballasts électroniques intègrent un microcontrôleur qui permet d'ajouter un certain nombre de fonctionnalités dont, en particulier, la possibilité de pouvoir faire communiquer le ballast avec l'extérieur. Pour ce faire, on adjoint au ballast un module d'interface de communication (par courant porteur ou par radio fréquence) qui permet la transmission des informations sur de longues distances. Enfin, un ordinateur couplé à une centrale de télégestion contrôle l'ensemble de l'installation (figure 11).

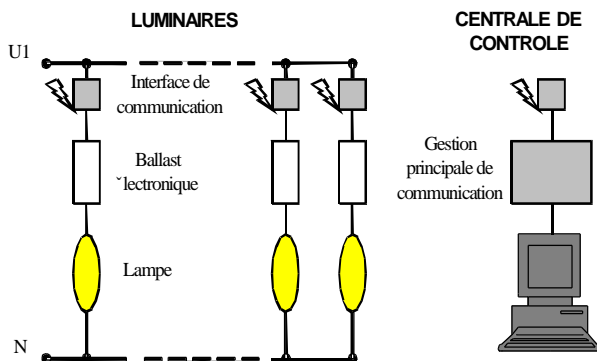


Figure 11 : Schéma de principe d'une installation utilisant des ballasts électroniques gradables avec commande centralisée

Dans le cadre du projet le protocole DALI (Digital Addressed Lighting Interface - Interface d'éclairage à adressage numérique) qui est déjà un standard pour l'éclairage intérieur à été transposé à l'éclairage urbain. Ainsi, un contrôle centralisé permet la mise en place d'un système d'éclairage plus performant et moins coûteux en termes de maintenance pour les municipalités. Dans notre cas chaque point lumineux (candélabre) peut être commandé à distance (liaison par courant porteur ou liaison hertzienne en radiofréquences) par une station centrale installée à cet effet à la mairie d'Albi. Ceci permet de contrôler la quantité de lumière à chaque instant et de programmer le fonctionnement du système. Enfin, les radiofréquences utilisées pour la commande du système, offrent des multiples possibilités de services additionnels pour la ville (localisation des bus ou alarmes sociales, télé relevés des compteurs...).

On s'achemine ainsi vers un système intelligent au service des utilisateurs. Par ailleurs, l'amortissement se fait dans une période allant de 5 à 12 ans en fonction de options choisies. Ce temps de retour à investissement est relativement court pour un système d'éclairage dont la durée de vie moyenne est supérieure à 25 ans. On voit donc clairement l'intérêt d'un système d'éclairage urbain plus économique, qui met en valeur la ville et qui contribue à l'amélioration de la qualité de vie des citoyens. Cette démarche s'inscrit bien dans la direction du développement durable et l'aménagement du territoire.

Le démonstrateur du projet consiste en quatre axes (routiers et semi-piétonniers) d'accès au centre-ville, et un axe décentralisé tous dotés des nouveaux luminaires (figure 12).

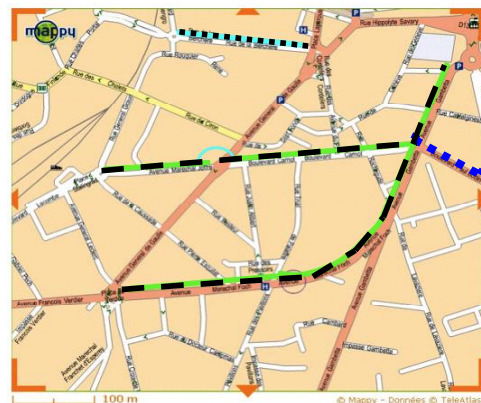


Figure 12 : L'implantation du démonstrateur dans la ville d'Albi. En pointillé long la partie contrôlée par courant porteur, en petit pointillé la partie commandée par radiofréquences (la partie en petit pointillé à droite correspond à l'installation supplémentaire après la fin du projet).

A la fin du projet plus de 125 lampadaires ont été installés et après la fin du projet les services de la ville ont équipé une nouvelle rue avec 10 candélabres supplémentaires. Il faut souligner que la ville d'Albi vient d'obtenir un de trois prix du concours national « lumière dans la ville », le système NumeLiTe™ a contribué largement à l'obtention de cette récompense. Aujourd'hui d'autres villes sont en train d'adopter ce système pour leur éclairage.

Les nouvelles installations d'éclairage routier de la ville d'Albi ont permis de réaliser une économie d'énergie de 40 à 45% par an. Une simple extrapolation de ces économies d'énergie en Europe occidentale montre que les gains s'élèvent à plus de 1 MTEP (millions de tonnes d'équivalent pétrole) par an. En outre, l'étude de satisfaction des utilisateurs finaux (piétons, automobilistes et commerçants) confirme que ce système offre une meilleure qualité de vie et aux usagers de la route apporte un niveau de sécurité plus élevé en environnement urbain. Mais, que pensent les citoyens – utilisateurs du système ?

5. L'impression de la population

L'étude NumeLiTe™ menée à Albi s'est achevée par une contribution des sciences sociales³. En effet, l'obligation de mener une enquête auprès des usagers était inscrite dans le cahier des charges. Ce paragraphe présente la méthode qualitative utilisée et baptisée « Collecte des Perceptions En Situation » (CPES) ainsi que les résultats obtenus.

En effet, La question de la place de l'utilisateur dans l'éclairage extérieur est investie depuis peu [MOS 05]. Ce qui ne remet pas en cause les normes et recommandations édictées pour l'éclairage. Cela fait plutôt prendre conscience que ces recommandations sont avant tout le fait de calculs se référant aux caractéristiques de l'œil humain. Par ailleurs, l'éclairage urbain n'est pas une préoccupation des usagers. Il va de soi que certains espaces soient éclairés la nuit. D'après H. Glodt, les usagers ne sont pas détenteurs d'une culture de l'éclairage [GLO 03]. Or, il ne faut pas négliger le mouvement général qui traverse actuellement la société visant une demande accrue de communication : concertation dans les collectivités locales, plans marketing des entreprises.

En tenant compte des recherches précédentes, nous avons ici pour ambition d'ouvrir de nouvelles perspectives à l'enquête sociale dans le domaine de l'éclairage extérieur. C'est-à-dire que nous voulions tenter de dépasser le stade du recueil d'opinions dans

lequel les enquêtes sociales sont actuellement le plus souvent cantonnées. Ainsi, la CPES se fonde sur 3 caractéristiques majeures :

1. recueil des perceptions visuelles de l'utilisateur avant les opinions,
2. nécessité d'interroger l'utilisateur dans l'espace éclairé sur lequel on veut le faire réagir afin d'éviter de solliciter sa mémoire,
3. nécessité de mettre l'utilisateur en situation de déplacement

En se basant sur l'ouvrage de l'AFE, « Le vocabulaire de l'éclairage », la CPES peut compléter les connaissances des phénomènes relatifs à la vision. Le choix des thèmes indiqués dans le Tableau 1 découle :

- de la demande du consortium NumeLite™ et de l'ADEME qui souhaitaient un travail sur les perceptions visuelles,
- d'un compromis entre membres du consortium sur les thèmes majeurs à analyser.

Tableau 1 : Les thèmes étudiés durant l'étude à Albi

Couleurs des lampes	
Variation du flux	
Eblouissement	Recueil des perceptions visuelles
Niveau d'éclairage	
Uniformité	
Confort visuel	
Sécurité	Recueil des opinions (ou représentations)
Impressions générales	

Le caractère innovant de l'enquête, le champ de recherche plutôt vierge, le nombre de thèmes à aborder, la nécessité de s'entretenir longuement avec les personnes ont imposé la mise en place d'une enquête qualitative à entretien semi – directif. Nous avons donc proposé une série de questions avec amorces de réponse. La partie non directive se traduit par le recueil des commentaires ainsi que des questions ouvertes qui feront l'objet d'une analyse de contenu.

L'échantillon de population choisi pour cette étude est caractéristique mais non strictement représentatif. C'est-à-dire qu'il permet de relever les différentes perceptions que suscite le thème de l'enquête mais nous ne pouvons extrapoler leurs représentativités en pourcentage de la population totale. Nous avons interrogé 25 personnes en tant que piétons et automobilistes en les faisant cheminer ou conduire sur

3 Cette étude a été réalisée avec l'aide de l'ADEME

un itinéraire prédéterminé à travers les différentes ambiances lumineuses.

Cette étude de satisfaction des usagers de la ville d'Albi a montré que plus que 90% d'un échantillon implicite d'habitants considèrent que le nouveau système d'éclairage constitue une avancée significative en matière d'amélioration de la qualité de la vie (meilleure visibilité, meilleur rendu des couleurs, moins d'éblouissement) dans la ville. La couleur blanche est jugée « plus naturelle » que la couleur des lampes sodium et cela rassure car il y a moins de distorsion entre le paysage urbain perçu de jour et celui perçu de nuit. Enfin, presque 100% des personnes interrogées reconnaissent l'importance envi-ronnementale de ce type d'actions et encouragent vivement les autorités de la ville à s'engager fermement dans cette direction.

Références

[GLO 03] Glodt H., "Le vécu de l'éclairage urbain", Université Paris X - Nanterre, Paris (2003)

[HE 97] He Y., M.Rea, A.Bierman and J.Bullough J. Illumin. Eng. Soc., pp.125-138 (1997)

[MIL 02]: Mills P., "Why we're here: The \$230-billion global lighting energy bill", Proc. 5th Right Light Conference, pp. 369-385, Nice (France), May 2002.

[MOS 05] Mosser S., "Eclairage urbain, vers des démarches d'évaluation et de régulation : L'exemple de la démarche DEVISE", dans *collection Guide technique LCPC*, Paris (2005)

[RUS 07]: Ruscassié R., J. Kraus, G. Zissis "Comparaison de deux types de systèmes gradables pour éclairage urbain", Proc. Electrotechnique du Future, pp. 110-113, Toulouse (France), Septembre 2007.

[YAN 06] Yan W., S. Y. R. Hui, "Dimming characteristics of large scale High Intensity Discharge (HID) lamp lighting networks using a central energy saving system", IEEE IAS Annual Conference, Tampa, USA, 2006.

[ZIS 05] Zissis G., Vers de nouvelles Sources de Lumière, dans *Technologies du Futur - Enjeux de Société*, pp. 230-232, Editions Omniscience, ISBN 2-916097-00-7 (2005)

[ZIS 06] Zissis G., S.Mucklejohn, Standardising Mesopic Vision Conditions and Incidence on Light Sources Science and Technology, dans *Intenational Standardization as a Strategic Tool, IEC Centenary Cahllenge*, 1st Prize paper, pp. 119-130, Editions IEC Gevena, ISBN 2-8318-8867-0 (2006)

Encadré : Le projet NumeLiTe

Le projet Européen NumeLiTe (NNE-01-0282), développé en 3 ans (du 1/1/02 à 31/12/04), a mobilisé un consortium pluridisciplinaire de 11 partenaires, publics et privés, provenant de 6 pays Européens :

France : CPAT - Université Toulouse 3 (Toulouse) : Laboratoire public spécialisé dans la modélisation et le diagnostic des sources de lumière ; Laboratoire d'Electrotechnique de Montpellier de l'Université Montpellier 2 (Montpellier) : Laboratoire public spécialisé dans l'électronique de puissance et les convertisseurs d'énergie électrique ; Sinapse SA (Région Parisienne) PME spécialisée dans la télégestion des réseaux d'éclairage urbain par voie hertzienne ; Thorn Europhane (Les Andelys) : Partenaire industriel concepteur et fabricant de luminaires pour éclairage urbain ; Ville d'Albi (Services Techniques) : Utilisateur final du démonstrateur

Royaume Uni : General Electric Lighting Ltd (Leicester) : Partenaire industriel, producteur et concepteur des lampes ; TRL Ltd (Crowthorn) : Organisme de recherche à statut privé (anciennement Transport Research Laboratory) spécialisé dans les problèmes de sécurité liés à l'éclairage public, routier. Il étudie aussi le comportement de l'œil humain dans des conditions de vision « mésopique »

Portugal : Département de Physique de l'Université de Madère (Funchal) : Laboratoire public spécialisé dans la modélisation des électrodes des lampes à décharge électrique

Allemagne : Luxmate WSW (Munich) : Partenaire industriel spécialisé dans la gestion des systèmes d'éclairage par courant porteur.

Suisse : Knobel (Enenda) : Partenaire Industriel concepteur et fabricant des ballasts électroniques pour lampes à décharge

Grèce : Laboratoire Chimie Haute Température FORTH ICE/HT, (Patras) : Organisme de recherche spécialisé à la détermination des données thermochimiques nécessaires pour la modélisation des sources de lumière utilisées par le système NumeLiTe.

C'est l'équipe Française "Sources Intenses de Photons" au sein du Centre de physique des Plasmas et de leurs Applications de Toulouse (CPAT), aujourd'hui LAPLACE, qui a été coordinateur du projet NumeLiTe.

Le coût total du projet s'élève à 6,6 millions d'Euros. Il a été subventionné par la communauté européenne à hauteur de 2,8 millions d'Euros. Les membres Suisse et Anglais du consortium ont été subventionnés par leurs gouvernements pour un montant de 0,5 millions d'Euros chacun.

NumeLiTe est une marque déposée appartenant au consortium du projet.

Gestion de l'énergie en traction ferroviaire

Gilles ARNAUTOU, CIM SNCF(Centre d'Ingénierie du Matériel), LE MANS

Romain DARDEVET, Professeur Agrégé CPGE ATS, Lycée Emmanuel Héré NANCY

Marie-Michèle LE BIHAN Professeur Agrégé, Lycée Jules Ferry VERSAILLES

Résumé : Le souci de maîtriser l'énergie est une préoccupation de plus en plus importante à la SNCF. Nous allons analyser au cours de cet article l'influence de deux paramètres déterminants sur le bilan énergétique global pour une performance de vitesse moyenne constante : en premier lieu l'impact de la conduite du train (Marche tendue ou détendue) sur un parcours plat de 100km et ensuite l'influence de la puissance motrice installée sur un parcours de type banlieue.



Figure 1 : Vue d'artiste de la nouvelle automotrice île de France, baptisée la Francilienne, construite par Bombardier, qui sera le premier train à bénéficier des dernières avancées en matière d'économie d'énergie.
Mise en circulation prévue Juin 2009.

1. Introduction

Les économies d'énergie et l'efficacité énergétique prennent une part de plus en plus importante dans les critères de choix d'un matériel neuf et dans la gestion des trains en exploitation. Dès 2008, RFF, promoteur de l'infrastructure demande à la SNCF d'implanter un compteur d'énergie sur tous les matériels neufs pour facturer la consommation au plus juste.

Nous avons étudié à l'aide d'un logiciel de simulation cinématique et de calcul d'énergie, l'influence de deux facteurs très différents sur la consommation : **le mode de conduite** lié à l'exploitation du train et **la puissance motrice installée** (notamment dans le cas de freinage par récupération). Ces deux axes d'efficacité énergétique font partie des priorités d'étude pour les nouveaux marchés.

2. Bilan énergétique

Où va l'énergie prélevée à la caténaire ?

2.1. A l'arrêt : Un train de voyageur consomme de l'énergie pour assurer le confort des voyageurs (éclairage, confort thermique...). Ce temps où le train ne roule pas, mais où les auxiliaires de confort fonctionnent, est très variable selon l'exploitation : grande ligne, Transilien, TER.

C'est d'ailleurs sur les auxiliaires de confort que les principales actions d'économie d'énergie sont engagées :

- Éclairage : Utilisation des nouvelles technologies à LED plutôt qu'à halogène ou à fluorescence.
- Climatisation : Identifier les périodes de longue attente pour diminuer les consommations et arrêter

le chauffage ou la climatisation pour refaire un pré conditionnement au moment du départ.

- Renouvellement d'air : poste très important impactant fortement la consommation pour le maintien de la température (45% en chauffage et 35% en réfrigération du bilan énergétique). L'implantation du comptage de passagers permettra de réguler ce renouvellement d'air.
- Gestion de l'ouverture des portes.

2.2. En Circulation :

2.2.1. Les pertes : ce sont les énergies consommées par le train qui ne participent pas à la performance.

- Les Auxiliaires de Traction qui se décomposent en deux familles :
 - le réseau Basse Tension 72 V ou 110 V qui assure la mise sous tension des équipements tels que les relais, les électroniques de commande, les équipements de sécurité.
 - le réseau Moyenne Tension 400 V qui permet l'alimentation des systèmes de refroidissement des équipements de puissance (transformateur, moteurs de traction)
- La Résistance à l'AVancement (RAV), de forme polynomiale, modélise les différentes forces de frottements que doit vaincre le train :

$$RAV = A + B.v + C.v^2$$
 Où A représente les frottements dans les paliers et les engrenages de la chaîne de traction, B.v représente les efforts de frottement des boudins des roues sur les faces latérales des champignons de rail. Le terme C.v² est attribué à la résistance de l'air. Ces coefficients (A en k.N, B en k.N/(km/h) et C en k.N/(km/h)²) sont d'abord déterminés de manière empirique puis affinés lors des essais en ligne.
- Les pertes électriques et mécaniques de la chaîne de traction : tous les éléments par où transite le courant : du transformateur au moteur, sont le siège de pertes que nous pouvons évaluer grâce aux courbes de rendement représentées en figure 4. De plus, on estime les pertes mécaniques au sein du réducteur (de l'arbre moteur jusqu'aux roues) à environ 3%.
- Pertes dues aux freins mécaniques : le frein électrique est prioritaire sur le frein mécanique. Un complément d'effort de retenue mécanique est parfois nécessaire afin de réaliser une décélération constante de 0,7m/s² - donnée

retenue pour nos simulations - lorsque l'effort électrique disponible est insuffisant. Ces pertes entrent pour une part non négligeable dans le bilan énergétique, surtout que le coût réel de ces pertes (en W) est bien plus élevé que le coût du Watt électrique car il fait intervenir matière et main d'œuvre nécessaire au remplacement des semelles ou garnitures.

2.2.2. Energies cinétique et potentielle : c'est la partie exploitable de l'énergie absorbée à la caténaire. Elle est fonction de la masse M, de la vitesse v et de l'altitude h (1/2Mv², Mgh) et permet la performance recherchée.

3. Présentation de l'étude énergétique

3.1. Présentation de l'outil de simulation

L'outil de simulation, réalisé sous Matlab™, permet l'étude cinématique et énergétique d'une circulation de train sur un parcours donné. Pour qu'un train de masse M exprimée en tonne (t) et de résistance à l'avancement RAV (kN) dispose d'une accélération γ (m/s²), sur un profil i mm/m (ou i0/00), il faut que l'engin moteur développe à ses jantes un effort total Fj tel que :

$$Fj = RAV + M.g.i + k.M.\gamma \text{ (en kN)}$$

La méthode de résolution de cette équation différentielle a été faite simplement à l'aide de la méthode d'Euler en fixant le pas de calcul Δt en début de simulation. Ce choix simple mais discutable a été maintenu en raison des résultats satisfaisants obtenus.

3.2. Influence du mode de conduite

L'exploitation d'un train en service commercial permet peu de latitude quant au mode de conduite du train : le conducteur dispose d'une marge de manœuvre limitée vis-à-vis de la signalisation, de la vitesse maximale du matériel, de la vitesse maximale de la ligne, de l'horaire et des arrêts à respecter. On distingue 2 types de conduite : les marches dites tendues qui visent à suivre au plus près la vitesse de ligne pour arriver dans les meilleurs temps, et les marches détendues, simulées en alternant des périodes de traction 100% et des périodes de fonctionnement sur l'erre plus ou moins longue (erre = inertie, pas d'effort de traction, seule la résistance à l'avancement freine le train).

Le calcul des horaires se fait plutôt sur une marche détendue afin de rattraper du retard et de fiabiliser le service.

Notre étude vise à comparer énergétiquement ces deux modes de conduite pour une performance horaire identique : dans notre cas 100km sans arrêt, en 1h15mn (80km/h de moyenne)

3.2.1. Hypothèses :

Les hypothèses énoncées en suivant concernent les caractéristiques du train et les caractéristiques de la ligne.

Le train :

Masse : 307t

RAV : A = 2,689 kN ; B = 0,0314 kN/(km/h) ;

C = 0,000541 kN/(km/h)²

Puissance Auxiliaire de traction seul = 38kW

Equipuissance en traction = 4 MW.

6 Unités de traction.

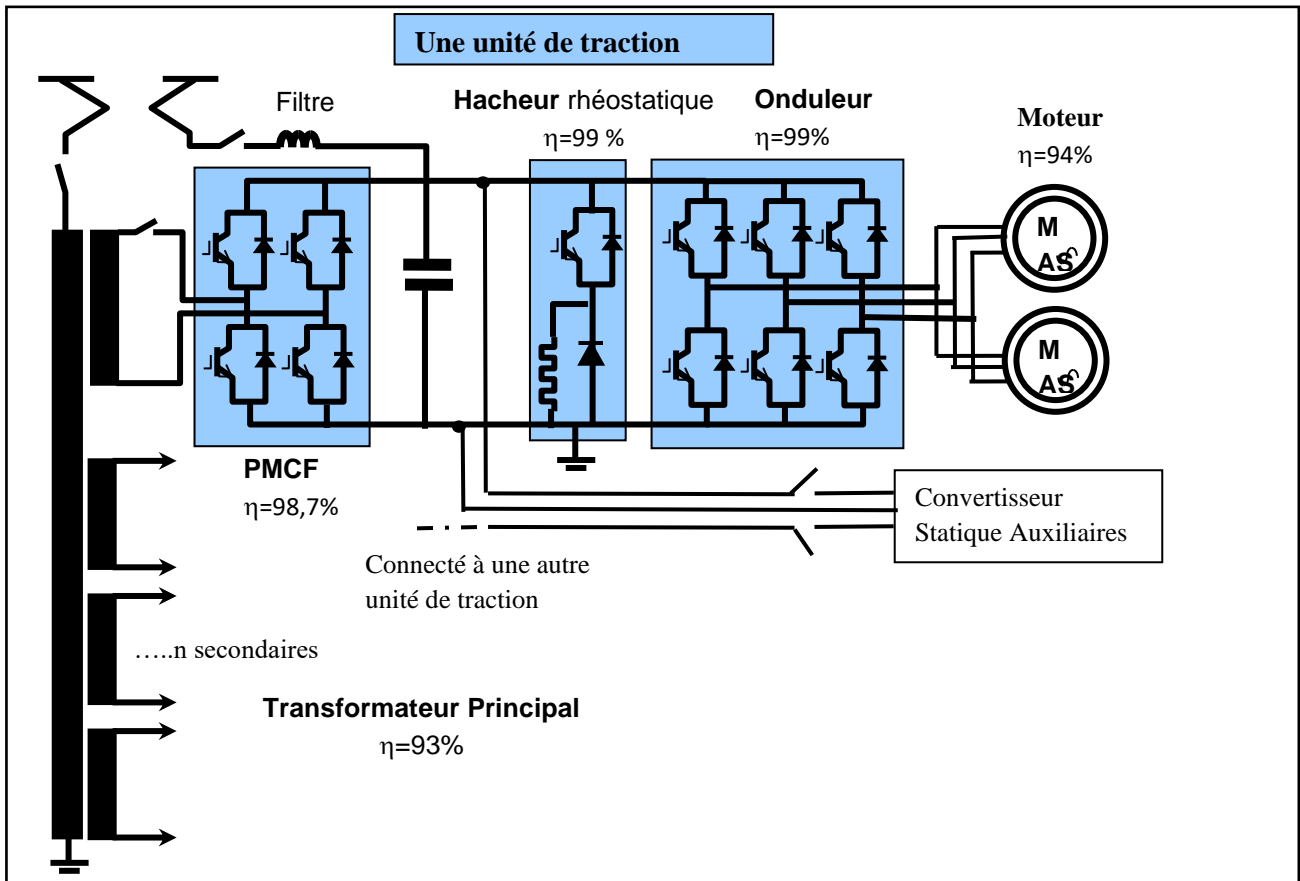


Figure 2 : Schéma HT traction avec rendements nominaux

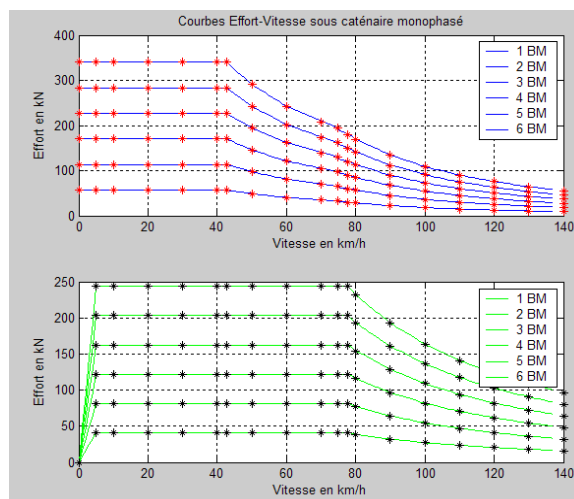


Figure 3 : Courbes d'efforts en fonction de la vitesse en Traction (en haut) et Freinage (en bas).

Les courbes de rendement sont les suivantes :

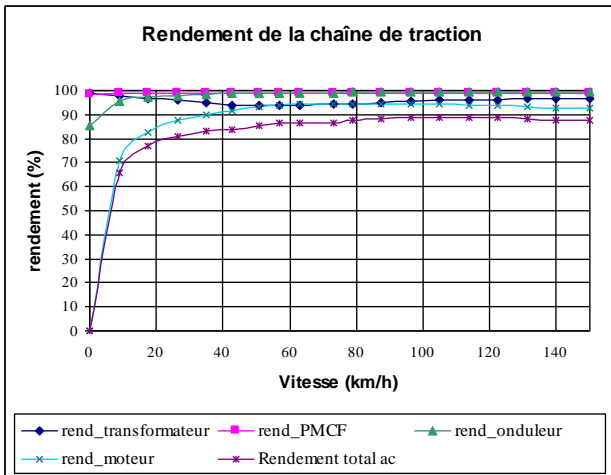


Figure 4 : Exemple de rendement des différents éléments de la chaîne de traction

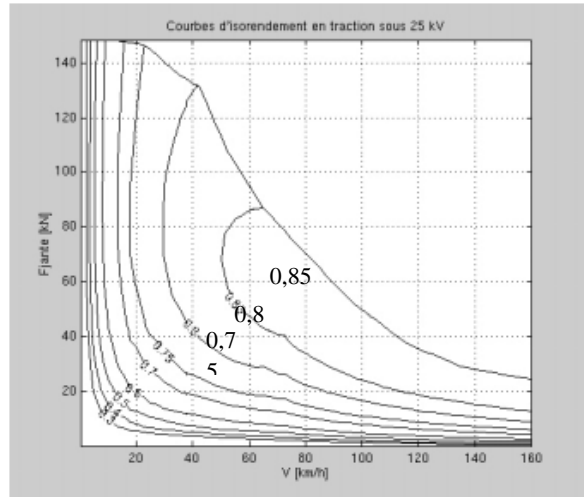


Figure 5 : Courbe d'isorendement de l'ensemble de la chaîne de traction

La ligne : 25kV, Profil plat de 80 km, sans arrêt.

Paramètres de simulation :

Jerk (variation de l'accélération) < 0,6m/s³

Décélération : 0,7 m/s²

Exemple : vous pouvez voir ci-contre l'évolution de la vitesse au cours d'une simulation en marche détendue avec un fonctionnement sur l'erre jusqu'à 50% et 70% de la vitesse maximale.

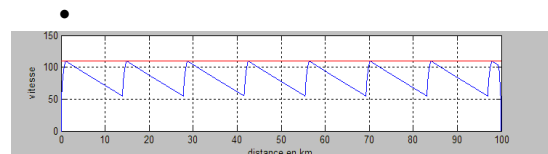


Figure 6 : 50% de la vitesse maximale :

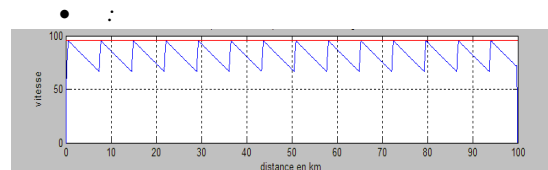


Figure 7 : 70% de la vitesse maximale

3.2.2. Résultats :

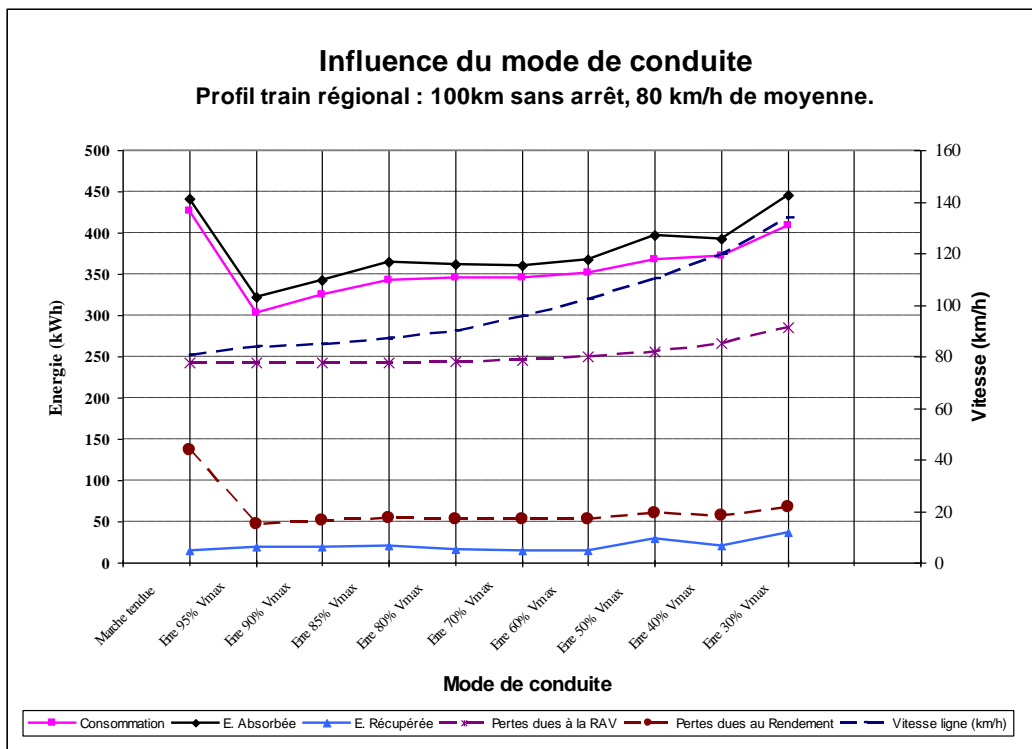


Figure 8 : Résultats de simulation de l'étude sur l'influence du mode de conduite

3.2.3. Analyse :

Marche tendue : La consommation est bien plus importante à cause des pertes liées aux rendements de la chaîne de traction. Les rendements sont d'autant plus mauvais que l'on se trouve loin du point nominal de fonctionnement : à très basses vitesses ou à faible puissance comme le montrent les graphes des rendements figures 4 et 5. C'est justement dans ce cas que l'on fonctionne en marche tendue, car on sollicite dans notre cas 5,2% de l'effort possible à 80km/h ; c'est juste l'effort nécessaire pour compenser la résistance à l'avancement et les pertes mécaniques du réducteur à cette vitesse. Les pertes par rendement sont augmentées de 15% par rapport au cas où on aurait 100% d'effort. Le rendement global de la chaîne de traction passe de 85% à 70%.

Marche détendue : L'alternance pleine traction / erre permet de faire travailler les composants de puissance sur leur point nominal pendant un temps limité. Le minimum de consommation est obtenu avec une erre de 95% de V_{max} , au-delà la consommation augmente par principe avec les rendements et la RAV (qui augmente fortement à haute vitesse, proportionnel à la vitesse au carré).

○ **Remarque :** deux points singuliers ressortent de la courbe de tendance, avec une erre à 85% et 50% de V_{max} . Ces points présentent une énergie absorbée plus importante que l'allure générale. Cela s'explique par le moment où le freinage final est amorcé : si on se trouve à haute vitesse (Voir la Fig.6 : erre à 50% de V_{max}) ou basse vitesse (Voir la Fig.7 : erre à 70% de V_{max}) cela a un impact sur le bilan énergétique : à haute vitesse, l'énergie récupérée est plus grande mais les pertes dues aux rendements aussi, d'où une consommation plus importante. Une simulation sur 1000 km aurait minimisé ces écarts.

3.2.4. Conclusion

Les « marches économiques » traditionnelles, en conduite manuelle, sont tout à fait pertinentes puisqu'elles exploitent les meilleurs rendements du matériel. Elles nécessitent en revanche un horaire plus souple. Elles permettent en outre d'anticiper le relief et d'ajuster au mieux le freinage. A contrario, les dispositifs actuels de contrôle de vitesse automatique

(vitesse imposée : VI) qui savent doser l'effort nécessaire pour maintenir la vitesse du train permettent un confort de conduite et une sécurité pour le respect de la vitesse de ligne, au détriment de l'efficacité énergétique.

3.3. Influence de la puissance motrice installée

A la différence du mode de conduite, l'influence de la puissance installée s'apprécie plutôt sur des parcours où les arrêts et démarrages sont fréquents.

Notre étude de consommation va porter sur une mission de type banlieue, réalisée par un train dont on va modifier la puissance par le nombre d'unité de traction en service. Le paramètre ajustable est la vitesse de la ligne que l'on va élever pour permettre au train le moins puissant (qui accélère moins) de tenir la performance. Remarque : la limite de sollicitation d'adhérence à la jante, traditionnellement de 19% sur automotrice, a pour conséquence de brider l'effort et donc l'accélération aux basses vitesses. C'est cette limitation qui est déterminante pour la montée en vitesse et non la puissance disponible. Dans notre étude, nous rajoutons des unités de traction donc des essieux moteurs ce qui revient à augmenter à la fois la puissance et l'effort à la jante (voir les courbes Effort – Vitesse Fig.3).

3.3.1. Hypothèses :

- **Le train :** Identique au §3.2.1
- **La ligne :** 25 kV, 40km, 11 arrêts, 3,3 km de rampe à 15‰ et 3,3 km de rampe à -15‰.
- **Performance :** 60 km/h de moyenne sur le profil de mission type banlieue
- **Paramètres de simulation :**

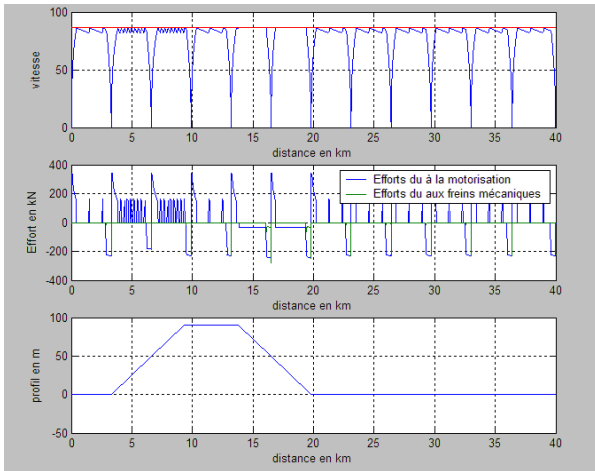
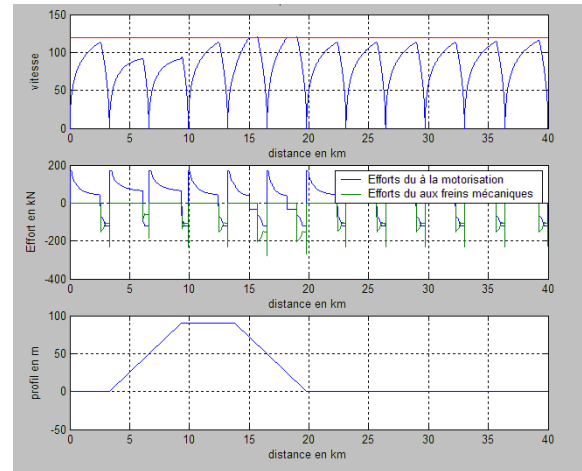
Jerk (variation de l'accélération) $< 0,6m/s^3$

Décélération de $0,7m/s^2$;

mode de conduite : économique, avec erre jusqu'à 95% de la vitesse maximale.

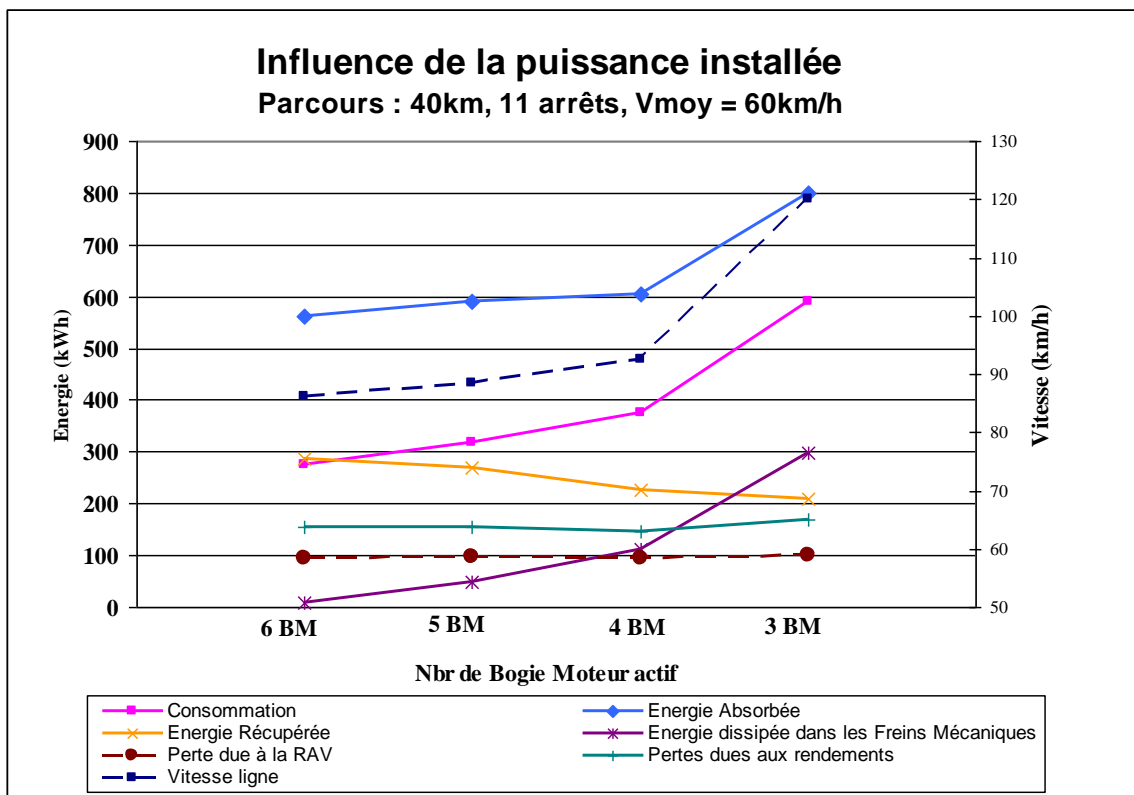
L'alimentation de la ligne en 25kV permet en général le 'freinage par récupération' (c'est-à-dire transformer l'énergie cinétique en énergie électrique qui est renvoyée sur le réseau par l'intermédiaire de la sous-station qui est réversible en monophasé ; cette énergie se déduit de celle qui est absorbée par la traction) ; nous admettrons ici que toute la puissance du freinage est acceptée par la ligne.

Voici le profil de la mission de type Banlieue île de France, en fonction des deux configurations de motorisation extrêmes


Figure 9 : 6 Unités de traction en service :

Figure 10 : 3 Unités de traction en service:

Il convient de noter que la vitesse de ligne est passée de 86km/h à 120km/h pour conserver la performance de 60km/h de moyenne.

3.3.2. Résultats :


Figure 11 : Résultats de l'étude sur l'influence de la puissance installée

3.3.3. Analyse :

Pour une même performance de 60km/h de moyenne, on constate que la consommation a plus que doublé quand la puissance motrice utilisée est divisée par 2. Or les pertes générées par la résistance à l'avancement et les rendements n'expliquent que 5,7% de la différence...

Le bilan énergétique est représenté dans le tableau ci-dessous à la figure 12

Si on compare les deux cas extrêmes de motorisation (3 et 6 unités de traction) on remarque que :

Puissance installée: Nombre de Bogie Moteur en service	Vitesse ligne (km/h)	Consommation (kW.h)	Energie Absorbée (kW.h)	Energie Récupérée (kW.h)	Energie dissipée dans les Freins Mécaniques (kW.h)	Perte due à la RAV (kW.h)	Pertes dues aux rendements (kW.h)
6 BM	86,2	275,9	562,1	286,2	8,8	95,4	154,4
5 BM	88,5	318,9	589,4	270,5	50,1	96,9	154,4
4 BM	92,6	375,7	603,5	227,7	111,6	95,9	147,3
3 BM	120	589,8	798,9	209	296,7	99,5	168,3

Figure 12 : Bilan énergétique

Energie Absorbée : l'écart est lié à l'énergie cinétique supérieure pour la configuration 3 BM qui doit monter beaucoup plus haut en vitesse pour assurer la performance.

→ $\Delta E_a = 236,8 \text{ kWh}$ soit +29% pour Train_3BM

Energie récupérée : Bien que le train à 3BM monte plus haut en vitesse et freine plus longtemps, il récupère moins que la configuration avec 6 BM.

→ $\Delta E_r = 77,2 \text{ kWh}$ soit -24,5% pour Train_3BM

Energie dissipée dans les freins mécaniques : Un complément de frein mécanique est nécessaire pour freiner la rame à hauteur de $0,7 \text{ m/s}^2$, cela d'autant plus que la rame est peu puissante.

→ $\Delta E_{\text{frein-méca}} = 287,9 \text{ kWh}$ +91,7% pour Train_3BM

3.3.4. Conclusion :

Pour une même performance - même vitesse moyenne - une forte puissance motrice installée permet :

- de monter moins haut en vitesse, car l'effort qui en résulte donne des accélérations plus importantes. Cela est vrai dans notre cas - automotrice à motorisation répartie-, car l'augmentation de puissance est conséquente à l'ajout d'unités de traction, et donc d'effort.

- de bénéficier d'une bonne récupération d'énergie par le freinage électrique, qui de surcroît économise garnitures et semelles de freins qui équipent le frein mécanique.

Ce dernier point est très important car le kW.h de frein mécanique (garnitures, semelles et main d'œuvre) est beaucoup plus onéreux que le kW.h électrique.

Ces considérations énergétiques sont à étudier dans le cadre du coût de possession du matériel, entre le coût à l'achat de la puissance embarquée et le gain énergétique possible pendant 40 ans (durée de vie moyenne d'un matériel moteur à la SNCF).

Dans la réalité, le bénéfice que permet le freinage par récupération n'est pas aussi flagrant, notamment sur les lignes alimentées en 1500V car les sous stations ne sont pas réversibles : cela est possible si le réseau est suffisamment dense en termes de fréquentation pour trouver dans le voisinage un train qui tractionne pendant que l'on freine ; cela est vrai en île de France.

Influence de la température sur l'évolution du déséquilibre de tension pour un module de supercondensateurs 56V/96F

Nassim RIZOUG (*), Patrick BARTHOLOMEÛS (**) et Philippe LE MOIGNE (*)

(*) Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance (L2EP)

(**) Ecole Centrale de Lille, B.P. 48, Cité Scientifique

59651 Villeneuve d'Ascq Cedex – France

E-mail : nassim.rizoug@ec-lille.fr

Tél. : 03.20.33.53.89 ; Fax : 03.20.33.54.54

Résumé : De nos jours, les supercondensateurs suscitent un intérêt certain dans le domaine de la conception des systèmes électriques. Ils sont un véritable challenge en matière d'innovation et ils vont de pair avec l'évolution des technologies actuelles. Mais le faible niveau de tension que supportent les éléments (2 à 3V) impose de les associer en série, entraînant divers problèmes de fiabilité et de durée de vie. Dans cet article, une étude sur la dispersion des tensions dans un module de supercondensateurs, basée sur de nombreux essais expérimentaux, est proposée. Le banc de test développé permet de reconstituer des conditions d'utilisation des supercondensateurs s'approchant de celles rencontrées dans le domaine de la traction électrique.

1. Introduction

L'utilisation d'un système de stockage d'énergie est souvent nécessaire pour les applications de type traction électrique. Le composant de stockage est utilisé :

- dans les systèmes isolés où il alimente des dispositifs demandant une énergie réduite
- dans les systèmes hybrides où il joue un rôle en terme d'apport de puissance ou d'énergie selon l'application (ex : phases d'accélération ou de freinage).

Jusqu'à maintenant, les systèmes les plus utilisés sont les accumulateurs qui ont une puissance spécifique et une autonomie relativement élevée. Les condensateurs classiques ont une autonomie insuffisante, mais possèdent une puissance spécifique incomparable. Les supercondensateurs apparaissent comme des composants intermédiaires en termes de propriétés énergétiques qui les rendent très intéressants car ils n'ont pratiquement pas de concurrents dans ce domaine.

Un des atouts majeurs des supercondensateurs est leur aptitude à la récupération d'énergie et leur faible dégradation au fil du temps. C'est sans aucun doute ce qui les démarque complètement des autres accumulateurs et peut faire d'eux des composants d'avenir. Malheureusement la frilosité des constructeurs à miser sur des technologies non éprouvées et qui restent pour l'instant relativement coûteuses, freine fortement leur développement. C'est pour cela un banc de caractérisation de modules de supercondensateurs de forte puissance (96F/56V/400A max) a été développé au laboratoire pour reproduire les conditions d'utilisation similaires à celles des applications de type traction électrique [1-2]. Ce dispositif a pour objectif, d'une part de procéder au cyclage de ces modules dans le but de connaître l'évolution de leurs performances tout au long

de leur vie, et d'autre part d'acquérir un savoir-faire dans ce domaine afin de mieux connaître ces composants en termes de performances et également en termes de contraintes technologiques.

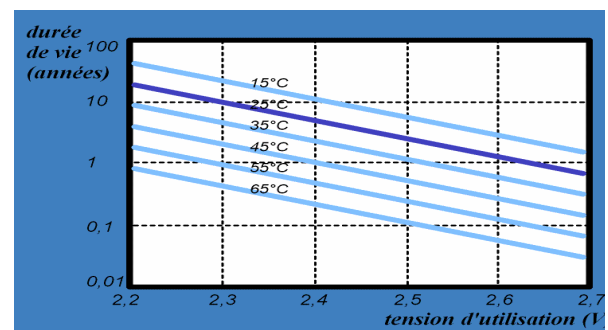


Figure 1 : Effet de la température et de la tension d'utilisation sur la durée de vie d'un supercondensateur (source EPCOS).

L'utilisation de supercondensateurs permet d'obtenir des capacités de stockage importantes, mais la tension maximale supportée par l'électrolyte (moins de 2,7V) nécessite leur mise en série pour les applications de forte puissance [3-4], afin de fonctionner avec des rendements convenables. L'inconvénient de cette méthode est lié au déséquilibre naturel des tensions des éléments en série qui peut apparaître après plusieurs cycles de charge/décharge. Ce déséquilibre est dû au fait que les éléments utilisés ne peuvent être tous identiques. D'ordinaire les constructeurs proposent des dispositifs d'équilibrage aptes à limiter cette dérive en tension. Ces dispositifs sont plus ou moins complexes et peuvent créer des courants de fuite qui peuvent limiter l'autonomie du système. De plus, comme le montre la figure 1, la durée de vie d'un élément dépend directement de sa tension d'utilisation [5]. On a donc intérêt à ce que tous les éléments aient la même durée de vie afin de maximiser

celle de l'ensemble du module et de minimiser les frais de maintenance.

2. Le banc de caractérisation

L'objectif du banc de caractérisation qui a été développé au L2EP [6] est de tester des modules de supercondensateurs dans des conditions similaires à celles que l'on peut rencontrer pour des applications industrielles de type traction, alimentation sans interruption ou stockage d'énergie. Ces essais doivent permettre de fournir un maximum d'informations tout au long de la vie de ces modules. Des cycles de charge-décharge sont effectués en permanence (24h/24, 7 jours/7) afin d'utiliser et « d'user » les modules. Périodiquement des essais de caractérisations sont effectués afin de connaître l'évolution des performances du module à un instant donné de sa vie.

Afin de limiter la puissance consommée nous avons choisi d'utiliser une méthode de type opposition ; le banc est constitué de 2 modules de supercondensateurs où l'énergie est échangée de l'un vers l'autre et vice versa. L'énergie perdue lors des cycles de charge-décharge est compensée par une alimentation auxiliaire de faible puissance.

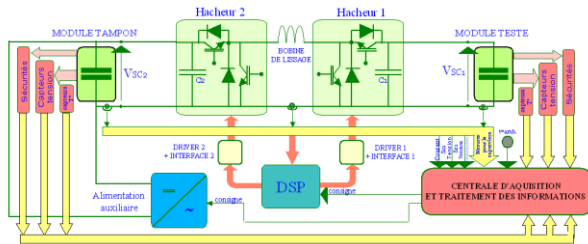


Figure 2 : Principe du banc réalisé

Les figures 2 et 3 présentent le banc ainsi que son synoptique. Il est composé de :

- deux modules de supercondensateurs
- une alimentation auxiliaire
- une centrale d'acquisition
- un convertisseur d'échange d'énergie entre les deux modules
- quelques cartes d'interfaces

2.1 Les modules de supercondensateurs

Les deux modules de supercondensateurs (96F/56V) sont composés de 28 éléments de 2700 Farads de type PC7223 de marque MAXWELL. Le courant maximum que supportent ces modules est de 400A.

Le premier module nommé « module testé » est chargé et déchargé avec un profil de courant bien défini. Ses grandeurs électriques sont captées et périodiquement stockées par la centrale d'acquisition. Le second module nommé « module tampon » sert, comme son nom l'indique, de tampon d'énergie pour la charge et la décharge du module testé. Ces modules du commerce ont été modifiés afin de les protéger thermiquement en introduisant des capteurs de température et en ajoutant

une ventilation forcée. De plus, une carte électronique permet de détecter un défaut de température ou de tension et de localiser l'élément en défaut.

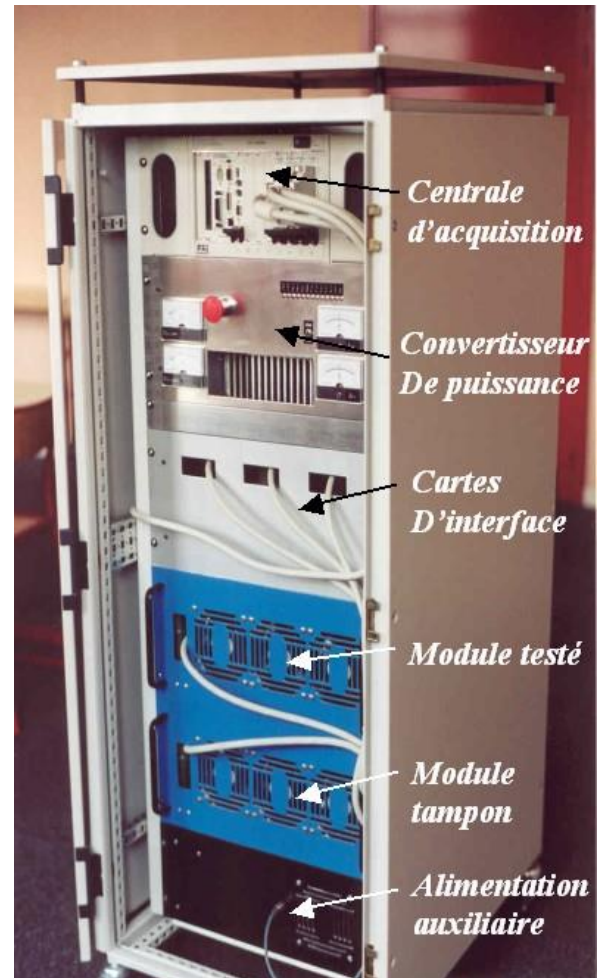


Figure 3 : Le banc de caractérisation de modules de supercondensateurs



Figure 4 : Le module de supercondensateurs (96F,56V, 400A).

2.2 L'alimentation auxiliaire

Cette alimentation a pour rôle de compenser les pertes lors des tests de cyclage afin d'obtenir des cycles parfaitement périodiques. Elle est capable de fournir un courant de 20A en permanence.

2.3 La centrale d'acquisition

La centrale d'acquisition supervise l'ensemble du banc de test (génération des profils de cyclage, acquisition et stockage des données, sécurités, initialisation). Le dispositif de marque National Instrument est composé d'un PC intégré dans un châssis PXI comprenant 4 cartes d'acquisition. En tout, il est possible d'accéder à plus de 100 données sur l'ensemble du banc. Ce sont des données électriques (tensions et courants pour l'ensemble du banc ainsi que les tensions des 56 éléments des 2 modules de supercondensateurs), thermiques (températures réparties dans le module) et informations sur l'état du banc (défauts divers). Dans un souci de flexibilité, le logiciel LAB VIEW a été retenu.

2.4 Le convertisseur d'échange d'énergie

Le transit d'énergie est contrôlé par le convertisseur d'échange d'énergie (figure 5). Les tensions des supercondensateurs étant fortement variables, le convertisseur doit être abaisseur mais également éleveur. De plus, compte-tenu des contraintes électriques basse tension et fort courant, c'est la structure composée de 2 hacheurs réversibles en courant où s'intercale une inductance qui a été retenue et qui est présentée en figure 5.

Afin d'illustrer le fonctionnement du système, la figure 6 présente un relevé expérimental pour une charge du module testé par le module tampon, et cela pour un courant de référence de 100A. On peut observer sur cette figure la charge du module testé ainsi que la décharge du module tampon. Au début, le courant de l'inductance est égal au courant du module testé. Dans une deuxième phase, le courant de l'inductance qui est également, à cet instant, le courant du module tampon, croît brutalement jusqu'à ce qu'il atteigne la valeur de 400A. Enfin ce courant reste limité pour ne pas dépasser le courant admissible par le module tampon (400A). Le courant du module testé ne peut alors plus être maintenu à sa valeur de référence (100A). Il décroît progressivement pour enfin s'annuler. Le transit de puissance est alors interrompu. L'apparition de ce phénomène est d'autant plus rapide que le courant de référence est important. En conclusion, le système a des limites physiques qu'il faut connaître pour être conscient de ce que l'on peut faire avec le banc de caractérisation.

D'un point de vue précision et temps de réponse, le courant d'offset est de l'ordre de 0.5A. L'erreur totale est inférieure à 1.5% pour un courant de référence de 100A. Le temps de réponse est de l'ordre de 35ms, même pour 400A. Cela donne donc une bande passante de l'ordre de 20Hz. Cette réponse fréquentielle peut être améliorée mais pour l'instant nous n'en avons pas vu l'intérêt.

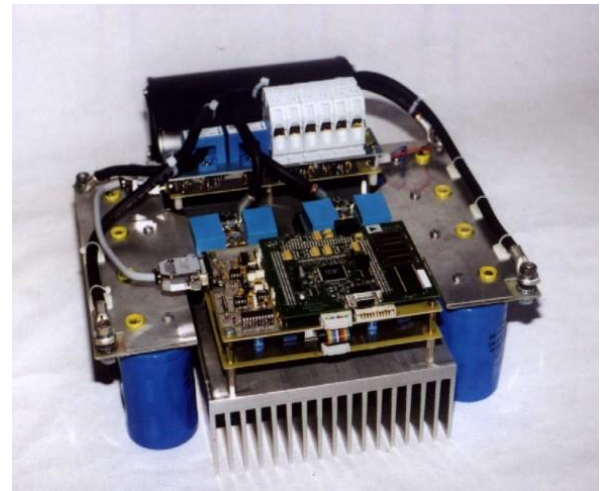


Figure 5 : Le convertisseur d'échange d'énergie (60V/400A).

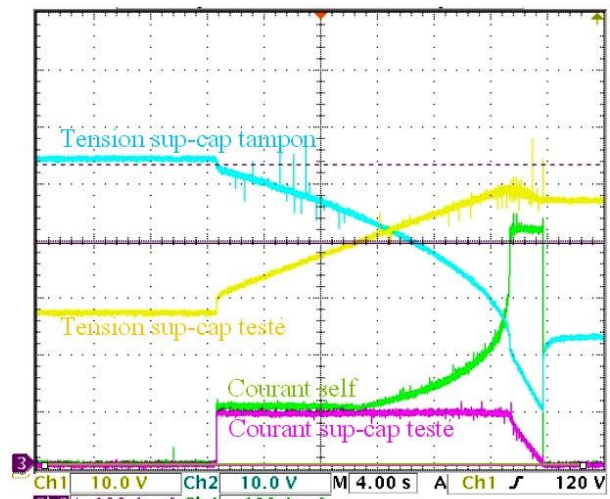


Figure 6 : Charge du module testé par le module tampon pour 100A

3. Le programme de cyclage

Pour l'instant les 400.000 cycles ont été effectués en utilisant un programme de cyclage développé à l'aide de LabView. Cette version comprend l'initialisation du banc (matériel et charge initiale des modules), la génération des courants de consigne du convertisseur d'échange d'énergie entre les deux modules et de l'alimentation auxiliaire, et enfin l'acquisition des données concernant le module testé (tension, courant et 6 des 28 tensions élémentaires durant quelques cycles).

La figure 7 représente la principale face avant du programme où l'on peut configurer le type de cycle à effectuer. Les paramètres contrôlables sont les amplitudes et les durées des 6 étapes du cycle. Pour les tests présentés dans cet article, le profil est le suivant : charges et décharges à 100A de 17 secondes séparées par des phases de repos de 8 secondes.

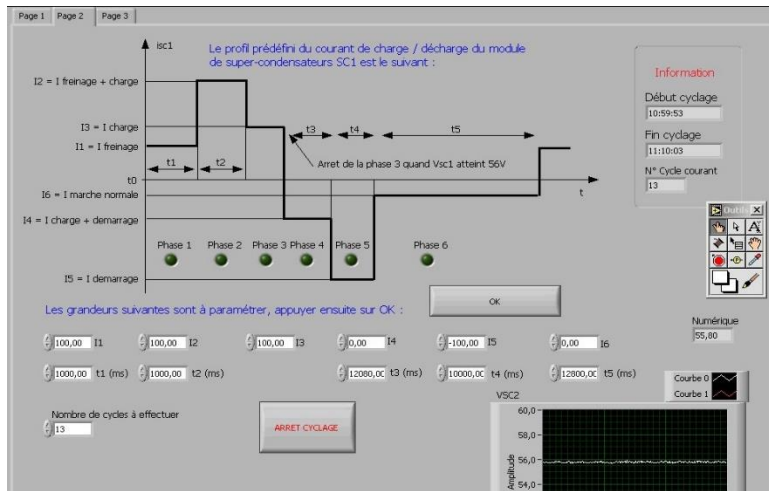


Figure 7 : Face avant du programme développé sous LABVIEW

La figure 8 représente la tension et le courant du module testé. Sur cette figure est également représenté le calcul de l'évolution de l'énergie durant 5 cycles. Nous pouvons grâce à cet essai calculer le rendement énergétique durant un cycle. Ce rendement est égal à :

$$\eta = \frac{E_{\max} - E_{\text{perte}}}{E_{\max}} \quad (1)$$

Pour le profil de cycle considéré, le rendement est de l'ordre de 86%.

La figure 9 représente 6 des 28 tensions élémentaires. (les éléments d'indices 1, 6, 12, 19, 22 et 24). Ces composants ont été choisis car ils avaient soit une position particulière dans le module, soit des comportements particuliers. Notons que d'après cette figure il n'existe que très peu d'écart de caractéristique entre les éléments qui sont le plus représentatifs de la population du module.

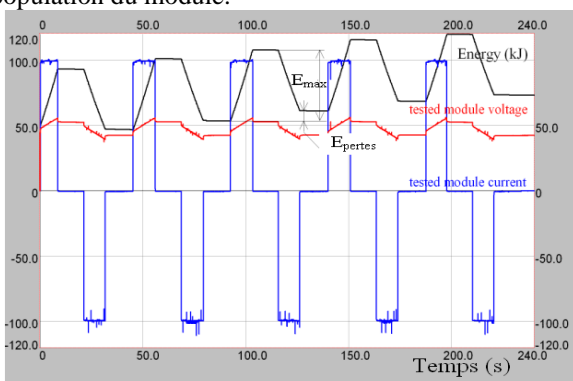


Figure 8 : Tension, courant et évolution de l'énergie du module testé

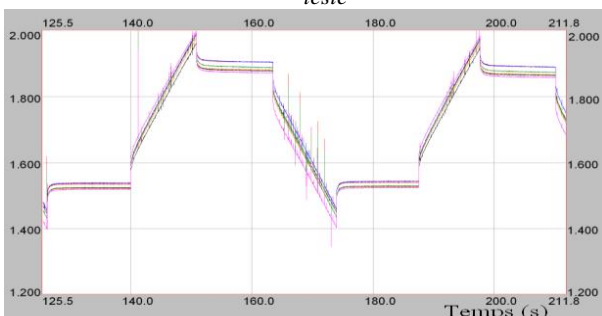


Figure 9 : tensions des éléments 1, 6, 12, 19, 22 et 24 du module testé

4. Mise en évidence expérimentale du déséquilibre

La mise en évidence du déséquilibre lors du cyclage nous oblige à faire des cycles de manière continue et en nombre important afin d'observer ce phénomène de manière sensible.

La procédure utilisée est la suivante :

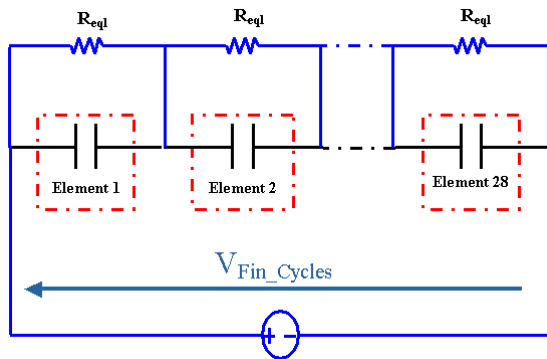
- ✓ Equilibrage forcé des tensions des éléments supercondensateurs.
- ✓ Suppression du système d'équilibrage
- ✓ Cyclage du module
- ✓ Acquisition de façon périodique des tensions de fin de cycles des éléments du module
- ✓ Comparaison des tensions de fin de cycles à la moyenne des tensions du module.

4.1 Equilibrage des tensions

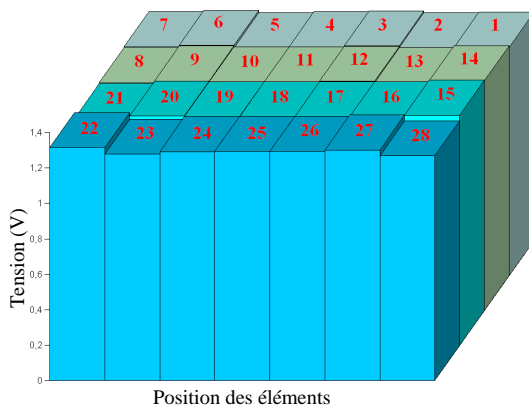
Avant de commencer le cyclage, les tensions des éléments supercondensateurs sont équilibrées [7]. La tension à laquelle tous les éléments seront alignés est calculée par simulation du banc avec les cycles imposés. Cette simulation permet de trouver la tension de fin de cycle après la stabilisation de la réponse du module.

L'équilibrage en tension des 28 éléments supercondensateurs est réalisé en mettant des résistances identiques (R_{eq}) en parallèle avec chaque élément. La valeur de la résistance R_{eq} est très faible et est choisie en fonction du temps d'équilibrage voulu.

La figure 10 présente le dispositif expérimental d'équilibrage.


Figure 10 : Equilibrage des tensions avant le cyclage

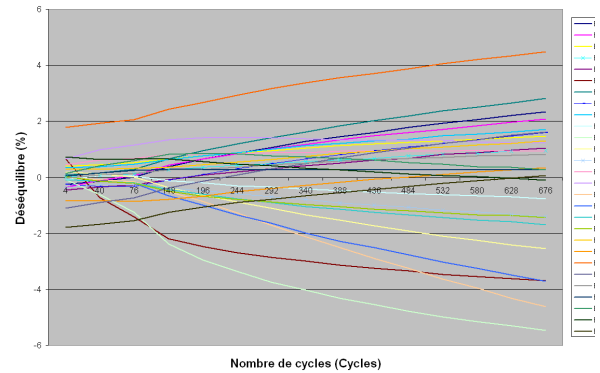
Ce dispositif permet de forcer l'équilibrage pour avoir à la fin de cette phase des tensions toutes identiques ($V_{Fin_cycles}/28$) aux bornes de chaque élément. Dès que la tension des éléments atteint ce niveau, on supprime le système d'équilibrage. La figure 11 présente l'état des tensions des 28 éléments après la phase d'équilibrage en fonction de leur position dans le module.


Figure 11 : Etat de la tension des éléments après la phase d'équilibrage

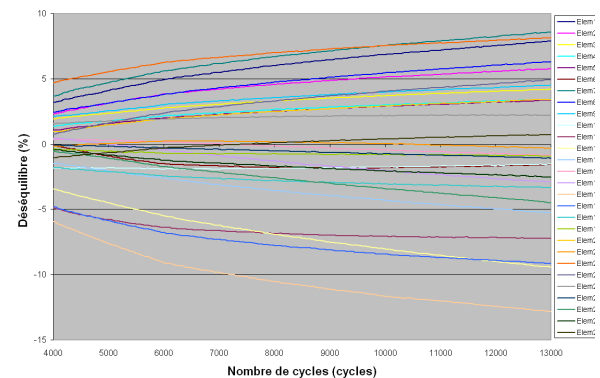
Notons que le déséquilibre initial est inférieur à 2%. Ce déséquilibre initial est soit lié à la tolérance des résistances d'équilibrage, soit lié au temps d'équilibrage trop court pour réduire cette erreur.

4.2 Evolution du déséquilibre des 28 éléments

Après la phase d'équilibrage, on commence le cyclage. Périodiquement et après un nombre choisi de cycles, l'acquisition des tensions de fin de cycles est effectuée. Ces données permettent de suivre l'évolution du déséquilibre de chaque élément le long du cyclage [8].


Figure 12 : Evolution du déséquilibre pour les 676 premiers cycles

La figure 12 montre la variation de la tension de chaque élément par rapport à la moyenne des tensions. Pour ces 676 cycles. La divergence est relativement rapide et elle atteint environ 5%. Notons qu'à la fin de ce relevé, la croissance du déséquilibre tend à se réduire. La figure 13 montre l'évolution du déséquilibre pour un nombre important de cycles (entre 4000 et 13000 cycles).


Figure 13 : Evolution du déséquilibre entre 4000 et 13000 cycles

Pour ces 9000 derniers cycles, la variation de déséquilibre ne dépasse pas 6%. Ainsi, cette évolution est nettement plus limitée que dans la phase de démarrage. Cette stabilisation peut être due à la stabilisation en température des éléments supercondensateur et/ou à une diminution des phénomènes de redistribution après un certain nombre de cycles.

Ces résultats mettent en évidence la différence de comportement des éléments puisque le sens d'évolution du déséquilibre n'est pas le même pour tous les éléments. Afin d'avoir une idée de la dispersion en 3D du déséquilibre entre tous les éléments supercondensateurs, l'état des tensions pour les 28 éléments du module après ces 13000 cycles est présenté sur la figure 14.

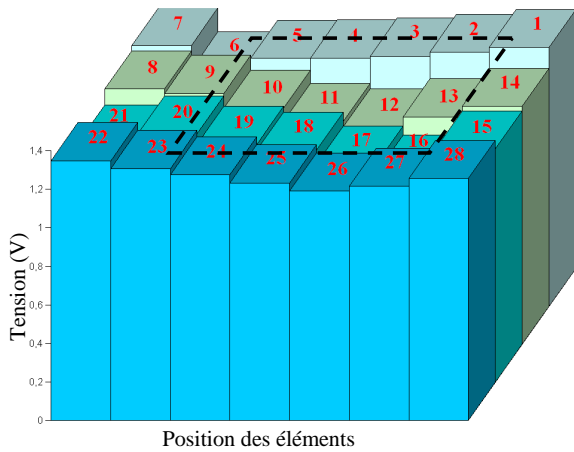


Figure 14 : Corrélation entre la position des éléments et l'évolution de leur déséquilibre

Cette figure montre la tension des éléments supercondensateurs après 13000 cycles. Dans cette présentation, on a conservé la position de chaque élément dans le module. Cette représentation des tensions montre que la tension des éléments du centre est moins importante que celle des éléments périphériques. Ce regroupement des éléments évoluant de façon similaire tend à montrer l'influence de la température sur le déséquilibre [7].

4.3 Corrélation entre la température des éléments du module et l'évolution de leur déséquilibre de tension

Afin de connaître l'effet de la température des éléments du module sur leur déséquilibre de tension, 4 éléments parmi les 6 qui peuvent être caractérisés ont été choisis. Parmi ces six éléments, on a choisi ceux situés sur une diagonale dans le module (1, 12, 19, 22). Ce choix a été fait afin de prendre des éléments qui ont différentes températures représentatives du module (deux éléments d'extrémité (1 et 22) et deux éléments du centre (12 et 19)). La figure 15 présente l'évolution de la température de ces quatre éléments en fonction du nombre de cycles effectués.

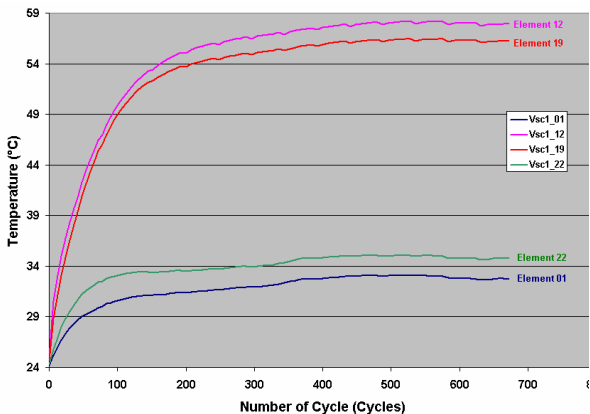


Figure 15 : Evolution de la température des quatre éléments (1, 12, 19 et 22) en fonction du nombre de cycles effectués

Cette figure montre que la température des éléments du centre (éléments 12 et 19) est très supérieure à celle des éléments d'extrémité (éléments 1 et 22). Cette différence est due au fait que les éléments d'extrémité bénéficient des effets du système de ventilation. Après la stabilisation de la température, il y a plus de 23°C de différence entre les deux zones.

4.4 Evolution du déséquilibre pour les quatre éléments choisis :

Afin de chercher une éventuelle corrélation entre la température des éléments et leur déséquilibre, on a présenté sur la figure 16 l'évolution du déséquilibre pour les quatre éléments choisis (1, 12, 19 et 22) pour les 676 premiers cycles. Ces tendances sont vérifiées jusqu'à la fin des essais.

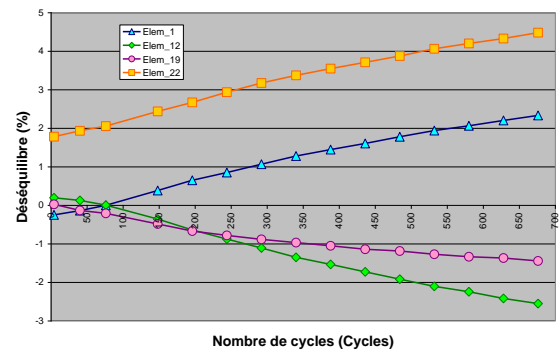


Figure 16 : Evolution du déséquilibre des quatre éléments (1, 12, 19 et 22) en fonction du nombre de cycles effectués

Cette figure montre que la tension des deux éléments du centre (éléments chauds, 12 et 19) a tendance à diminuer par rapport à la moyenne des tensions du module. Par contre, la tension des deux autres éléments (éléments plus froids, 1 et 22) tend à augmenter. Cette tendance observée pour ces quatre éléments témoigne de l'existence d'une corrélation entre l'écart de température des éléments et l'évolution de leur déséquilibre de tension. Les résultats de la figure 16 confirment également cela puisque les éléments situés au centre sont plus chauds que les éléments de la périphérie du module.

5. Conclusion

Au début de la vie d'un module de supercondensateur, ses éléments ont des caractéristiques très semblables. Mais au fil du temps ils subissent des contraintes différentes et se modifient tous en fonction de ce qu'ils ont vécu. Le déséquilibre va donc être de plus en plus difficile à compenser au fur et à mesure que le module vieillit. Ceci peut alors entraîner un effet d'emballement de la dégradation du dispositif. Les essais expérimentaux présentés dans cet article ont mis en évidence ce déséquilibre lié à la présence d'éléments de caractéristiques différentes et traversés par le même courant.

Il a été montré qu'il y avait un lien entre ce phénomène et l'effet de dispersion de température lorsque le module est utilisé en cyclage. L'objectif à terme de l'étude qui a été proposée est de connaître les causes du déséquilibre et leur impact afin de pouvoir définir la solution d'équilibrage la mieux adaptée à l'application en terme d'efficacité et de consommation d'énergie.

Nous pensons qu'un tel outil de caractérisation présente un grand intérêt en terme d'investigation car il permet de s'approcher du fonctionnement réel d'une application industrielle sans en avoir les contraintes. Les supercondensateurs sont en nombre suffisant pour le système soit représentatif, et il est de plus possible d'enregistrer un maximum d'informations, et donc de maîtriser un maximum de paramètres.

6. Références

- [1] G. PEREIRA, P. BARTHOLOMEUS, P. LE MOIGNE, C. ROMBAUT, P. VAN BERTEN, Ultracapacitors and tramway without catenary, 2nd Boostcap Meeting, 2001, Fribourg, Swiss.
- [2] "Ultracap Bus" peut être consulté sur le site : <http://www.man-nutzfahrzeuge.de>.
- [3] P. Barrade, "Series Connection of supercapacitors: comparative study of solutions for the active equalization of the voltages," Electrimacs, Montréal, Canada, 18-21 Août 2005.
- [4] P. BARRADE, A. RUFER, "High-power fast energy exchange between storage systems : Supercapacitors as energy buffer in transportation systems" 18th Electric Vehicle Symposium October 2001, Berlin.
- [5] Notice EPCOS " UltraCap double layer capacitors : a new energy storage device for peak power application".
- [6] P. Bartholomeüs, B. Vulturescu, X. Pierre, N. Rizoug, P. Le Moigne, "A 60V-400A test bench for supercapacitor modules," EPE'2003, Toulouse, September 2003.
- [7] N. Rizoug, P. Bartholomeüs, P. Le Moigne, B. Vulturescu, "Electrical and thermal behaviour of a supercapacitor module: on-line characterization," ESSCAP'2004, Belfort, France.
- [8] N. Rizoug, P. Bartholomeüs, B. Vulturescu, X. Pierre, P. Le Moigne, "Voltage sharing in supercapacitor modules: Experimental study," PESC'2004, Aschen, Allemagne, pp. 690-696.

La Revue SEE



*Gisements
d'économies
d'énergie*

Publication trimestrielle du Cercle Thématique 13.01 de la SEE
ENSEIGNER L'ÉLECTROTECHNIQUE ET L'ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE



*Société de l'Électricité, de l'Électronique
et des Technologies de l'Information
et de la Communication*

N°51 Décembre 2007

Caractérisation d'un accumulateur plomb / acide

Emmanuel ODIC, Carlos ESTEBAN, Pierre VIDAL, Jack ROBERT

Département Énergie

SUPÉLEC

3 rue Joliot Curie, 91192 GIF sur YVETTE cedex

emmanuel.odic@supelec.fr

Résumé : Les accumulateurs plomb / acide, bien que connus depuis fort longtemps, sont aujourd'hui encore étudiés de façon intensive en raison de leur intérêt économique lié à leur utilisation (i) dans le secteur automobile (SLI batteries) (ii) mais également pour le stockage associé à l'utilisation d'énergies renouvelables. La recherche concerne fréquemment le choix d'indicateurs permettant d'établir l'état de charge et l'état de santé de ces batteries par des mesures électriques externes simples, et éventuellement pouvant être mises en œuvre par des capteurs communicants. Après un rapide état de l'art sur l'accumulateur au plomb (principe, état de charge et vieillissement), et une description des méthodes de mesures utilisées, on étudie la façon dont la tension aux bornes de l'accumulateur en circuit ouvert et au repos, de même que la résistance interne de cet accumulateur sont influencées par l'état de charge mais également par l'état de vieillissement.

1. Introduction

L'accumulateur au plomb a été découvert en 1860 par le français Gaston PLANTÉ. Il connaît depuis des décennies un développement considérable grâce à l'automobile dont il assure le démarrage (starting), tout en intervenant au niveau de l'éclairage (lightning) et de l'allumage (ignition). A ce débouché, dit des "SLI" batteries, s'ajoute celui de la traction lourde (camions et autobus électriques, engins de levage, ...). L'accumulateur au plomb est également utilisé en stationnaire (téléphonie, installations de secours...), ainsi que pour le stockage imposé par l'exploitation des énergies renouvelables (solaire, éolienne). Le présent article traite des "SLI" batteries (qui seront indifféremment appelées « accumulateur » ou « batterie »). Les « SLI » batteries relèvent d'un domaine spécifique, notamment parce que les lois du marché leur imposent d'être particulièrement économiques.

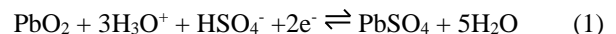
2. Principe de l'accumulateur au plomb

2.1. Equations de base

Un accumulateur au plomb est constitué de cellules dont la tension est de l'ordre de deux volts. Ces cellules sont groupées en série de façon à lui conférer une tension de 6, 12, 24 V et au-delà. Selon le schéma théorique classique, une cellule est constituée de deux électrodes plongeant dans un électrolyte (fig. 1). Ce dernier est une

solution aqueuse d'acide sulfurique tandis que l'électrode positive est à base de dioxyde de plomb et la négative, de plomb spongieux.

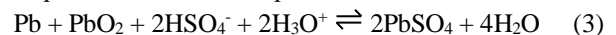
Pendant la décharge, l'électrode positive (ou cathode) est le siège de la réaction de réduction suivante où le plomb passe du niveau d'oxydation 4+ au niveau 2+ :



L'électrode négative (ou anode) est le siège de la réaction d'oxydation ci-dessous où le plomb passe du niveau d'oxydation 0 au niveau 2+ :



L'équation bilan s'écrit à partir de là :



et, sous une forme encore plus condensée :



La situation est, en fait, plus compliquée. En effet, l'acide sulfurique se dissocie en milieu aqueux, selon les deux étapes suivantes :

première dissociation



deuxième dissociation



Des travaux récents [1] relatifs aux gammes de concentration de l'acide sulfurique rencontrées dans l'accumulateur au plomb font la preuve que l'électrolyte est constitué essentiellement d'ions H_3O^+ et HSO_4^- . Il est donc admis que la première dissociation de l'acide sulfurique est prédominante. Les réactions (1) et (2) résultent de ces considérations, et par voie de conséquence, la réaction (4).

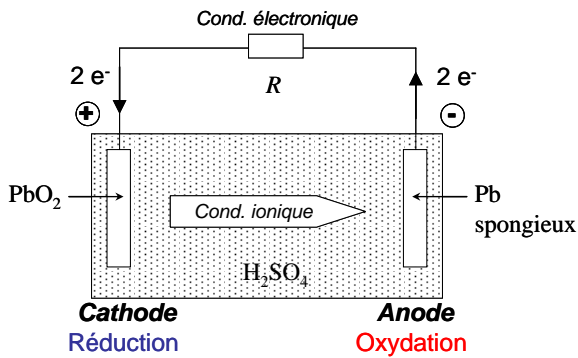


Figure 1 : schéma de principe d'un accumulateur plomb/acide

La relation de Nernst associée à cette équation bilan s'écrit, en faisant intervenir les concentrations désignées par des crochets et, après simplification :

$$E = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{[H_2SO_4]}{[H_2O]} \quad (7)$$

d'où l'on tire, tous calculs faits,

$$E = 2,042 + 0,118 \log [H_2SO_4] \quad (8)$$

La fem standard E^0 est égale à 2,042 V. Elle se déduit, en fait, des potentiels standards de chacune des électrodes. Les valeurs correspondantes, recommandées par l'Union internationale de chimie pure et appliquée (IUPAC), sont les suivantes :

$$(E^0)_+ = 1,690 \text{ V} \quad ; \quad (E^0)_- = -0,352 \text{ V},$$

d'où il vient :

$$E^0 = (E^0)_+ - (E^0)_- = 2,042 \text{ V} \quad (9)$$

On citera, enfin, la formule empirique suivante :

$$E = 0,84 + \rho \quad (10)$$

où ρ désigne la masse volumique de l'acide exprimée en g/cm^3 .

2.2. Structure d'une « SLI » batterie

Les « plaques », constituent l'élément de base de la plupart des accumulateurs et, singulièrement, des « SLI » batteries. Ces plaques, dites « planes », pour les distinguer des plaques « tubulaires » qui équipent d'autres types d'accumulateurs au plomb, ont la forme d'un parallépipède rectangle, d'épaisseur faible par rapport aux autres dimensions. Leur technologie, dite « Fauré », du nom de son inventeur, date de 1880. On ne connaissait, avant cette date, que les plaques « Planté », en plomb massif, dont la surface, augmentée par rainurage, était oxydée par voie électrochimique.

Les plaques « Fauré » sont constituées d'une grille en alliage de plomb supportant la matière active. Cette dernière est un solide poreux de dioxyde de plomb dans le cas des plaques positives et de plomb, dit « spongieux », dans celui des négatives. L'élaboration des matières actives, positive et négatives, implique des opérations industrielles qui ne sauraient être décrites dans le cadre de cet article. Disons simplement que la

fabrication des plaques est, à l'exception de l'ultime opération, dite « de formation », commune aux deux polarités. Les grilles sont initialement garnies d'une pâte, mélange de plomb métallique et d'oxydes de plomb, convenablement broyés, auxquels on a ajouté, pour l'essentiel, de l'eau et de l'acide sulfurique dans des proportions données. Après diverses opérations, intervient la formation au cours de laquelle s'opère la différenciation.

Une électrode est un ensemble de plaques identiques, rendues solidaires par une barrette rigide de plomb qui les maintient parallèles entre elles et, électriquement, au même potentiel. Cette électrode est appelée « faisceau ». Une cellule est constituée de deux faisceaux, de polarités opposées, encastrés l'un dans l'autre, les plaques de l'un occupant les espaces libres entre celles de l'autre. Des séparateurs, perméables aux ions, autorisent la conduction ionique entre plaques de polarités opposées tout en interdisant tout contact entre elles. Les deux faisceaux, ainsi agencés, sont installés dans un bac isolant, chimiquement inerte vis-à-vis de l'électrolyte. Quand un accumulateur est constitué de plusieurs cellules, ainsi qu'il est précisé ci-dessus, le bac est divisé en autant de compartiments étanches. Les cellules installées dans chacun d'entre eux, sont groupées électriquement en série à l'aide de courtes connexions en plomb traversant les parois. Les bacs sont fermés par un couvercle scellé.

2.3. État de charge

2.3.1. Évaluation de la charge

La capacité d'un accumulateur dépend fortement du régime de décharge. Aussi définit-on la capacité $C_{\Delta t}$ dans les conditions suivantes : le courant de décharge est constant, tandis que Δt désigne la durée de la décharge complète, exprimée usuellement en heures. La capacité nominale C_n est une donnée du constructeur qui précise, à la dispersion près des produits industriels, la capacité de la batterie en début de vie.

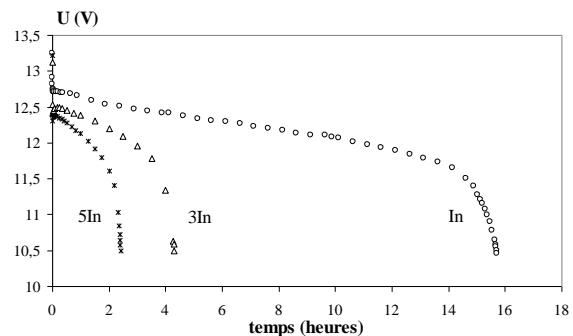


Figure 2 : caractéristiques de décharges de batterie sous In, 3In, 5In (SLI batterie 12 V, 50 Ah, 420 A)

Le régime de décharge auquel est définie la capacité nominale diffère selon le domaine d'application de l'accumulateur. Il s'agit du régime « 20 heures » pour les « SLI » batteries.

Pourquoi cette procédure de désignation ? Considérons, par exemple, la capacité nominale C_{10} , propre aux accumulateurs stationnaires, mesurée, comme indiqué plus haut, en soumettant l'accumulateur à un courant de décharge égal à $C_{10}/10$. On écrit : $I_d = C_{10}/10 = 0,1 C_{10}$

Soit un nouveau courant de décharge I'_d cinq fois plus intense. En écrivant : $I'_d = 5 C_{10}/10 = 0,5 C_{10}$ on fournit une double indication, à savoir

- l'intensité de ce courant ;
- une information sur le régime de décharge, indépendante de la taille de l'accumulateur.

Il est donc usuel de désigner les courants de charge comme de décharge par une fraction ou un multiple de la capacité nominale. C'est ce qui apparaît sur la figure 2 où nous avons tracé les caractéristiques de décharge d'une batterie « SLI », de capacité nominale 50 Ah, respectivement

en 20 heures, c'est à dire, sous I_n avec

$$I_n = 0,05 C_n = 2,5 \text{ A,}$$

sous $0,15 C_n$, c'est à dire sous $3 I_n = 7,5 \text{ A,}$

sous $0,25 C_n$, c'est à dire sous $5 I_n = 12,5 \text{ A.}$

Ces caractéristiques précisent la dépendance temporelle de la tension en charge U aux bornes de la batterie. Plusieurs observations s'imposent. En premier lieu, sur chacun de ces graphes, la tension décroît d'abord lentement pour fléchir brusquement en fin de décharge. U s'écrit, avec des notations évidentes :

$$U = E - R_i I \quad (11)$$

Dans cette expression, seul I est constant. Il apparaîtra plus avant que la fem E en charge décroît au cours de la décharge et que la résistance interne R_i augmente. Qualitativement, on peut observer que R_i dépend de

- la résistivité de l'électrolyte qui croît au fur et à mesure que l'acide sulfurique est consommé. Il importe de noter que lors de décharges lentes, ce qui est le cas sous I_n , la capacité d'une « SLI » batterie est limitée par le déficit d'acide
- la formation de PbSO_4 non conducteur. La situation est aggravée par le fait que ce dernier peut constituer une couche qui recouvre progressivement les électrodes.

On note sur la figure 2 que la décharge est interrompue quand U atteint 10,5 V, soit 1,75 V par cellule. Cette dernière valeur est appelée « tension d'arrêt ».

Au cours de la charge qui suit une décharge, les cristaux de PbSO_4 sont dissous (passent donc en solution), puis sont oxydés en dioxyde de plomb sur les plaques positives ou réduits en plomb spongieux sur les négatives. Conjointement, la concentration de l'acide sulfurique augmente. La tension appliquée à l'accumulateur s'écrit :

$$U = E + R_i I \quad (12)$$

Si la charge s'effectue sous courant constant, la courbe $U(t)$ présente, en début de charge, une dérivée faiblement positive, puis, à partir de 2,4 V par cellule croît plus rapidement jusqu'à 2,7 V, valeur vers laquelle elle se stabilise. Le changement de régime correspond à la dissociation de l'eau. Ce phénomène, abordé au § 2.3.2., se caractérise par des émissions, respectivement, d'oxygène à l'électrode positive et d'hydrogène à la négative. Ces émissions, très peu intenses quand la tension par cellule est inférieure à 2,4 V, s'accroissent sensiblement au-delà de cette valeur. Ainsi, dans les anciennes batteries ouvertes, elles pouvaient projeter de l'acide à l'extérieur. A 2,7 V, la charge est terminée et seules perdurent les réactions de dissociation de l'eau, accompagnées des émissions gazeuses. Ces phénomènes, dès lors qu'ils sont intenses et prolongés, dégradent l'accumulateur. En effet,

- ils peuvent concourir à la dislocation des plaques par effet mécanique,
- la présence de bulles de gaz augmente la résistance interne et réduit la surface de la matière active,
- la corrosion des grilles positives (cf. § 2.4.) est accélérée au cours de l'électrolyse.

Par contre, l'émission gazeuse a un effet positif en s'opposant à la stratification de l'électrolyte (cf. § 2.3.3.).

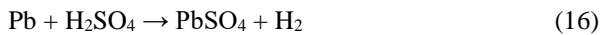
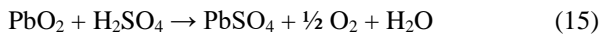
Nous avons décrit la charge sous courant constant dans un but pédagogique. En fait, cette procédure est rarement appliquée et l'on pratique, soit une charge à tension constante, soit plus généralement, une charge dite « IU ».

Pour s'affranchir de l'électrolyse de l'eau, la tension est fréquemment limitée à 2,40 V. L'application d'une telle tension à un accumulateur déchargé génère des courants particulièrement intenses, si bien que les chargeurs doivent être pourvus d'une limitation en courant. La charge débute donc sous courant constant, la tension, croissante, étant inférieure à 2,40 V. Quand cette valeur est atteinte, la charge se poursuit sous tension constante, tandis que le courant décroît. Dans les expériences décrites plus avant, le courant est limité à $5 I_n$.

2.3.2. Autodécharge

Nous avons, sur la figure 3, porté les réactions (1) et (2) aux électrodes, ainsi que celles (13) et (14), dites de dissociation de l'eau. Il apparaît qu'à l'électrode positive, la réaction (13) se déroulant de gauche à droite, fournit deux électrons et que la réaction (1) en consomme deux. En conséquence, en l'absence de courant extérieur, les réactions (1) et (13) peuvent se produire spontanément, de gauche à droite à la plaque positive, les espèces intervenant et les valeurs des potentiels autorisant le processus. Pour de semblables raisons, les réactions (2) et (14) ont lieu à l'électrode négative. Ainsi donc, l'accumulateur isolé consomme la matière active de chacune de ses électrodes, donc se décharge.

De l'oxygène gazeux est libéré à l'électrode positive et de l'hydrogène gazeux, à la négative, respectivement selon les réactions globales :



Ce phénomène est l'autodécharge de l'accumulateur au plomb. Est-ce à dire que ce dernier ne peut demeurer à l'état chargé ? Si la réponse théorique est affirmative, la réponse pratique doit être nuancée, parce que, pour les potentiels rencontrés dans l'accumulateur au repos, la cinétique de décomposition de l'eau est lente. Pour fixer les idées, un accumulateur au plomb isolé perd environ 10% de sa capacité en un mois, donc se retrouve déchargé au bout d'un an. Par contre, si au cours d'une charge, les électrodes sont portées à des potentiels notablement plus élevés qu'au repos, la cinétique de décomposition de l'eau est fortement accélérée, et l'émission gazeuse conséquente. C'est le phénomène du « gassing ».

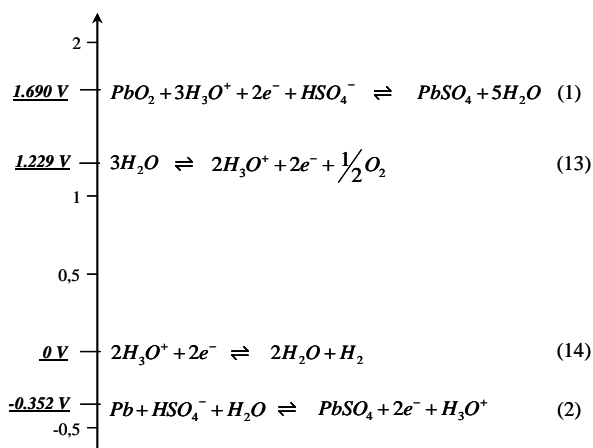


Figure 3 : décomposition de l'eau et phénomène d'autodécharge

2.3.3. Stratification

Au cours de la charge, de l'acide sulfurique se forme au sein des pores puis s'écoule, hors de ces derniers, dans l'espace inter-électrodes. Ce volume inter-électrode est rempli d'un électrolyte qui peut, en situation de décharge profonde, être proche de l'eau. Dans ces conditions, l'acide, plus dense, a tendance, malgré la diffusion, à se concentrer au fond du bac et le bas des plaques baigne dans cet acide. Il résulte des relations (8) et (10) que la fem en bas de plaques est plus élevée qu'en haut, et, de l'application de la loi d'Ohm, que la densité de courant de charge varie en sens inverse. En conséquence, le bas des plaques est insuffisamment chargé et est donc sujet à la sulfatation. En outre, des courants internes, dus aux gradients de potentiels, circulent dans les plaques. Cet ensemble de phénomènes est appelé « stratification de l'électrolyte » [2]. Dans cette situation, la fem mesurée est anormalement élevée et conduit à des mesures inexactes. Ce phénomène est efficacement prévenu par une émission de gaz prolongée, lors des phases de charge, qui, à la fois, brasse l'électrolyte et purge les pores de l'acide pur qui s'y forme.

2.4. Vieillessement de la batterie

« L'état de santé » de la batterie (puisque l'on dit ainsi) peut être associé à des phénomènes lents entraînant une chute progressive de sa capacité. Dès lors, la batterie est déclarée « morte » quand sa capacité n'atteint plus qu'une fraction donnée de la capacité initiale (80 ou 60%, selon les applications). Il est également possible que la batterie refuse brutalement tout service. Il peut alors s'agir d'une rupture de connexion ou d'un court-circuit, internes.

La sulfatation affecte les deux électrodes des batteries laissées au repos dans un état de charge intermédiaire. Ce phénomène résulte de ce que les cristaux de sulfate de plomb sont thermodynamiquement d'autant plus stables qu'ils sont plus gros. En conséquence, durant les périodes de repos, un processus de dissolution/précipitation provoque la croissance des plus gros cristaux aux dépens des plus petits. Ce processus, favorisé par un faible état de charge, provoque une diminution de la surface spécifique du sulfate de plomb. Ce dernier se transforme alors incomplètement en dioxyde ou en plomb au cours des charges qui suivent. Il en résulte une chute de capacité de l'accumulateur, aggravée par une passivation des électrodes.

La corrosion des grilles positives est due au phénomène suivant. Le plomb n'est pas stable dans le domaine défini par les fourchettes de pH et de potentiel de l'électrode positive, aussi bien à l'état de repos qu'en

charge. En conséquence, cet élément constitutif essentiel de l'alliage de grille, a tendance à s'oxyder au niveau des plaques positives. Cette corrosion, dont il faut retenir le caractère inéluctable, est fréquemment la cause de la défaillance définitive de l'accumulateur, qu'il s'agisse d'une chute de la conduction électrique de ces grilles, d'une altération de leurs propriétés mécaniques ou d'une altération du contact électrique grille/matière active.

Un facteur de défaillance peut intervenir préalablement à la corrosion. Il s'agit de la dégradation de la matière active positive, sous forme de particules micrométriques. Ce phénomène, appelé « shedding » (perte ou chute), est précédé du « softening » (ramollissement). Ces particules tombent au fond du bac ou pénètrent dans le réseau poreux des séparateurs, conduisant à un certain colmatage de ces derniers, tandis que l'accumulation de sédiments peut provoquer des courts-circuits entre plaques.

L'état de santé, hormis dysfonctionnement grave de la batterie, est généralement exprimé par le SOH (anglicisme State Of Health) qui sera défini au prochain paragraphe.

3. Dispositif expérimental

Il importe, avant d'aborder la description du dispositif expérimental, de préciser quelques points de terminologie relativement aux objectifs poursuivis. La capacité nominale C_n a été définie au § 2.3.1., mais ce concept est insuffisant. On sait que la batterie vieillit (cf. § 2.4.) et que sa capacité diminue au fil du temps.

Par définition, la capacité effective C_e est la capacité de la batterie, c'est à dire la quantité maximum d'électricité qu'elle est capable de fournir, à une période donnée de son existence. On associe à toute quantité d'électricité fournie par la batterie, son état de charge « SOC » (anglicisme State Of Charge), ainsi défini :

$$\text{SOC} = \frac{C_e - Q_{\text{déchargée}}}{C_e} \quad (17)$$

Il résulte de cette définition que les états de charge et de décharge, complètes, correspondent respectivement à des SOC de 100 % et de 0 %.

La tension en circuit ouvert, pour un SOC donné, est désignée par l'« OCV » (anglicisme Open Circuit Voltage). Il apparaîtra plus avant qu'il existe une relation OCV/SOC. Mais il faut être conscient qu'il ne suffit pas de débrancher la batterie pour mesurer son OCV. Pendant la phase d'activité précédant la mesure, l'électrolyte qui est le siège de processus de migration/diffusion ioniques, est hétérogène. L'homogénéité, qu'implique la mesure, est obtenue en accordant à la batterie un temps de repos durant lequel les processus diffusifs installent une répartition

homogène des espèces ioniques. L'électrolyte peut, en outre, être le siège d'une stratification. Dans ce cas, la mesure de l'OCV est entachée d'erreur. Il faut supprimer la stratification en provoquant l'émission gazeuse.

La batterie vieillit au cours de sa vie active et ses performances diminuent. Cette évolution est appréciée à l'aide du SOH, déjà introduit. Par définition,

$$\text{SOH} = C_e / C_n \quad (18)$$

Le SOH décroît donc depuis l'unité, qui correspond à la batterie neuve, jusqu'à une valeur qui est fixée selon l'emploi prévu de la batterie, généralement à 0,80, parfois à 0,60.

Le dispositif expérimental présenté sur la figure 4 participe à la mesure de l'OCV et de la résistance interne R_i d'un accumulateur, pour différents SOC et SOH. Plus précisément, il permet la charge de type IU et la décharge sous courant constant de l'accumulateur considéré. La charge, à partir d'une alimentation stabilisée en courant et tension, convenablement programmée, ne pose pas problème. Il en va différemment pour la décharge sous courant constant. L'utilisation d'un rhéostat imposant un asservissement, on a préféré utiliser une alimentation stabilisée en courant. Les branchements de la figure 4 sont représentés dans le cas de la décharge. La résistance R_1 permet d'éviter que la tension aux bornes de l'alimentation stabilisée ne devienne négative.

Pour mesurer la résistance interne, on branche un circuit RC parallèle aux bornes de l'accumulateur et l'on enregistre les caractéristiques transitoires du courant et de la tension au cours de la charge du condensateur lorsque l'interrupteur K_2 est fermé. L'inductance du circuit de mesure est évaluée à environ 1 μH ; un condensateur C de valeur 14 mF a été choisi tandis que la résistance R est celle du circuit incluant les connections. Le rapport, à un instant donné, de la chute de tension et du courant donne la résistance interne. Un exemple d'enregistrement est donné en figure 5.

Il convient de préciser que, pour l'évaluation de la résistance interne à partir des enregistrements des transitoires de courant et tension, des précautions doivent être prises quant au choix de l'intervalle de temps utilisé ; cet aspect ne sera pas détaillé dans cet article.

En fin de mesure, après ouverture de l'interrupteur K_2 , le condensateur est déchargé dans une résistance R_2 grâce à la fermeture de l'interrupteur K_3 . On notera que cette mesure de comportement transitoire n'affecte pratiquement pas le SOC de l'accumulateur.

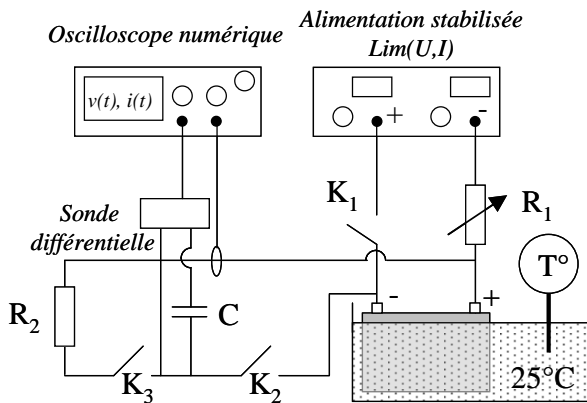


Figure 4 : représentation schématique du dispositif expérimental

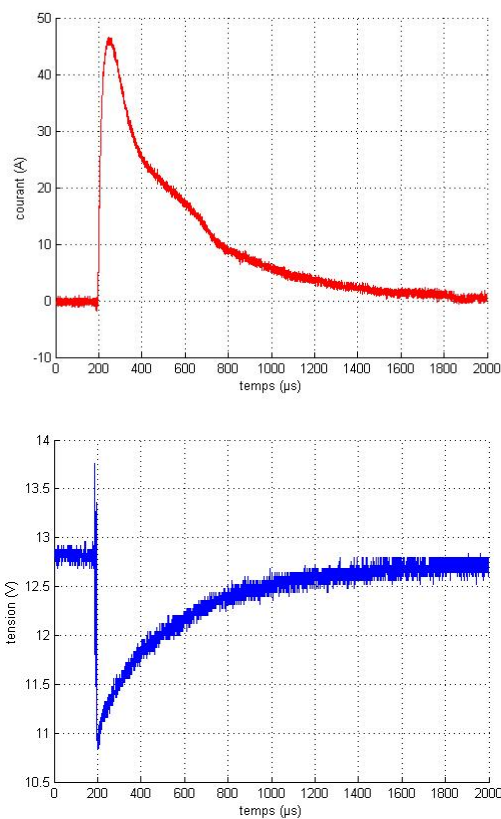


Figure 5 : enregistrements des transitoires de courant et tension obtenus lors de la charge du condensateur

Le protocole de mesure est le suivant.

1. L'accumulateur en essai est placé dans un bain thermostaté, maintenu à 25°C.
2. La charge initiale de l'accumulateur de type IU ($I = 5 I_n$; $U = 16 \text{ V}$) est poursuivie pendant 24 h. La charge est alors complète (SOC = 100 %).
3. Le SOC est modifié par décharge imposée par le générateur à courant constant.
4. Les différentes mesures (OCV et R_i) sont alors effectuées pour différents SOC, et, au fur et à mesure des cycles successifs, pour différents SOH.

- Chaque mesure d'OCV (qui est une simple mesure de tension) est effectuée après une période de repos de 24 heures.
- Chaque mesure de R_i se fonde sur deux enregistrements, respectivement sur deux et dix millisecondes.

4. Exploitation et interprétation des mesures

4.1. État de charge

Les mesures décrites plus haut sont réalisées sur des batteries neuves ou cyclées, l'objectif étant dans un premier temps d'établir des relations entre les paramètres mesurés et l'état de charge des accumulateurs acide – plomb, indépendamment de leur degré de vieillissement.

4.1.1. Évolution de l'OCV

L'OCV correspond à une mesure de la fem de l'accumulateur au repos, et par conséquent rend *a priori* compte de la concentration de l'électrolyte en acide sulfurique comme l'indique la relation (8). Il est donc logique d'observer une relation entre l'OCV et l'état de charge de la batterie. Une relation quasi-linéaire est généralement obtenue, comme l'illustre la figure 6, justifiant la pertinence de cette mesure pour l'établissement du SOC de la batterie. Une contrainte forte est toutefois le délai nécessaire à l'établissement d'un état homogène de l'électrolyte ; ainsi, la Norme Européenne EN 50342 [3] préconise un temps de repos d'au moins 24 heures avant de procéder à la mesure d'OCV. Cette précaution représente un handicap certain pour l'application de cette méthode d'évaluation du SOC dans le secteur automobile.

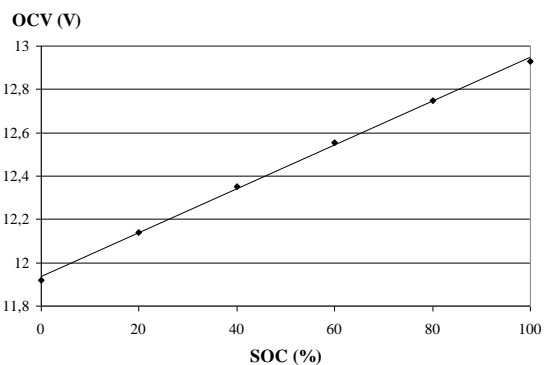


Figure 6 : évolution de l'OCV en fonction du SOC ; SLI batterie 12 V, 50 Ah, 420 A, cyclée 3 fois ; décharge sous In (2,5 A).

Mais une autre grandeur caractéristique de l'accumulateur est également susceptible d'évoluer avec l'état de charge : la résistance interne.

4.1.2. Évolution de la résistance interne

La résistance interne R_i , mesurée comme indiquée dans la section 3, évolue elle aussi avec l'état de charge de l'accumulateur. Comme indiqué en § 2.3.1., cette augmentation de R_i avec la décharge correspond à une augmentation de la résistivité de l'électrolyte d'une part, et à la création de $PbSO_4$ non conducteur sur la matière active d'autre part. La valeur de la résistance interne évolue, pour une batterie neuve, de façon monotone entre 7,9 m Ω et 13,3 m Ω , correspondant respectivement à des SOC de 100% et 7,5% (figure 7).

4.1.3. Phénomène de "coup de fouet"

Une difficulté rencontrée dans ce type de mesure (mise en relation entre une grandeur type OCV ou R_i et l'état de charge) réside dans la validation de l'état de référence, c'est-à-dire de la charge complète (SOC de 100%).

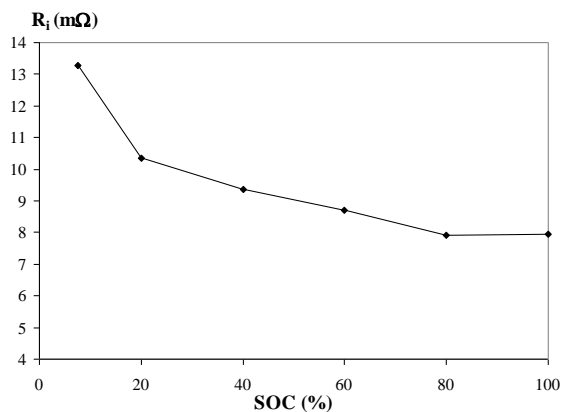


Figure 7 : évolution de la résistance interne R_i d'une batterie neuve en fonction de son état de charge (SLI batteries 12 V, 50 Ah, 420 A)

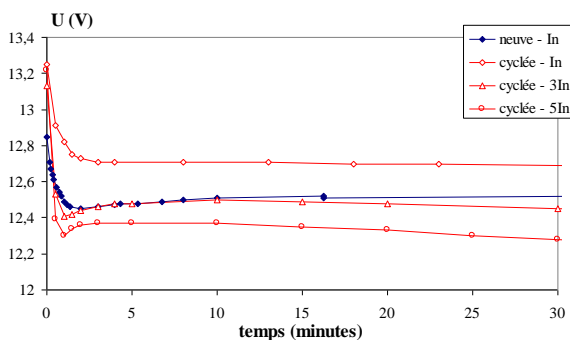


Figure 8 : premières minutes des caractéristiques de décharges sous I_n , $3I_n$, $5I_n$ pour une batterie cyclée et sous I_n pour une batterie neuve (SLI batteries 12 V, 50 Ah, 420 A)

Dans ce qui précède, cette difficulté a été résolue par l'adoption du protocole décrit plus haut, lui-même inspiré de la Norme Européenne EN 50342 [3] déjà citée. L'état de charge complet peut être expérimentalement confirmé par l'observation du phénomène de "coup de fouet" [4], discontinuité intervenant (i) lors de la charge à l'approche de la charge complète (la tension aux bornes de la batterie subit une augmentation rapide suivie d'une chute) ou (ii) lors des premières minutes de décharge d'une batterie à partir de l'état de pleine charge (chute rapide suivie d'un retour de la tension aux bornes de la batterie). Dans ce dernier cas, une interprétation récente [4-5] du "coup de fouet" peut être résumée comme suit : lorsque l'accumulateur est pleinement chargé, une fine couche de PbO_2 est au contact du plomb conducteur sur l'électrode positive ; c'est cette fine couche qui sera réduite en premier lors des premières secondes de décharge, créant ainsi une couche isolante de $PbSO_4$ limitant le courant (phase de chute de tension). En raison de la différence d'encombrement entre les cristaux de PbO_2 et $PbSO_4$, la couche isolante de $PbSO_4$ subirait une contrainte mécanique conduisant à une rupture permettant le passage du courant (augmentation de la tension jusqu'à une valeur plateau qui n'évoluera plus que lentement). Cette interprétation est aujourd'hui encore discutée, et la question reste ouverte.

Néanmoins, la relation entre charge complète de l'accumulateur et observation du phénomène de "coup de fouet" est avérée. La figure 8 montre ce phénomène de "coup de fouet" pour des batteries d'état de santé différents (batterie neuve et "cyclée") et pour différents courants de décharge (I_n , $3I_n$, $5I_n$). Il apparaît ainsi clairement que la batterie neuve délivrant I_n , ainsi que les batteries "cyclées" délivrant $3I_n$ et $5I_n$ étaient pleinement chargées ; en revanche, la batterie "cyclée" délivrant I_n n'était visiblement pas en pleine charge.

4.2. Vieillessement de la SLI batterie

L'état de vieillissement de l'accumulateur (SOH) est susceptible d'influencer de façon significative les relations entre état de charge et grandeurs électriques mesurées (OCV et R_i).

4.2.1. Évolution de l'OCV

La figure 9 présente l'évolution de l'OCV pour différents niveaux de charge. La caractéristique (2) est celle présentée en figure 6 ; il s'agit d'une batterie ayant subi 3 cycles profonds. La caractéristique (1) est celle d'une batterie neuve, et la (3) celle d'une batterie ayant subi 20 cycles profonds.

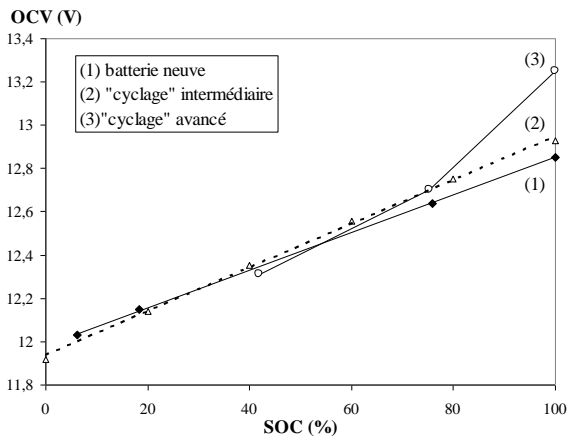


Figure 9 : évolution de l'OCV en fonction du SOC ; SLI batteries 12 V, 50 Ah, 420 A à différents états de vieillissement ; décharge sous In (2,5 A).

Les caractéristiques (1) et (2) peuvent être approximées par des droites, dont, au fur et à mesure du vieillissement, la pente augmente légèrement. Ainsi, la valeur d'OCV pour un SOC de 100% passe de 12,85 V à 12,93 V après 3 cycles profonds. La caractéristique (3) quant à elle s'écarte du comportement linéaire, et voit sa valeur d'OCV, pour un SOC de 100%, significativement évoluer (13,25 V). A notre connaissance, si ce comportement a déjà été observé, peu d'interprétations satisfaisantes sont proposées, et nous nous limiterons donc à rapporter cette évolution sans plus de commentaires.

4.2.2. Évolution de la résistance interne

Un indicateur potentiellement pertinent pour l'établissement de l'état de santé (SOH), est la résistance interne de la batterie R_i [6]. En effet, les phénomènes de sulfatation (réduisant la surface active des électrodes et la conduction électronique), de corrosion des grilles positives (réduisant le contact grille / matière active) et de « shedding » (réduisant la conduction ionique par colmatage des séparateurs) peuvent tous contribuer à une augmentation de la résistance interne de la batterie (avec des dynamiques différentes) pour un état de charge donné. Les variations observées sur la valeur de R_i sont surtout significatives pour des valeurs de SOC faibles (en dessous de 60%). À titre d'exemple, la figure 10 présente l'évolution de la résistance interne en fonction de la charge débitée (décharge) pour une batterie neuve (caractéristique (1)) et pour une batterie ayant subi 3 cycles profonds (caractéristique (2)).

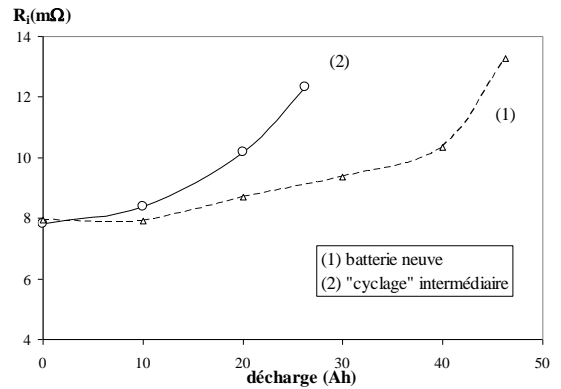


Figure 10 : évolutions de la résistance interne R_i d'une batterie neuve et d'une batterie "cyclée" en fonction de la charge débitée (SLI batteries 12 V, 50 Ah, 420 A)

5. Conclusion

On observe, comme attendu, une évolution quasi linéaire entre état de charge (SOC) et OCV d'un accumulateur plomb / acide (12 V, 50 Ah, 420 A). La mesure de l'OCV nécessite toutefois un temps de repos considérable pour fournir une valeur fiable. De plus, cette caractéristique OCV vs. SOC est influencée par le vieillissement (SOH) de l'accumulateur. La non-prise en compte du vieillissement conduirait alors à une estimation erronée de l'état de charge de la batterie.

La variation de résistance interne peut également refléter l'état de charge de l'accumulateur. Par ailleurs, l'évaluation de cette résistance interne nécessite des conditions de mesure plus aisées que celles imposées pour l'OCV. Toutefois, la résistance interne évolue également avec l'état de santé de la batterie, cette évolution devenant réellement significative pour des états de charge (SOC) inférieurs à 60%.

6. Références

- [1] M. Perrin, "Contribution à l'amélioration des batteries au plomb fermées pour l'application au véhicule électrique", thèse de Doctorat de l'Université Nancy 1, 2001.
- [2] J. Robert, J. Alzieu, « Accumulateurs – Considérations théoriques – Accumulateurs au plomb », Techniques de l'Ingénieur D 3 351- D 3 352 (2005).
- [3] Norme Européenne EN 50342 + A1 "Lead-acid starter batteries – General requirements, methods of test and numbering", CENELEC European Committee for Electrotechnical Standardization, 2001.
- [4] A. Delaille, M. Perrin, F. Huet, L. Hernout, "Study of the "coup de fouet" of lead-acid cells as a function of their state-of-charge and state-of-health" Journal of Power Sources 158 (2006) 1019–1028.
- [5] C.P. de Oliveira, M.C. Lopes, "Early stages of the lead-acid battery discharge", Journal of Power Sources 138 (2004) 294–300.
- [6] B. Hariprakash, S.K. Martha, Arthi Jaikumar, A.K. Shukla, "On-line monitoring of lead-acid batteries by galvanostatic non-destructive technique", Journal of Power Sources 137 (2004) 128–133.

Commande d'une pompe par un générateur photovoltaïque

Amir ARZANDÉ,

Professeur à Supélec, Département Énergie
SUPÉLEC

3 rue Joliot Curie, 91192 GIF sur YVETTE cedex

amir.arzande@supelec.fr

Thibault ÉON, Florian ESCOURROU

Elèves en deuxième année à Supélec

Résumé : La caractéristique tension-courant d'un panneau photovoltaïque dépend à la fois de l'éclairement et de la température. Quand un panneau solaire est utilisé pour alimenter une pompe, il faut adapter la caractéristique du panneau à celle de la pompe pour arriver à récupérer la puissance maximale que le panneau peut délivrer. Pour cela, on peut ajouter un convertisseur DC – DC (hacheur) entre les deux dispositifs. La commande convenable du convertisseur permet de réguler la puissance maximale quels que soient l'éclairement et la température.

1. Introduction

Cette étude est menée dans le cadre d'un projet de conception réalisé par deux élèves de deuxième année de Supélec. L'étude se déroule sur une durée de 2 mois, ce qui représente un volume horaire de 40h environ. Le planning est équitablement réparti entre études théoriques et travaux pratiques en laboratoire.

Le but du projet est d'adapter la caractéristique d'un panneau solaire à celle d'une pompe. Dans un premier temps on explique d'une manière générale le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, ensuite les différentes caractéristiques d'un panneau solaire et celles d'un moteur à courant continu (pompe) seront présentées. Dans la deuxième partie on explique comment on peut adapter le fonctionnement du moteur à celui du panneau solaire pour obtenir un meilleur rendement. La dernière partie sera consacrée à la réalisation du convertisseur DC/DC permettant l'adaptation du moteur au panneau solaire.

2. Principes théoriques de fonctionnement des composants

Dans cette partie nous allons expliquer d'une part le fonctionnement théorique d'une cellule photovoltaïque et d'autre part celui du moteur à courant continu.

2.1 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Le principe de fonctionnement de la cellule fait appel aux propriétés des semi-conducteurs et à celles du rayonnement. Les solides peuvent être classés selon diverses propriétés physiques. Une des plus importantes, d'un point de vue pratique, est la résistivité électrique.

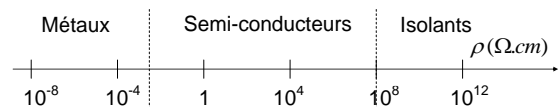


Figure 1 : Différents types de matériaux

Il faut noter que quand la température augmente :

- la résistivité d'un métal augmente
- la résistivité d'un semi-conducteur diminue

Parmi les semi-conducteurs élémentaires les deux plus importants sont le silicium et le germanium qui appartiennent au groupe IV de la table périodique des éléments. Une cellule photovoltaïque comporte une jonction PN. On construit une jonction PN en « accolant » deux morceaux de semi-conducteurs, l'un de type P, l'autre

de type N. Après assemblage, il apparaît une zone dépourvue de porteurs libres au voisinage de la jonction. Il y a de nombreuses recombinaisons ce qui provoque la disparition des porteurs mobiles dans la zone centrale. Il ne reste que les ions fixes. Cette zone s'appelle la Zone de Charges d'Espace (ZCE). Les ions fixes de part et d'autre créent alors un champ électrique interne qui s'oppose à la cause qui lui a donné naissance, c'est-à-dire la diffusion des porteurs majoritaires, ce qui conduit à un état d'équilibre. Le champ interne crée une d.d.p. V_0 entre la région N et la région P appelée barrière de potentiel.

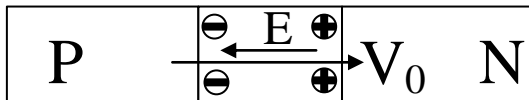


Figure 2 : jonction PN

Quand des photons entrent dans la zone de charges d'espace et heurtent des atomes ils libèrent des électrons. Le champ électrique exerce des forces sur ces électrons et les pousse dans la zone N. Il apparaît donc un courant. Quand la cellule n'est pas reliée à un circuit extérieur un courant des porteurs majoritaires égal au premier courant circule de la zone N vers la ZCE. Quand la cellule est reliée à un circuit extérieur il y aura un courant qui va circuler dans ce dernier.

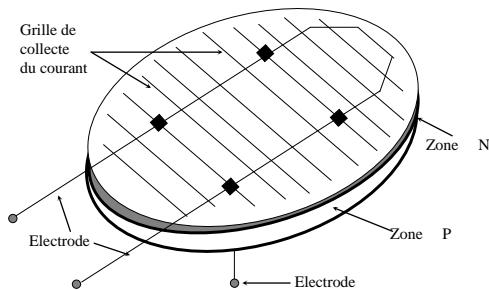


Figure 3 : principe d'une cellule photovoltaïque

2.2 Modélisation du panneau solaire

Une cellule photovoltaïque élémentaire peut être modélisée, en première approximation, par le schéma suivant :

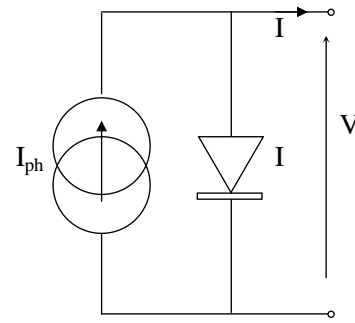


Figure 4 : schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

Un panneau solaire est constitué de plusieurs cellules photovoltaïques mises en série et en parallèle selon un câblage du type :

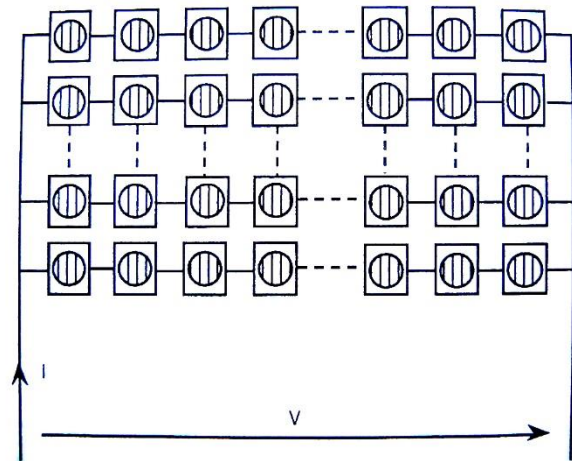


Figure 5 : câblages série et parallèle de cellules photovoltaïques

2.3 Principe de fonctionnement du moteur à courant continu

Nous utiliserons dans notre étude un moteur à courant continu à aimant permanent à la place d'une pompe à cause de la sécurité car l'eau et l'électricité ne font pas bon ménage. Pour pouvoir freiner le moteur on utilise un frein à courants de Foucault.

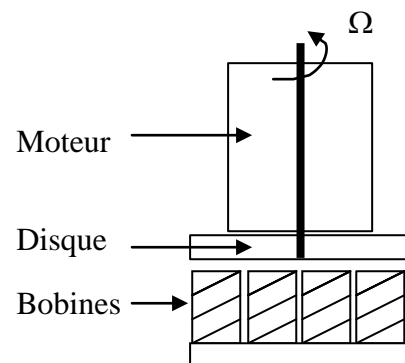


Figure 6 : schéma général du moteur

Ce système comporte un disque entraîné par l'arbre du moteur et quatre enroulements alimentés par une source de tension continue.

On utilise deux sources indépendantes pour alimenter l'induit du moteur et les bobines. Les bobines alimentées créent dans le disque un champ magnétique. Quand le disque tourne ce champ magnétique crée des courants de Foucault. L'existence du courant électrique et de l'induction dans le disque donne naissance tout d'abord à une force de résistance et donc à un couple résistant qui freine le disque.

Ce couple résistant est proportionnel à la vitesse de rotation du disque et au courant qui alimente les bobines, quand il n'y a pas de saturation. Les bobines sont alimentées par un courant continu et constant, $I_b=1,5A$. On peut donc écrire :

$$\sum C = J \frac{d\Omega}{dt} \quad \text{Équation mécanique}$$

$$C_{em} - C_r = J_{eq} \frac{d\Omega}{dt}$$

$$K I_m - K_r \Omega = J \frac{d\Omega}{dt}$$

$$U_m = E + RI$$

$$U_m = K \Omega + RI \quad \text{Équation électrique}$$

Pour un point de fonctionnement $\frac{d\Omega}{dt} = 0$

on peut établir une relation simple entre la tension d'alimentation et le courant du moteur.

$$U_m = \left(\frac{K^2}{K_r} + R \right) I$$

L'induit est alimenté par une source de tension continue de niveau réglable. On fait varier cette tension d'alimentation de l'induit de zéro jusqu'à sa tension nominale, 24V. On relève pour chaque point de fonctionnement la tension et le courant dans le moteur.

3. Etudes expérimentales des composants

3.1 Panneau solaire

Nous disposons d'un panneau solaire de dimensions 0,6mx1,5m. Ce panneau est éclairé par 40 lampes de 120W. Elles sont installées sur un support et elles font face aux panneaux. Les lampes sont alimentées par un gradateur permettant de modifier, à partir de la tension réseau (240V), la tension d'alimentation des lampes. Ainsi on peut

modifier l'éclairage des panneaux. Nous considérons que quand les lampes sont alimentées directement par 240 V l'éclairage sur le panneau est de 100%.

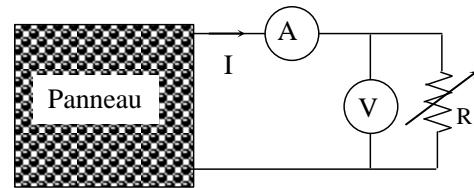


Figure 7 : montage pour relever $I=f(U)$

Pour relever la caractéristique du panneau solaire, $I=f(U)$, on fait varier la résistance du rhéostat R. On relève la caractéristique $I=f(U)$ dans différentes conditions d'éclairage. De plus nous mettrons en évidence la variation de cette caractéristique en fonction de la température en considérant dans un premier cas la cellule « à froid » puis dans un deuxième temps la cellule « à chaud » (la cellule ayant été alors préalablement éclairée à 100% pendant 10 minutes).

3.1.2 Panneau à froid

Les différentes caractéristiques $I=f(U)$ du panneau sont présentées sur les figures suivantes.

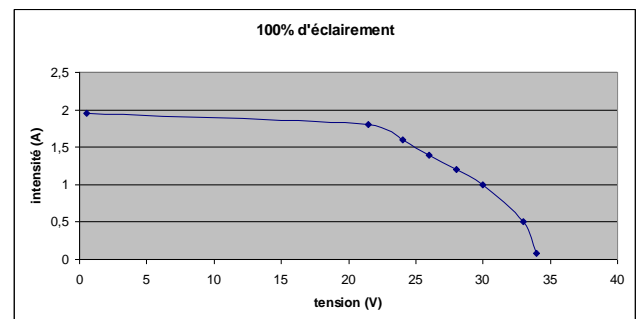


Figure 8 : panneau à 100% d'éclairage

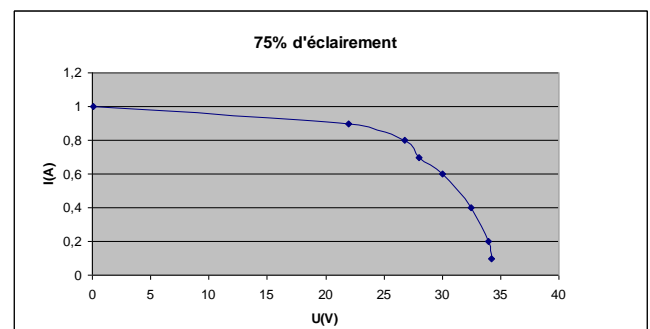


Figure 9 : panneau à 75% d'éclairage

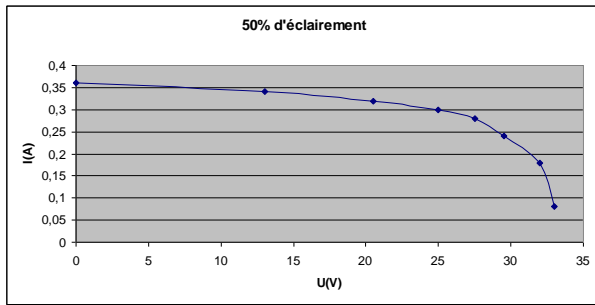


Figure 10 : panneau à 50% d'éclairement

3.1.3 Panneau à chaud

Après avoir éclairé le panneau à 100% de l'éclairement, pendant une dizaine de minutes, on considère que celui-ci est « à chaud » et nous relevons sa caractéristique.

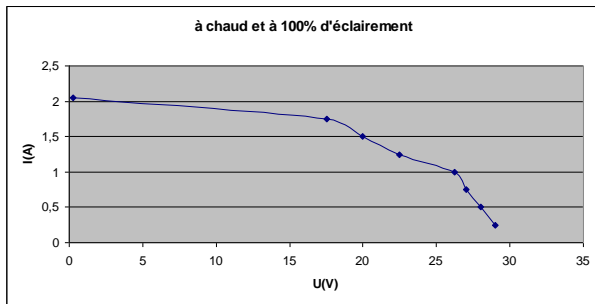


Figure 11 : panneau à chaud à 100% d'éclairement

3.1.4 Synthèses de relevés

Nous traçons la puissance délivrée par le panneau dans les différentes conditions. On constate d'une part que la puissance du panneau diminue quand l'éclairement diminue et que d'autre part cette puissance diminue quand la température augmente.

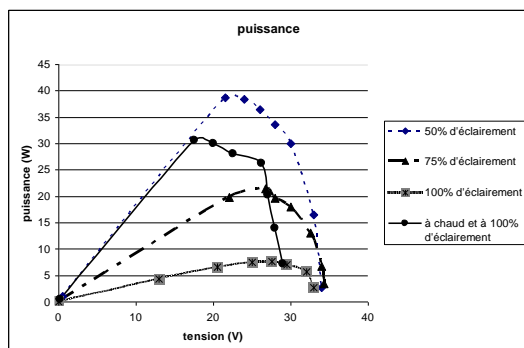


Figure 12 : Caractéristique P(U) pour différents éclairements

3.2 Moteur à courant continu

Afin de relever la caractéristique $I=f(U)$ de notre moteur à courant continu on réalise le montage présenté sur la figure suivante :

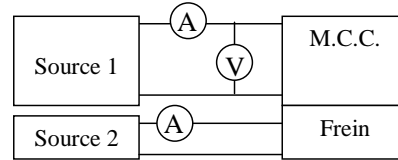


Figure 13 : M.C.C. et frein

On utilise deux sources pour alimenter l'induit du moteur et son frein. On fixe le courant dans le frein et on fait varier la tension d'alimentation de l'induit du moteur. Les caractéristiques $I=f(U)$ du MCC pour trois valeurs différentes du courant de freinage sont présentées sur la figure suivante.

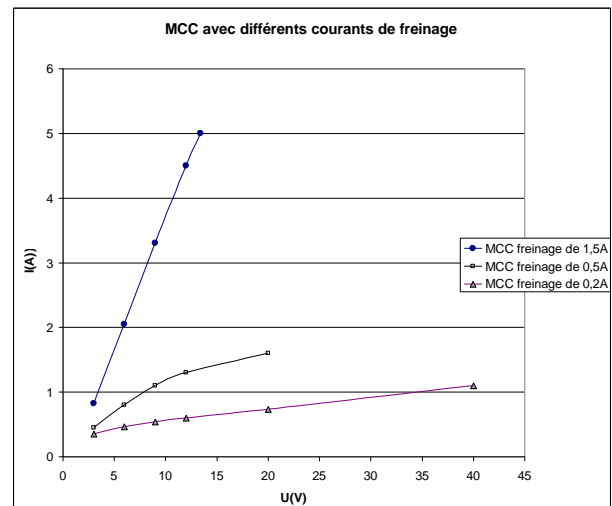


Figure 14 : MCC avec différents courants de freinage

4. Association du panneau solaire et la pompe (M.C.C.)

On alimente directement le moteur à courant continu par le panneau solaire. Le panneau est éclairé à 100% et le courant du frein du moteur est réglé à 1,5 A. Le point de fonctionnement ne se trouve pas sur le point où le panneau donne sa puissance maximale. Il est donc nécessaire d'adapter les deux caractéristiques.

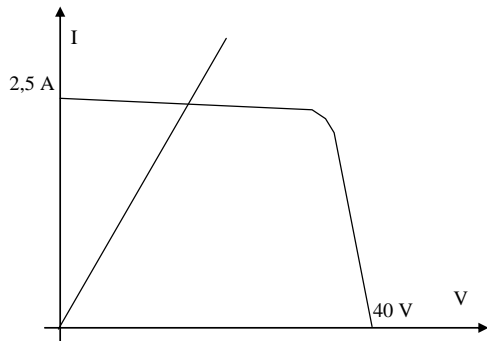


Figure 15 : point de fonctionnement panneau et moteur en association directe

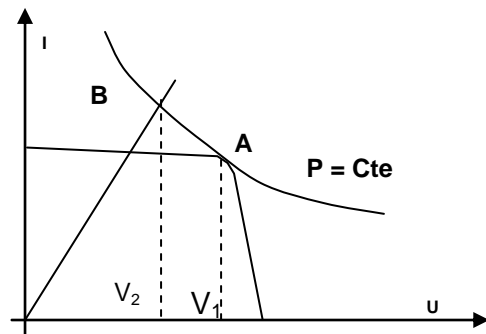


Figure 17 : optimisation du transfert de puissance

4.1 Adaptation des caractéristiques

On insère entre le panneau et le moteur un convertisseur DC/DC. On considère que le panneau délivre sa puissance maximale, P_{max} . Dans ce cas la caractéristique $I=f(U)$ à l'entrée du convertisseur est une hyperbole. On considère que les pertes dans le convertisseur sont presque nulles et donc que la puissance à la sortie du convertisseur est aussi P_{max} . La caractéristique à la sortie du convertisseur est la même que celle à l'entrée. Nous avons tracé sur la figure 16, à partir des relevés expérimentaux, la caractéristique $I=f(U)$ du panneau solaire, celle du moteur à courant continu et celle du hacheur. La courbe hyperbole présente à la fois la caractéristique à l'entrée et à la sortie du convertisseur pour la puissance maximale du panneau, $I=P_{max}/U$.

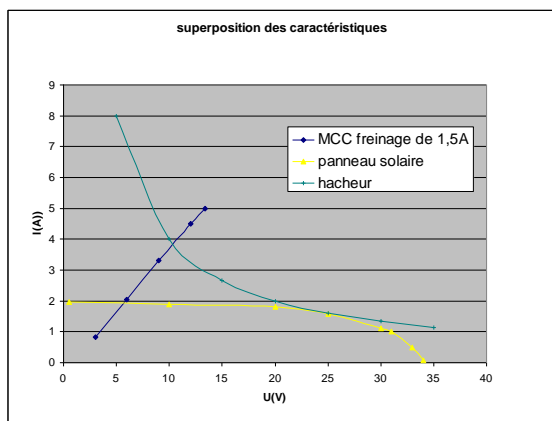


Figure 16 : superposition des caractéristiques

D'une manière générale, quand un panneau solaire est utilisé pour alimenter une charge, il faut adapter la caractéristique du panneau à celle de la charge pour arriver à récupérer la puissance maximale que le panneau peut débiter.

Les points A et B, sur la figure 17, sont respectivement le point de fonctionnement à l'entrée et à la sortie du hacheur. V_1 et V_2 sont donc les tensions à l'entrée et à la sortie du convertisseur. Il faut donc utiliser un hacheur abaisseur de tension.

4.2 . Réalisation du hacheur.

Le schéma du hacheur est présenté sur la figure 18. Il comporte un transistor MosFet et une diode.

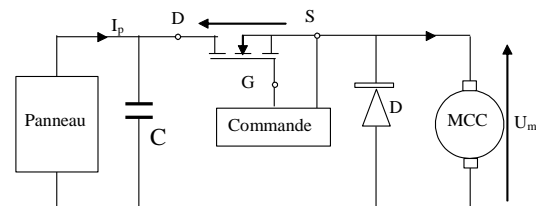


Figure 18 : schéma du hacheur

On a mis en parallèle avec le panneau un condensateur chimique de valeur élevée. Quand le transistor est bloqué le panneau charge le condensateur.

4.3 Principe de commande du hacheur

Le transistor du hacheur est commandé par un signal rectangulaire du rapport cyclique variable. La carte de commande utilise un circuit intégré LM3524 pour générer le signal de commande et un circuit intégré IR2113. Ce dernier est utilisé comme un driver. Le rapport cyclique peut être modifié soit en mode interne, par l'intermédiaire d'un potentiomètre, soit en mode externe, par l'intermédiaire d'une source extérieure par exemple une carte d'acquisition.

4.4 Vérification expérimentale de l'adaptation d'impédance

Pour mettre en évidence l'adaptation de l'impédance on a réalisé le montage suivant :

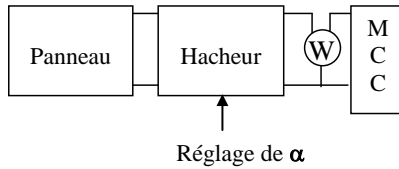


Figure 19 : montage de vérification de puissance

Le panneau alimente le MCC par l'intermédiaire du hacheur. On installe un wattmètre à la sortie du hacheur. Le courant de frein est réglé à 1,5 A. On fait varier le rapport cyclique du signal de commande du hacheur et on relève la puissance. La courbe présentée sur la figure suivante montre que la puissance reçue par le moteur passe par une valeur maximale.

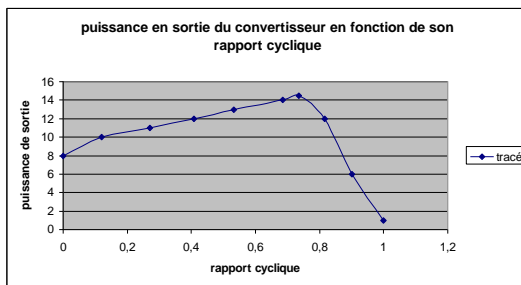


Figure 20 : puissance en sortie du convertisseur en fonction de son rapport cyclique

On constate qu'il y a des pertes dans le hacheur et que le rendement du hacheur n'est pas élevé.

6. Conclusion

Avec les diverses caractéristiques des composants du montage (panneau solaire et machine à courant continu), nous avons mis en évidence la nécessité d'introduire un convertisseur de puissance afin de se placer au point de fonctionnement qui optimise le transfert de puissance. Il s'agit en l'occurrence d'un hacheur abaisseur de tension, convertisseur DC-DC. Ainsi, en faisant varier son rapport cyclique, nous pouvons nous placer dans les conditions optimales de puissances précédemment définies.

En complément de ce projet, il serait intéressant d'envisager une régulation permettant de déterminer le rapport cyclique optimal quelles que soient les conditions d'ensoleillement. On peut penser à une régulation simple consistant à une recherche itérative du maximum de puissance. Cette solution nécessite la mise en place d'une carte d'acquisition ou d'un microcontrôleur.

L'installation électrique de notre établissement scolaire :

support pour l'enseignement de génie électrique en 1^{ère} année de BTS Electrotechnique

Didier BETHENCOURT

Lycée Lazare Carnot, 21 Bd Carnot
62022 ARRAS CEDEX

Résumé : La formation de nos futurs techniciens supérieurs s'appuie sur des systèmes représentatifs de l'électrotechnique. Le transport et, surtout, la distribution de l'énergie électrique sont parfaitement illustrés par l'installation de nos établissements. Ainsi, celles-ci peuvent être exploitées, conjointement par les enseignements « d'essais de systèmes » et de génie électrique, en 1^{ère} année, comme nous le recommandent les repères pour la formation.

L'article présente une description de l'installation électrique de notre établissement, une proposition de progression en génie électrique ainsi que le travail demandé aux étudiants lors de la visite des différents locaux électriques.

1. Introduction :

L'installation électrique de notre établissement (du poste de livraison EDF jusqu'aux circuits terminaux des salles de travaux pratiques) correspond, pour une très grande partie, aux contenus d'enseignement de génie électrique relatif aux paragraphes 212 (Transport de l'énergie électrique) et 213 (Distribution de l'énergie électrique).

Dans la progression présentée, l'installation électrique du lycée constitue le fil conducteur et le lien entre les séquences.

Les essais de systèmes utiliseront, simultanément, le même support ainsi que le TGBT communiquant qui équipera, prochainement, toutes les sections de STS Electrotechnique. Ces essais mettront en évidence les principales fonctions assurées par le circuit durant lesquels on analysera :

- La qualité du réseau (fluctuation, THD, cosφ, ...)
- La télégestion,
- La protection des personnes,
- La protection du matériel,
- La compensation de l'énergie réactive.

En génie électrique l'approche sera différente, je propose aux étudiants une démarche de conception de l'installation électrique Basse Tension. Au-delà de l'aspect technique (dimensionnement et choix), l'aspect économique et la sûreté (sécurité – disponibilité) seront

pris en compte (Quelle solution technique est la mieux adaptée ?)

L'installation existante permet alors de vérifier le travail effectué, d'analyser les solutions retenues ou d'illustrer les séquences à caractère technologique.

Le schéma de l'installation sera relevé et reproduit à partir d'un logiciel de DAO.

2. Description de l'installation électrique :

- **Poste de livraison EDF 20 kV, alimentation en coupure d'artère.**

Le local comprend :

- le matériel nécessaire pour la coupure d'artère (partie EDF),
- un câble d'arrivée 20kV 3x95mm² Alu HN33S23,
- 3 cellules :
 - . une cellule Interrupteur type SM6 IM375,
 - . une cellule de comptage HT type SM6 CM,
 - . une cellule protection générale type SM6 DM2 avec protection par disjoncteur à double sectionnement,
- un système de comptage CEVATEC 2000,
- les équipements de protection obligatoires dans ce type de local.

Les cellules sont conformes aux exigences des recommandations CEI, des normes UTE et des spécifications EDF.

- tension d'isolement : 24 kV
- tenue à l'onde de choc : 125 kV crête

- tenue à la fréquence industrielle : 50 kVeff/1 mn
- tenue aux surintensités : 12,5 kA eff/ 1s
- tension de service : 20 kV

- **Traversée souterraine de la cour de l'établissement par un câble HT 20 kV,**
- **Poste de transformation 20 kV / 400 V comprenant :**
 - 2 cellules :
 - . une cellule interrupteur HT,
 - . une cellule protection transformateur,
 - un transformateur HTA /BT, 20 kV / 410 V, 800kVA immergé à remplissage intégral avec protection par DGPT,
 - câble unifilaire U1000AR2V 4x300mm² par phase et neutre (secondaire),
 - protection en bout de câble par disjoncteur tétrapolaire à coupure visible D1250 débouchable et verrouillable en position débouchée.
 - entre disjoncteur et TGBT, 10m câble unifilaire U1000AR2V 4x300mm² par phase et neutre.
- **Local TGBT :**

On ne s'intéresse qu'à la partie alimentant le secteur « électrotechnique ».

- Alimentation du jeu de barres,
- départ principal du secteur électrotechnique protégé par un compact NS630N avec déclencheur STR 23 SE,
- câble de liaison entre ce disjoncteur et le tableau de répartition d'une partie des ateliers du lycée : 20m de câble unifilaire U1000AR2V 3x240mm² par phase et neutre.
- **Tableau de répartition,**
- **Tableaux divisionnaires se trouvant dans chacune des zones du secteur « électrotechnique ».**
- **Circuits terminaux :**
canalisation préfabriquée, alimentation des tables de manipulation, ...

Ces différentes installations feront l'objet d'une visite dès la première séance.

Associé à cette visite, un travail est demandé, celui-ci sera utile et exploité durant les séquences ultérieures.

Une visite d'une installation électrique d'une dimension plus importante (entreprise Nylstar près d'Arras) est réalisée en cours d'année. L'accent sera alors mis sur la disponibilité de l'énergie électrique et des solutions techniques adoptées.

Proposition de progression :

Séquence 1 : Architecture des réseaux HT
Caractéristiques de l'appareillage HT

Séquence 2 : Conception d'une installation électrique : démarche générale

Il s'agit, ici, de déterminer les actions à mener (éléments à dimensionner, choix à réaliser, ...) pour concevoir l'installation électrique. Au préalable sont définies les données à prendre en compte (normes et tarification de l'énergie notamment).

(Ce travail permet de présenter le § 213 « distribution de l'énergie électrique » du référentiel du BTS Electrotechnique).

Séquence 3 : Choix du transformateur de distribution HTA / BT

- Prise en compte du mode d'utilisation des récepteurs (introduction des coefficients d'utilisation et de simultanéité),
- Bilan des puissances actives et réactives, dimensionnement du transformateur,
- Vérification du choix du transformateur (par calculs puis à l'aide du logiciel Ecodial 3.37).

Séquence 4 : Technologie du transformateur de distribution HTA / BT

- Constitution,
- Justification des matériaux employés et de certaines particularités technologiques,
- Refroidissement et protection,
- Décodage de la fiche technique du transformateur.

Séquence 5 : Amélioration du facteur de puissance

- Objectifs recherchés et solutions techniques possibles,
- Dimensionnement et choix d'une batterie de condensateurs (à placer sur le tableau de répartition d'une partie des ateliers), à partir d'une analyse de la qualité du réseau réalisée en essais de systèmes et exploitée ici.
- Chiffrage de l'installation (le prix de vente comprend la fourniture du matériel, la main d'œuvre,



les frais d'études, les frais de déplacement et de suivi de chantier).

- Calcul de l'amortissement et conclusion sur la rentabilité de l'investissement.

(il serait, également, possible de travailler à partir d'une facture EDF du lycée : compensation globale)

Séquence 6 : Protection des circuits

Les dispositifs de protection permettent la détection de situations anormales et y pallient de façon sûre, sélective et rapide. Les objectifs terminaux de cette séquence sont donc la justification du choix de certains dispositifs et la vérification de la sélectivité de l'installation (à partir des courbes de déclenchement des disjoncteurs existants et par essais).

Séquence 7 : Choix d'une canalisation

Le but de cette séquence est de déterminer la section des conducteurs de la canalisation entre le TGBT et le tableau de répartition et de vérifier la chute de tension maximale et les contraintes thermiques en cas de court-circuit.

Séquence 8 : Elaboration des schémas unifilaires à l'aide d'un logiciel de DAO.

3. Compétences visées :

Séquences	1	2	3	4	5	6	7	8
C01 : Analyser un dossier								
C02 : Choisir une solution technique								
C03 : Analyser une solution technique								
C05 : Déterminer les ressources et les contraintes								
C07: Argumenter sur la solution technique retenue								
C08 : Concevoir une solution technique								
C10 : Réaliser les représentations graphiques								
C11 : Estimer les coûts prévisionnels								
C12 : Concevoir une procédure								
C13 : Appliquer les normes								

Tâches professionnelles associées :

- **T1.3 :** concevoir des solutions techniques dans le respect du cahier des charges et des contraintes imposées par le procédé.
- **T1.4 :** Réaliser les dossiers techniques de fabrication et d'exécution de chantier.
- **T1.5 :** Elaborer une offre adaptée (chiffrage et devis) au cahier des charges en déterminant les moyens d'exécution prévisionnels.

4. Travail demandé lors de la visite des locaux électriques :

Objectifs :

Le travail demandé a pour objectif de relever les données techniques (matériel utilisé, référence, plaque signalétique, matière des câbles, mode de pose, ...) nécessaires aux séquences de génie électrique ultérieures.

Ces séquences permettront de justifier les principales solutions techniques de l'installation électrique du lycée.

On demande également de relever, à main levée, le schéma de distribution HTA et BT (du poste de livraison à un circuit terminal situé dans le secteur « électrotechnique »

Une réflexion sur les problèmes de refroidissement des équipements électriques sera, également, abordée.

A. Poste de livraison :

- Dresser la liste du matériel situé dans ce local .
- Identifier les différentes cellules, donner leur référence ainsi que leur fonction (consigner dans un tableau)
- Tracer, à main levée, le schéma unifilaire de la distribution HTA (du poste de livraison jusqu'au poste de transformation).

B. Poste de transformation :

- Dresser la liste du matériel situé dans ce local.
- Identifier les différentes cellules, donner leur référence ainsi que leur fonction (consigner dans un tableau)
- Relever la plaque signalétique du transformateur.

- Identifier le mode de pose des câbles,
- Repérer la prise de terre du neutre,
- Comment est refroidi le transformateur ? Relever la température ambiante, celle-ci a-t-elle une influence sur le refroidissement du transformateur ? Le local paraît-il suffisamment ventilé ?

C. Elaboration du schéma de distribution :

Continuer le schéma unifilaire de distribution en aval du transformateur jusqu'à un circuit terminal du laboratoire de génie électrique (une table de manipulation par exemple).

On précise les différents éléments rencontrés sur le circuit :

- Poste de transformation,
- TGBT (Tableau Général Basse Tension),
- Tableau de répartition d'une partie des ateliers, armoire repérée TEN,
- Tableau divisionnaire du laboratoire de génie électrique, armoire repérée TEN004,
- Canalisation préfabriquée,
- Table de manipulation.

Relever la référence de tous les appareils de protection des personnes et du matériel concernés par ce circuit.

5. Conclusion :

La progression établie, pour cette première année de mise en place du nouveau référentiel, laisse peu de place aux travaux pratiques (en dehors du dimensionnement des différents éléments de l'installation électrique à partir de logiciels) et doit par conséquent évoluer.

Il serait intéressant de disposer de petits supports (sous ensembles matériels) permettant :

- d'illustrer les séquences de cours, d'aider à la compréhension (**TP Cours**),
- de valider des principes de fonctionnement, de réaliser des réglages (**TP**).

Exemple de sous ensembles :

- protection du matériel (réglage de disjoncteurs, étude de la sélectivité),
- protection des personnes,
- compensation de l'énergie réactive,
- inversion de sources,
- ...

Energie thermique et électricité

Vincent FICHET

Professeur de Physique Appliquée
Lycée Jules Fil - Carcassonne

Résumé : Dans le contexte de la réforme du BTS Électrotechnique, et dans le cadre des économies d'énergies, il m'a paru intéressant de revenir sur les relations dans le couple Chaleur - Electricité : on constate que cela ne va pas très fort, que ce soit dans le sens Chaleur - Electricité (ce que l'on savait déjà), ou dans le sens Electricité - Chaleur, si l'on examine la chose avec le « bon sens populaire », et si l'on se permet quelque jugement de valeur... Extraits (triés mais vécut) de dialogue avec des étudiants.

A l'occasion de la prise de contact avec les élèves de TS Electrotechnique, puis ultérieurement sur la base d'un document que je leur propose, quelques commentaires chiffrés et des exemples viennent alimenter une discussion passionnante, au cours de laquelle on constate parfois une désarmante ignorance de notions que l'on considère souvent comme acquises.

1. Approche Quantitative : Transformation Chaleur – Electricité

En septembre, lors de l'accueil des nouveaux étudiants, je leur fais passer un QCM sur tout un tas de notions touchant de près ou de loin le programme de Physique Appliquée. En particulier un item concerne les centrales nucléaires : le rendement en est-il de 30%, 60%, ou 90% ? La quasi-unanimité se porte sur 90%.

Elève : Mais en Terminale, on a pourtant vu que le rendement des alternateurs dépassait 90% ?

Prof : C'est vrai, mais l'alternateur reçoit de l'énergie mécanique ; c'est pour transformer l'énergie thermique en énergie mécanique que cela se passe mal.

E : L'essence que je mets dans mon scooter, elle brûle, et ça le fait avancer, plutôt bien d'ailleurs !

P : Il faut quand même que tu saches qu'il n'y a que 20 à 25% de cette essence qui est transformée en énergie mécanique, le reste fait chauffer ton moteur.

E : C'est vrai qu'il est bien chaud. Au prix où est l'essence, c'est râlant !

P : C'est la même transformation dans tous les moteurs thermiques, (voiture, camion, groupe électrogène, centrale électrique thermique...), c'est une branche de la

Physique qui s'appelle la Thermodynamique : ça démontre que le rendement maximum théoriquement envisageable ne dépend que de 2 températures, celle de la source chaude (chambre de combustion, en gros), et celle de la source froide (circuit de refroidissement) :

$$\eta < 1 - T_{\text{Froid}} / T_{\text{Chaud}}$$

Et encore il s'agit d'un process utopique, le cycle de Carnot. Les cycles réalisables (Diesel, Beau de Rochas, Stirling...) affichent des rendements théoriques moins bons. Alors en pratique, on tombe à 25–35% ...

E : Alors il y a tout intérêt à ce que la source chaude soit très chaude ?

P : Effectivement, mais il y a des limites technologiques : par exemple 500°C pour une centrale thermique à gaz, et vers 300°C dans une centrale thermique nucléaire.

E : Ah bon, une centrale nucléaire, c'est comme une centrale thermique ?

P : Non, c'est une vraie centrale thermique. Pour produire 1 MW, avec un rendement de 33%, il faut produire 3 MW d'énergie thermique, et il y a 2 MW qui sont perdus. Pour 1300 MW électriques, il faut en évacuer 2600 où on peut, dans la mer, une rivière ou dans l'atmosphère.

E : C'est pour cela qu'il y a ces immenses tours de refroidissement ?

P : Oui, autant pour vos scooters la chaleur est assez facile à évacuer, autant c'est un vrai problème pour les grosses centrales, en particulier en été quand le débit des rivières (les sources froides) est au plus bas.

E : Mais pourquoi n'utilise-t-on pas cette chaleur ?

P : Pour les centrales nucléaires, l'ennui c'est que, par légitime précaution, on ne les a pas installées au cœur des villes, alors il n'y a pas trop de candidats à l'utilisation de cette chaleur, quelques maraichers peut-être...

Mais dans des installations moins énormes, on pratique de plus en plus la récupération et l'utilisation de cette chaleur, cela s'appelle la Cogénération.

E : C'est génial !

P : Non, c'est simplement du bon sens. Là où cela devient génial, pour la production de chaleur, c'est de remplacer les chaudières (à gaz ou au fuel) par des mini-centrales électriques, avec un moteur (gaz ou fuel, rendement 30%) qui entraîne un alternateur, et qui produit inévitablement de la chaleur, celle dont on avait besoin au départ... et on revend de l'électricité à EDF. En plus en été, il est possible de fabriquer aussi du froid, cela s'appelle la Trigénération.

E : Ca devient plutôt compliqué !

P : Oui, tout ce qui concerne la transformation de l'énergie sous forme thermique en énergie sous forme électrique peut devenir très complexe et onéreux, c'est pour cela que l'on dit que l'électricité est une énergie noble, à utiliser à bon escient (efficacité énergétique) et à ne pas gaspiller (sobriété énergétique).

2. Approche qualitative (et subjective) : Transformation Electricité – Chaleur.

Lors d'une séquence ultérieure, l'examen par les élèves d'un document intitulé « Energie thermique et Electricité » entraîne des réactions d'incrédulité, ce qui est quand même un peu le but recherché...

E : Un kilowattheure, c'est beaucoup ?

P : C'est une question qui n'a pas de réponse, ce que je peux dire de concret, c'est que 1kWh coûte environ 10 centimes d'Euro.

E : Mais quand même, 18 km d'altitude, c'est beaucoup, il n'y a pas d'erreur de calcul ?

P : Le calcul est facile, il suffit d'écrire l'expression de l'énergie potentielle ; de même pour la vitesse, avec l'énergie cinétique.

L'expérience a été inventée par Monsieur Joule lui-même, alors qu'il avait 25 ans ; il s'est contenté d'une

augmentation de température de l'ordre de 1°F, soit à peu près 0,5°C, et sur une hauteur de quelques pieds. C'est ainsi qu'il a démontré l'équivalence Chaleur = Travail, et qu'il a unifié 2 parties de la Physique qui étaient auparavant bien distinctes. (Il y a eu bien d'autres unifications depuis)

E : On a un peu oublié ces notions d'énergie potentielle, de plus il y a parmi nous des Bac Pro.

P : Faisons le calcul d'une façon plus technicienne.

On veut faire monter un ascenseur de $M = 20 \text{ kg}$ (!) à 18 km de haut, en 1 heure par exemple. Cela donne une vitesse de 18 km/h, soit $v = 5 \text{ m/s}$, c'est très raisonnable. Le poids fait $F = M.g = 200 \text{ N}$, et la puissance du moteur $P = F.v = 1000 \text{ W} = 1 \text{ kW}$. Donc en 1 heure, 1kWh.

E : D'accord, mais le résultat est choquant ! La même énergie pour ne gagner qu'une quarantaine de degrés...

P : Effectivement, cela interpelle le sens commun. Tout cela pour montrer que les applications thermiques sont extrêmement gourmandes en énergie, surtout en ce qui concerne le chauffage de l'eau d'ailleurs. En chauffant 1kg d'eau, on y stocke environ 10 fois plus d'énergie que dans 1kg de fer. D'où l'utilisation de l'eau comme liquide de refroidissement dans les voitures, ou comme caloporteur dans les centrales nucléaires (en plus d'autres propriétés neutroniques intéressantes).

E : Alors le chauffe-eau électrique, c'est du gaspillage ?

P : Plus exactement il conviendrait de dire que le chauffage électrique est une absurdité du point de vue de l'Efficacité Energétique.

Ceci devrait être encore plus évident pour des électriciens qui connaissent un peu les coulisses de la fabrication de l'électricité et du combat incessant contre les pertes Joule. On a vu que c'était une énergie noble.

Et il faut savoir que 60% de l'énergie consommée dans le secteur résidentiel sert à la production de chaud (chauffage, eau sanitaire, cuisson). Les possibilités d'économie d'énergie sont énormes.

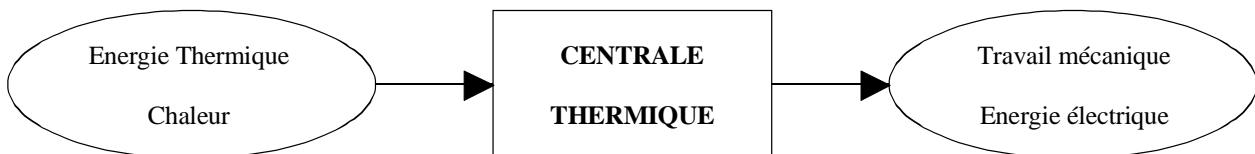
E : Mais le chauffage électrique a un rendement de 100%, pourtant...

P : Localement c'est vrai, mais si on considère toute la chaîne, pour alimenter un convecteur de 1kW, il faut consommer 3kW de gaz (ou d'uranium). Autant se chauffer directement au gaz (je déconseille l'uranium à la maison). Ou au solaire, ou à la biomasse.

E : Et si on ne peut utiliser que l'électricité ?

P : Alors il y a un moyen plus astucieux que de fabriquer des calories par effet Joule : il s'agit d'aller prendre les calories d'une source froide (dans l'air, ou dans l'eau d'un forage), de les pomper, et de les envoyer vers une source chaude (l'utilisateur). Le fonctionnement est identique à celui d'un frigo ou d'un climatiseur. L'intérêt est que pour pomper l'équivalent de 1kWh, la consommation de la pompe (moteur électrique) peut n'être que de 300 ou 400 W. Ce dispositif s'appelle une Pompe à Chaleur.

Pour conclure, on peut constater que, d'une manière ou d'une autre, beaucoup d'applications de l'électricité aboutissent finalement à la production de chaleur, que ce soit un ordinateur (qui chauffe), ou un TGV (qui combat les frottements). La chaleur est donc la forme la plus dégradée, la moins noble de l'énergie, à l'opposé de l'électricité. Il est important que de futurs techniciens supérieurs dans ce domaine en soient conscients, et que le concept d'efficacité énergétique soit vraiment pris en compte, une espèce d'éthique de l'électricien en quelque sorte.

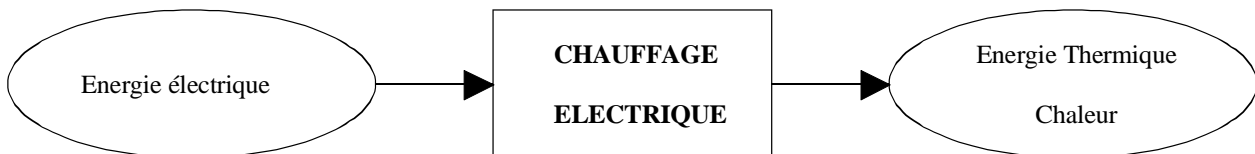


- Rendement pauvre (de 20% à 35%)

Limitation théorique : $\eta < 1 - T_{\text{froid}} / T_{\text{chaud}}$ pour le cycle (utopique) de Carnot ; environ deux fois moins pour un cycle théorique réalisable (Diesel), encore moins en pratique... L'électricité est une « énergie noble » à ne pas gaspiller

Applications à méditer :

- moteur thermique (groupe électrogène)
- Centrales thermiques (nucléaire et gaz)
- Cogénération



- Très gourmand en énergie

1 kWh pour chauffer 20l d'eau de 15°C à 58°C La même énergie pour élever cette masse de 20 kg à 18 km (limite de l'atmosphère) Ou pour lancer cette masse à 600 m/s (2160 km/h presque mach 2...)

Applications à méditer :

- L'eau est un excellent fluide de refroidissement
- Chauffage, eau sanitaire, privilégier d'autres sources d'énergie (gaz, bois, solaire)
- Pompes à chaleur

Calcul du couple par la méthode de la variation de la coénergie

Didier DERKS⁽¹⁾, Frédéric GILLON⁽²⁾, Pascal BROCHET⁽²⁾

⁽¹⁾ ENSIAME – Université de Valenciennes, Le Mont Houy, 59230 Valenciennes, Cedex 9, France

⁽²⁾ L2EP – Ecole Centrale de Lille, Bp48, cité scientifique 59651, Villeneuve d'Ascq, France

Email : didier.derks@univ-valenciennes.fr , frederic.gillon@ec-lille.fr , pascal.brochet@ec-lille.fr

Résumé : Lors du dimensionnement des machines électriques, une étape essentielle, est le calcul du couple électromagnétique qui permet, aux pertes mécaniques près, d'évaluer la puissance mécanique développée par le convertisseur électromécanique. Cet article a pour objectif de développer, en particulier, une des méthodes analytiques classiques de calcul du couple électromagnétique bien adaptée à la modélisation des structures électromagnétiques par réseaux de réluctances : la méthode de la variation de la co-énergie. Le but est de rappeler les principes de cette méthode mais surtout de bien préciser les hypothèses d'utilisation de chacune des expressions obtenues pour les différents cas étudiés, en linéaire et en non linéaire.

1. Introduction

Parmi les différentes méthodes de dimensionnement des machines électrotechniques, celles qui permettent d'avoir rapidement une idée des grandeurs mises en jeu dans le système, sont les méthodes analytiques ; elles donnent une vision globale du système aboutissant à des relations entre grandeurs de sortie et grandeurs d'entrée. Parmi ces méthodes analytiques, la méthode énergétique permet d'appréhender le dimensionnement au sens de la conversion d'énergie et ainsi de bien comprendre les étapes et les causes de cette conversion. Elle est d'ailleurs utilisée lors du calcul des différents couples dans les machines synchrones à aimants et permet ainsi d'identifier l'origine des couples, électromagnétique, réluctant et de détente [1], [2]. Cette méthode d'étude ou de dimensionnement est également largement employée dans le cas des machines à réluctances variables [3], [4], [5].

2. Position du problème : définitions et rappels

Afin d'illustrer la méthode de calcul du couple d'un dispositif électromagnétique, partons de l'exemple simple classique présenté ci-dessous [3]:

La figure 1 représente une structure ferromagnétique munie d'une partie tournante (rotor). La partie fixe est munie d'un bobinage de n spires (dont on négligera la résistance) parcouru par un courant instantané i .

Le passage de la position 1 à la position 2 se traduit par un déplacement du rotor qui est dû à un couple mécanique subi par ce dernier ; une puissance mécanique a donc été développée par la structure.

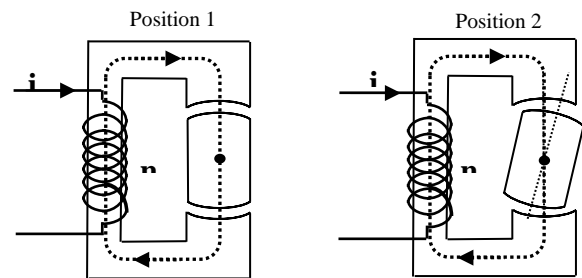


Figure 1 : Circuit magnétique d'étude représenté pour deux positions différentes

Cherchons à identifier l'origine de cette puissance mécanique. Bien entendu, nous savons que les machines électriques sont des convertisseurs électromécaniques de puissances. La démarche consiste, à partir de la source d'énergie électrique, à observer ce qui se passe lorsque la source fournit une énergie électrique élémentaire dW_{elec} .

Afin de bien comprendre comment s'effectue la conversion d'énergie, et afin de bien mettre en place les notions d'énergie et de co-énergie magnétique, on considère dans un premier cas, le rotor fixe, et dans un deuxième cas, le rotor libre en rotation.

2.1. Rotor fixe

L'énergie électrique élémentaire fournie par la source vaut :

$$dW_{elec} = e \cdot i \cdot dt \quad (1)$$

$$\text{Comme : } e = n \cdot d\phi / dt \quad (2)$$

$$\text{On a donc : } dW_{elec} = n \cdot i \cdot d\phi \quad (3)$$

φ est le flux vu par une section droite du circuit magnétique ou encore le flux vu par une spire du bobinage. Soit Φ le flux vu par les n spires du bobinage, l'énergie électrique élémentaire fournie par la source vaut alors :

$$dW_{elec} = i.d\Phi \quad (4)$$

Or le flux Φ est une grandeur magnétique ; donc la variation d'énergie électrique dW_{elec} s'est traduite par une variation d'énergie magnétique $dW_{mag} = i.d\Phi$.

Cette énergie magnétique élémentaire stockée par le circuit ferromagnétique est d'ailleurs quantifiable si l'on dispose de la caractéristique magnétique $B(H)$, caractéristique intrinsèque au matériau ferromagnétique de la structure. Un simple changement de variable permet d'accéder à la courbe $\Phi(i)$ ou $i(\Phi)$.

La figure 2 permet de visualiser l'énergie magnétique W_{mag} emmagasinée par la structure pour un flux Φ_0 vu par le bobinage. La figure 3 illustre la variation d'énergie dW_{mag} associée à une variation $d\Phi$ du flux.

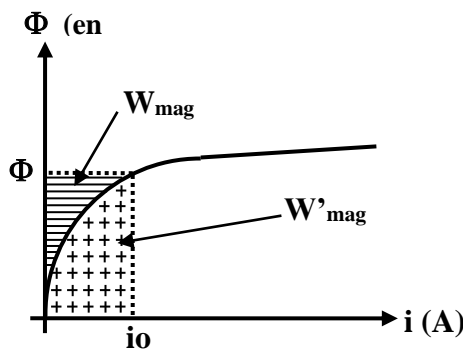


Figure 2 : Energie emmagasinée et co-énergie associée pour un courant i_0 dans le bobinage

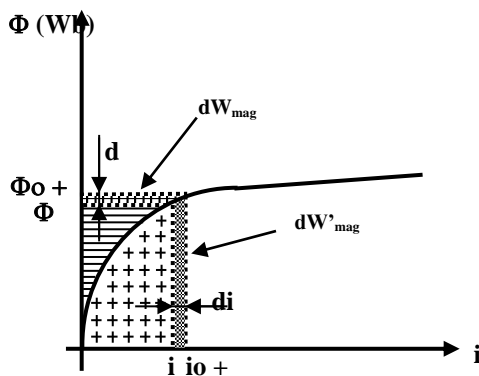


Figure 3 : Représentation des variations élémentaires d'énergie dW et de co-énergie dW' lorsque le rotor est fixe.

Ainsi pour une évolution de 0 à Φ_0 du flux dans la structure, l'énergie stockée équivaut alors à :

$$W_{mag} = \int_0^{\Phi_0} i(\Phi).d\Phi \quad (5)$$

Cette intégrale s'illustre sur la figure 2 comme étant l'aire sous la courbe de la fonction $i(\Phi)$ pour une valeur de Φ_0 donnée. Dans le même temps, le courant a évolué de 0 à une valeur i_0 . On définit alors la co-énergie magnétique [6] comme étant le complément de l'énergie magnétique :

$$W'_{mag} = \Phi_0.i_0 - W_{mag} \quad (6)$$

W'_{mag} équivaut alors à l'aire sous la courbe de la fonction $\Phi(i)$ pour la valeur de i_0 atteinte à Φ_0 . Cette aire se traduit par l'intégrale suivante :

$$W'_{mag} = \int_0^{i_0} \Phi(i).di \quad (7)$$

A la variation élémentaire d'énergie dW_{mag} on peut donc maintenant associer une variation élémentaire de co-énergie dW'_{mag} illustrée sur la figure 3 et qui vaut :

$$dW'_{mag} = d(i.\Phi) - dW_{mag} \quad (8)$$

$$\text{Soit} \quad dW'_{mag} = \Phi.di \quad (9)$$

2.2. Rotor libre en rotation

Lorsque le rotor de la figure 1 est libre de se mouvoir, entre les positions 1 et 2, il a effectué un déplacement élémentaire $d\theta$ qui crée une certaine énergie mécanique élémentaire :

$$dW_{méca} = C_{em}.d\theta \quad (10)$$

C_{em} est le couple électromagnétique subit ou développé par le rotor.

Au cours du déplacement, l'énergie magnétique stockée dans le circuit ferromagnétique a varié d'une quantité dW_{mag} qui est différente de celle obtenue quand le rotor est fixe ($i.d\Phi$). En effet, la géométrie du circuit magnétique ayant changé entre les deux positions, les courbes des fonctions $\Phi(i)$ ou $i(\Phi)$ ont également évolué comme le montre la figure 4 et dépendent donc de la position θ du rotor.

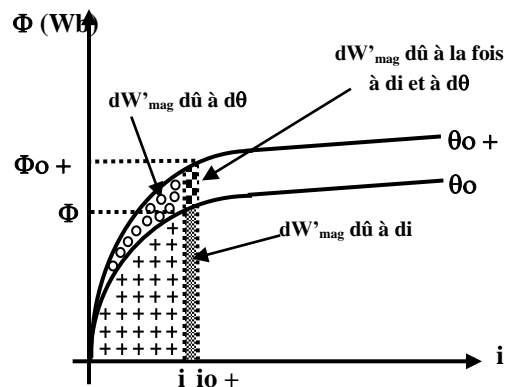


Figure 4 : Représentation des variations élémentaires d'énergie dW et de co-énergie dW' lorsque le rotor a tourné un angle élémentaire $d\theta$

De ce fait, la variation d'énergie magnétique dW_{mag} dépend non seulement du flux mais également de la position θ . La variation élémentaire d'énergie magnétique s'écrit donc sous la forme de la différentielle suivante:

$$dW_{mag}(\Phi, \theta) = \frac{\partial W_{mag}}{\partial \Phi} .d\Phi + \frac{\partial W_{mag}}{\partial \theta} .d\theta \quad (11)$$

Il en est alors de même pour la variation de la co-énergie magnétique dW'_{mag} . Elle s'écrit donc sous la forme différentielle suivante :

$$dW'_{mag}(i, \theta) = \frac{\partial W'_{mag}}{\partial i} .di + \frac{\partial W'_{mag}}{\partial \theta} .d\theta \quad (12)$$

Ainsi d'après le principe de conservation de l'énergie, lors d'une rotation élémentaire du rotor, l'énergie électrique élémentaire fournie par la source est donc maintenant non seulement stockée en partie dans le circuit magnétique sous forme d'énergie magnétique mais également en partie sous forme d'énergie mécanique :

$$dW_{elec} = dW_{méca} + dW_{mag} = Cem.d\theta + dW_{mag} \quad (13)$$

Or que le rotor soit en mouvement ou non (4) reste vrai, on a donc :

$$dW_{elec} = i.d\Phi = Cem.d\theta + dW_{mag}. \quad (14)$$

$$\text{Donc : } Cem.d\theta = i.d\Phi - dW_{mag} \quad (15)$$

De plus, d'après la définition de la co-énergie établit en (8), on peut écrire :

$$Cem.d\theta = i.d\Phi - d(i.\Phi) + dW'_{mag} \quad (16)$$

On obtient alors :

$$Cem.d\theta = -\Phi.di + dW'_{mag} \quad (17)$$

En identifiant les expressions (12) et (17), on en déduit alors l'expression du couple électromagnétique :

$$Cem(i, \theta) = \frac{\partial W'_{mag}(i, \theta)}{\partial \theta} \text{ avec } i = cte \quad (18)$$

Il est intéressant de donner une explication qualitative à l'aide des figures 3 et 4 ; $\Phi.di$ est la variation élémentaire de co-énergie lorsque le rotor est fixe. Elle ne crée donc pas du couple. Seule dW'_{mag} qui est dû à la fois à la variation de $d\theta$ et de di , crée une variation d'énergie mécanique.

En effet, en comparant la figure 3 (rotor fixe) et la figure 4 (rotor mobile) dans laquelle on considère à la fois une variation du courant di et une variation de position $d\theta$, on constate qu'une partie seulement de la variation totale de co-énergie sert à produire de l'énergie mécanique ; on distingue alors trois origines de variation de co-énergie :

- une due uniquement à la variation di du courant et qui vaut $\Phi.di$, déjà présente sur la figure 3 (rotor fixe) et qui ne participe donc pas à la création du couple.

- une due uniquement à la variation de la position $d\theta$, qui participe à la création d'énergie mécanique.
- et finalement, une due à la variation simultanée du courant et de la position, qui participe également à créer du couple.

L'expression (18) confirme bien ces constatations puisque seules interviennent les variations de co-énergie dues à une variation de courant et/ou de position.

Cette expression est valable dans le cas général d'une variation simultanée de courant et de position mais la difficulté est dans le calcul de la co-énergie W'_{mag} dont l'expression est :

$$W'_{mag} = \int_0^{i(\theta)} \Phi(i, \theta).di \quad (19)$$

Cependant si maintenant, on suppose un déplacement élémentaire $d\theta$ du rotor à courant constant (hypothèse justifiée avec une source de courant alimentant la bobine), alors $di = 0$ et on trouve :

$$Cem.d\theta = dW'_{mag} \quad (20)$$

Et par conséquent on obtient :

$$Cem(i, \theta) = \frac{\partial W'_{mag}(i, \theta)}{\partial \theta} \text{ à } i = cte \quad (21)$$

$$\text{Avec : } W'_{mag} = \int_0^i \Phi(i, \theta).di \quad (22)$$

L'expression pour le calcul du couple reste la même, mais l'hypothèse d'un courant constant simplifie le calcul de la co-énergie.

3. Application à l'étude des systèmes électromagnétiques à l'aide de réseaux de réluctances.

L'expression du couple obtenu est utilisée afin de dimensionner la structure du convertisseur de la figure 1. Parmi les nombreux modèles analytiques ou numériques, nous choisissons un modèle construit à partir d'un ensemble de réluctances assemblées en circuit comme le montre la figure 5. Ce modèle est intéressant car il permet pour des structures plus complexes de calculer les principaux flux et ainsi d'appréhender plus rapidement le calcul du couple (machine tournante) ou de la force (machine linéaire) [2], [7].

L'objectif de ce paragraphe est, en appliquant les expressions (21) et (22), de retrouver l'expression du couple en fonction des éléments du modèle et ceci pour différentes hypothèses. En effet, trois niveaux d'hypothèses sont faites afin de mettre en évidence leurs influences sur l'expression du couple électromagnétique :

- La première et la plus couramment employée, consiste à négliger l'influence du fer, c'est-à-dire, à supposer la réductance de l'air beaucoup plus grande que celle du fer.
- La seconde ne néglige plus l'influence du fer mais considère pour le fer, l'induction linéaire en fonction de l'excitation.
- La dernière prend en compte la saturation magnétique du fer.

3.1. Modèle à base de réductances : démarche pour le calcul du couple

Afin d'estimer le couple électromagnétique créé par la structure de la figure 1, un modèle dont les réductances dépendent de la position θ du rotor est établi. Comme le montre la figure 5, réductances et forces magnétomotrices dépendent donc de la position.

On considère ensuite deux positions θ_1 et θ_2 du rotor pour lesquelles, la co-énergie est calculée (22) en fonction des éléments du modèle. Ce qui permet ensuite, d'exprimer la variation de la co-énergie entre les deux positions et d'en déduire le couple électromagnétique (21).

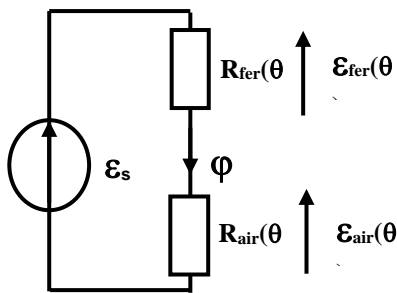


Figure 5 : modèle à base de réductances

\mathcal{E}_s représente la force magnétomotrice source du flux magnétique φ dans la machine.

$R_{fer}(\theta)$ représente la réductance de toute la partie ferromagnétique de la machine pour la position θ du rotor.

$R_{air}(\theta)$ représente la réductance total des entrefers de la machine pour la position θ du rotor.

$\mathcal{E}_{fer}(\theta)$ représente la force magnétomotrice aux bornes de la réductance de fer pour la position θ du rotor.

$\mathcal{E}_{air}(\theta)$ représente la force magnétomotrice aux bornes de la réductance d'air pour la position θ du rotor.

On peut également définir :

$P_{fer}(\theta)$ la perméance (l'inverse de la réductance) de toute la partie ferromagnétique de la machine pour la position θ du rotor.

$P_{air}(\theta)$ la perméance total des entrefers de la machine pour la position θ du rotor.

3.2. Milieu linéaire, fer non saturé et influence du fer négligée

C'est le cas le plus simple à traiter et également avec l'hypothèse la plus communément utilisée en électrotechnique : la machine n'est pas saturée et on néglige la réductance du fer devant celle de l'air à cause de la forte différence de perméabilité magnétique entre l'air et le fer.

Cette hypothèse est justifiée sur la figure 6 où sont représentées les caractéristiques $\varphi(\mathcal{E}_{air}(\theta_1))$, $\varphi(\mathcal{E}_{air}(\theta_2))$ et $\varphi(\mathcal{E}_{fer})$ pour laquelle on a choisit les points de fonctionnement dans la zone linéaire; en effet, on constate alors que pour les deux positions θ_1 et θ_2 , les forces magnéto-motrices de l'air sont très supérieures à celles du fer.

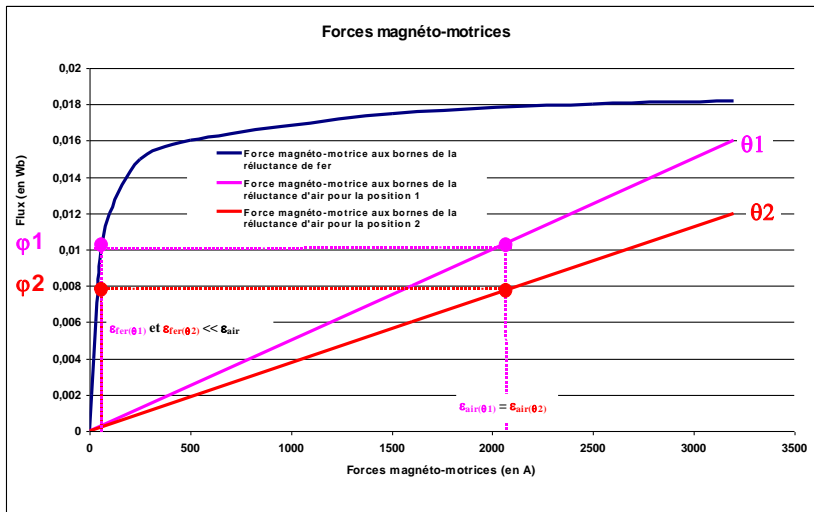


Figure 6 : caractéristiques magnétiques de l'air et du fer pour les deux positions

Ainsi avec l'hypothèse de la réductance de fer négligée, pour la position θ_1 du rotor on a donc :

$$\mathcal{E}_{air}(\theta_1) = R_{air}(\theta_1) \cdot \varphi_1 \gg \mathcal{E}_{fer}(\theta_1) = R_{fer}(\theta_1) \cdot \varphi_1 \quad (23)$$

Pour la position θ_2 du rotor on a :

$$\mathcal{E}_{air}(\theta_2) = R_{air}(\theta_2) \cdot \varphi_2 \gg \mathcal{E}_{fer}(\theta_2) = R_{fer}(\theta_2) \cdot \varphi_2 \quad (24)$$

Ces hypothèses induisent les modèles de la figure 7.

Les expressions (23) et (24) peuvent également s'écrire en faisant intervenir les perméances d'air :

$$\varphi_1 = P_{air}(\theta_1) \cdot \mathcal{E}_{air}(\theta_1) \quad (25)$$

$$\varphi_2 = P_{air}(\theta_2) \cdot \mathcal{E}_{air}(\theta_2) \quad (26)$$

D'autre part, le déplacement se fait à i égal constante donc à $\mathcal{E}_s = n \cdot i = cte$.

On a donc :

$$\mathcal{E}_s = \mathcal{E}_{air}(\theta_1) = \mathcal{E}_{air}(\theta_2) \quad (27)$$

Les courbes de la figure 6 permettent de voir l'évolution des forces magnéto-motrices aux bornes des réductances d'air et de fer pour les deux positions θ_1 et θ_2 .

Afin de calculer le couple électromagnétique développé lors du passage de la position θ_1 à la position θ_2 , il faut d'abord calculer la co-énergie pour une position. La co-énergie W'_1 dans le circuit, pour la position θ_1 , pour le point de fonctionnement qui correspond au flux φ_1 dans la structure, vaut :

$$W'_1 = \int_0^i \Phi(i, \theta_1) \cdot di = \frac{1}{2} \cdot \Phi_1 \cdot i = \frac{1}{2} \cdot n \cdot \varphi_1 \cdot i = \frac{1}{2} \cdot \varphi_1 \cdot \mathcal{E}_{air}(\theta_1) \quad (28)$$

La co-énergie W'_2 dans le circuit pour la position θ_2 et le point de fonctionnement qui correspond au flux φ_2 dans la structure, vaut :

$$W'_2 = \int_0^i \Phi(i, \theta_2) \cdot di = \frac{1}{2} \cdot \Phi_2 \cdot i = \frac{1}{2} \cdot n \cdot \varphi_2 \cdot i = \frac{1}{2} \cdot \varphi_2 \cdot \mathcal{E}_{air}(\theta_2) \quad (29)$$

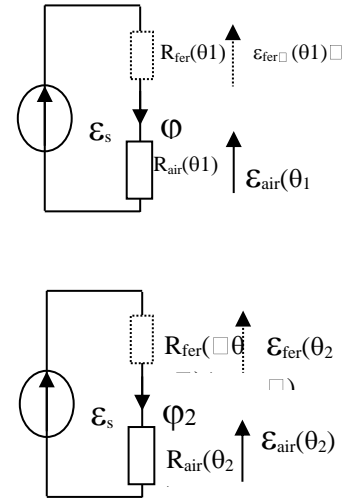


Figure 7 : circuit avec réductances de fer

La variation de la co-énergie $W'_{1 \rightarrow 2}$ entre la position θ_1 et θ_2 vaut donc :

$$\Delta W'_{1 \rightarrow 2} = (1/2) \cdot [\varphi_2 \cdot \mathcal{E}_{air}(\theta_2) - \varphi_1 \cdot \mathcal{E}_{air}(\theta_1)] \quad (30)$$

En incluant les expressions (25) et (26), on obtient :

$$\Delta W'_{1 \rightarrow 2} = (1/2) \cdot [P_{air}(\theta_2) \cdot \mathcal{E}_{air}(\theta_2)^2 - P_{air}(\theta_1) \cdot \mathcal{E}_{air}(\theta_1)^2] \quad (31)$$

De plus, d'après (27) on obtient :

$$\Delta W'_{1 \rightarrow 2} = (1/2) \cdot [P_{air}(\theta_2) - P_{air}(\theta_1)] \cdot \mathcal{E}_s^2 \quad (32)$$

La variation de co-énergie sur la variation de position s'écrit donc :

$$\frac{\Delta W'_{1 \rightarrow 2}}{\Delta \theta} = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_{air}(\theta_2) - P_{air}(\theta_1)}{\theta_2 - \theta_1} \cdot \mathcal{E}_s^2 \quad (33)$$

Si l'on suppose l'écart de position du rotor suffisamment petit, et en supposant que $W'_{1 \rightarrow 2}$ est continûment dérivable, on peut alors écrire :

$$\frac{\Delta W'_{1 \rightarrow 2}}{\Delta \theta} = \frac{dW'}{d\theta} = \frac{1}{2} \cdot \frac{dP_{air}(\theta)}{d\theta} \cdot \mathcal{E}_s^2 \quad (34)$$

Donc, d'après l'expression (19), l'expression du couple électromagnétique devient :

$$Cem(\theta, i) = \frac{dW'}{d\theta} = \frac{1}{2} \cdot \frac{dP_{air}(\theta)}{d\theta} \cdot \mathcal{E}_s^2 \quad (35)$$

avec $\mathcal{E}_s = cte$.

Dans ce cas précis d'un milieu linéaire avec l'influence du fer négligée (27), on a :

$$Cem(\theta, i) = \frac{dW'}{d\theta} = \frac{1}{2} \cdot \frac{dP_{air}(\theta)}{d\theta} \cdot \mathcal{E}_{air}^2 \quad (36)$$

avec $\mathcal{E}_{air} = cte$.

Dans le cas des milieux linéaires non saturés, le couple électromagnétique Cem est donc dû à la variation de la perméance d'entrefer $P_{air}(\theta)$ lors de la rotation du rotor.

3.3. Milieu linéaire, fer non saturé et influence du fer non négligée

Démarche : on considère toujours le déplacement du rotor d'une position θ_1 à une position θ_2 mais les variations des forces magnétomotrices aux bornes des réluctances de fer et d'air sont identiques et de signe opposés afin de pouvoir continuer à travailler à $n.i$ constant ; ainsi $\delta\epsilon_{fer} = -\delta\epsilon_{air}$. Les points de fonctionnement se trouvent toujours dans la zone linéaire. Ces hypothèses de travail sont illustrées sur la figure 8.

La machine n'est pas saturée et l'on ne néglige plus la réluctance du fer devant celle de l'air comme dans le cas précédent.

Ainsi pour la position 1 du rotor on a :

$$\varphi_1 = P_{air(\theta_1)} \cdot \epsilon_{air(\theta_1)} \quad (37)$$

Puis : $\varphi_1 = P_{fer(\theta_1)} \cdot \epsilon_{fer(\theta_1)} \quad (38)$

Pour la position 2 du rotor on a :

$$\varphi_2 = P_{air(\theta_2)} \cdot \epsilon_{air(\theta_2)} \quad (39)$$

Et : $\varphi_2 = P_{fer(\theta_2)} \cdot \epsilon_{fer(\theta_2)} \quad (40)$

Remarque 1: $R_{fer(\theta_2)} = R_{fer(\theta_1)} = R_{fer}$ ou bien encore $P_{fer(\theta_2)} = P_{fer(\theta_1)} = P_{fer}$; Ces égalités sont justifiées par le fait que la longueur des lignes de champs dans le fer d'une part et la surface offerte aux lignes de champs dans le fer d'autre part ne varient que très peu entre deux positions.

Les expressions (38) et (40) deviennent :

$$\varphi_1 = P_{fer} \cdot \epsilon_{fer(\theta_1)} \quad (41)$$

$$\varphi_2 = P_{fer} \cdot \epsilon_{fer(\theta_2)} \quad (42)$$

Remarque 2: Pour faciliter les schémas et la compréhension, on fait une hypothèse supplémentaire mais non restrictive : pour la position 1 du rotor on choisit : $\epsilon_{air(\theta_1)} = \epsilon_{fer(\theta_1)}$

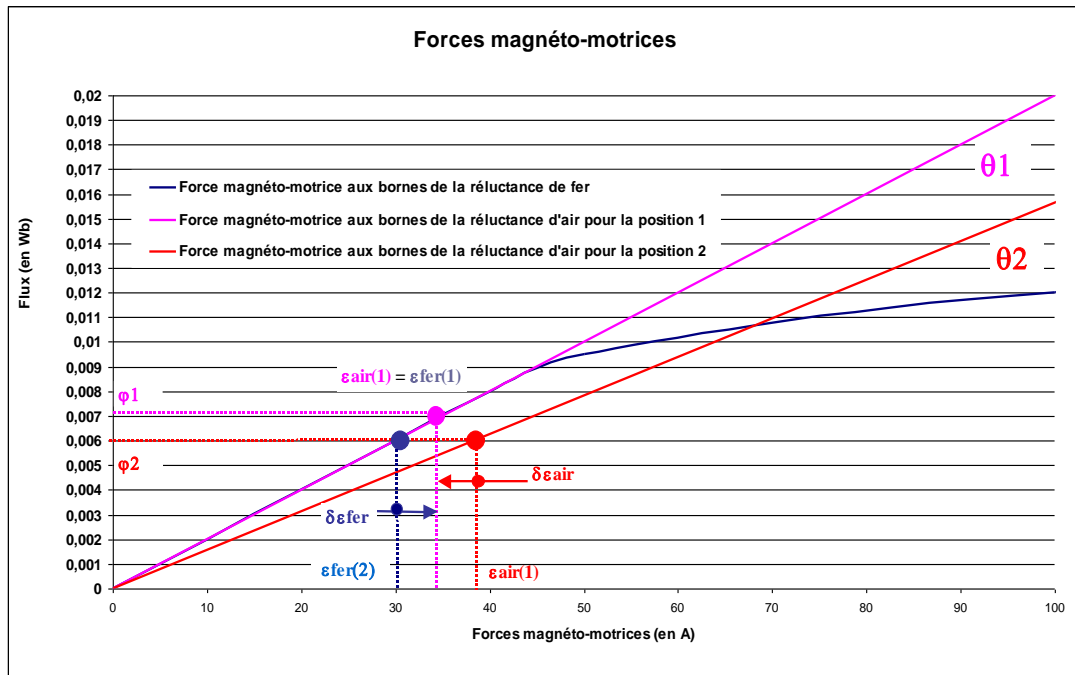


Figure 8 : Caractéristiques magnétiques et points de fonctionnement lorsque le fer n'est plus négligé

La co-énergie W'_1 dans le circuit pour la position θ_1 et les points de fonctionnement considérés vaut :

$$W'_1 = (1/2) \cdot \varphi_1 \cdot \epsilon_{fer(\theta_1)} + (1/2) \cdot \varphi_1 \cdot \epsilon_{air(\theta_1)} \quad (43)$$

La co-énergie W'_2 dans le circuit pour la position θ_2 et les points de fonctionnement considérés vaut :

$$W'_2 = (1/2) \cdot \varphi_2 \cdot \epsilon_{fer(\theta_2)} + (1/2) \cdot \varphi_2 \cdot \epsilon_{air(\theta_2)} \quad (44)$$

Les expressions (36), (38), (40) et (41) permettent d'écrire :

- la co-énergie dans le circuit pour la position θ_1 :

$$W'_1 = (1/2) \cdot [P_{fer} \cdot \epsilon_{fer(\theta_1)}^2 + P_{air(\theta_1)} \cdot \epsilon_{air(\theta_1)}^2] \quad (45)$$

- la co-énergie dans le circuit pour la position θ_2 :

$$W'_2 = (1/2) \cdot [P_{fer} \cdot \epsilon_{fer(\theta_2)}^2 + P_{air(\theta_2)} \cdot \epsilon_{air(\theta_2)}^2] \quad (46)$$

La variation de la co-énergie $W'_{1 \rightarrow 2}$ entre les positions θ_1 et θ_2 s'écrit alors :

$$\Delta W'_{1 \rightarrow 2} = (1/2) \cdot [P_{air(\theta_2)} \cdot \epsilon_{air(\theta_2)}^2 - P_{air(\theta_1)} \cdot \epsilon_{air(\theta_1)}^2 + P_{fer} \cdot (\epsilon_{fer(\theta_2)}^2 - \epsilon_{fer(\theta_1)}^2)] \quad (47)$$

Hypothèse : pour simplifier cette expression, on peut faire une hypothèse supplémentaire qui consiste à supposer de petites variations des forces magnéto-motrices devant celle des positions θ_1 et θ_2 .

C'est à dire : $|\delta \mathcal{E}_{fer}| = |\delta \mathcal{E}_{air}| = |\delta \mathcal{E}| \ll \mathcal{E}_{air(\theta_1)}$ et $\mathcal{E}_{air(\theta_2)}$ ainsi que devant $\mathcal{E}_{fer(\theta_1)}$ et $\mathcal{E}_{fer(\theta_2)}$.

Par conséquent $\mathcal{E}_{air(\theta_1)} \# \mathcal{E}_{air(\theta_2)} = \mathcal{E}_{air}$ et $\mathcal{E}_{fer(\theta_1)} \# \mathcal{E}_{fer(\theta_2)} = \mathcal{E}_{fer}$.

Ainsi l'expression de la variation de la co-énergie entre les positions θ_1 et θ_2 devient :

$$\Delta W'_{1 \rightarrow 2} = (1/2) \cdot [(P_{air(\theta_2)} - P_{air(\theta_1)}) \cdot \mathcal{E}_{air}^2] \quad (48)$$

La variation de co-énergie sur la variation de position s'écrit donc :

$$\frac{\Delta W'_{1 \rightarrow 2}}{\Delta \theta} = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_{air(\theta_2)} - P_{air(\theta_1)}}{\theta_2 - \theta_1} \cdot \mathcal{E}_{air}^2 \quad (49)$$

Et si l'on suppose l'écart de position du rotor suffisamment petit, on peut alors écrire :

$$\frac{\Delta W'_{1 \rightarrow 2}}{\Delta \theta} = \frac{dW'}{d\theta} = \frac{1}{2} \cdot \frac{dP_{air}(\theta)}{d\theta} \cdot \mathcal{E}_{air}^2 \quad (50)$$

Donc, d'après l'expression (21), l'expression du couple électromagnétique devient :

$$Cem(\theta, i) = \frac{dW'}{d\theta} = \frac{1}{2} \cdot \frac{dP_{air}(\theta)}{d\theta} \cdot \mathcal{E}_{air}^2 \quad (51)$$

avec $\mathcal{E}_s = cte$.

La différence avec l'expression (35) est dans le terme multiplicateur de la variation de perméances qui n'est plus \mathcal{E}_s mais maintenant \mathcal{E}_{air} . Il ne suffit donc plus de connaître les ampères-tours qui entourent le circuit magnétique mais il faut être capable d'estimer la force magnéto-motrice d'entrefer.

3.4. Milieu « non linéaire », fer saturé avec l'influence du fer qui n'est plus négligée

La démarche et les hypothèses de travail restent les mêmes que celles du paragraphe 3.3 ; le changement est pour le point de fonctionnement du fer qui se situe dans la zone saturée comme le montre la figure 9. On linéarise la saturation du fer en l'assimilant à la droite d'équation : $\varphi = \varphi_0 + P_{fer} \cdot \mathcal{E}_{fer}$

La co-énergie W'_1 dans le circuit pour la position θ_1 vaut :

$$W'_1 = (1/2) \cdot \varphi_1 \cdot \mathcal{E}_{fer(\theta_1)} + (1/2) \cdot \varphi_1 \cdot \mathcal{E}_{air(\theta_1)} + (1/2) \cdot \varphi_0 \cdot \mathcal{E}_{fer(\theta_1)} \quad (52)$$

Et la co-énergie W'_2 dans le circuit pour la position θ_2 vaut :

$$W'_2 = (1/2) \cdot \varphi_2 \cdot \mathcal{E}_{fer(\theta_2)} + (1/2) \cdot \varphi_2 \cdot \mathcal{E}_{air(\theta_2)} + (1/2) \cdot \varphi_0 \cdot \mathcal{E}_{fer(\theta_2)} \quad (53)$$

Les expressions (37), (39), (41) et (43) permettent d'écrire :

La co-énergie W'_1 dans le circuit pour la position θ_1 vaut :

$$W'_1 = (1/2) \cdot \mathcal{E}_{fer(\theta_1)} \cdot P_{fer} \cdot \mathcal{E}_{fer(\theta_1)} + (1/2) \cdot \mathcal{E}_{air(\theta_1)} \cdot P_{air(\theta_1)} \cdot \mathcal{E}_{air(\theta_1)} + (1/2) \cdot \varphi_0 \cdot \mathcal{E}_{fer(\theta_1)} \quad (54)$$

Et la co-énergie W'_2 dans le circuit pour la position θ_2 vaut :

$$W'_2 = (1/2) \cdot \mathcal{E}_{fer(\theta_2)} \cdot P_{fer} \cdot \mathcal{E}_{fer(\theta_2)} + (1/2) \cdot \mathcal{E}_{air(\theta_2)} \cdot P_{air(\theta_2)} \cdot \mathcal{E}_{air(\theta_2)} + (1/2) \cdot \varphi_0 \cdot \mathcal{E}_{fer(\theta_2)} \quad (55)$$

La variation de la co-énergie $W'_{1 \rightarrow 2}$ entre les positions θ_1 et θ_2 s'écrit alors :

$$\begin{aligned} \Delta W'_{1 \rightarrow 2} = & 1/2 \cdot \varphi_0 \cdot (\mathcal{E}_{fer(\theta_2)} - \mathcal{E}_{fer(\theta_1)}) + \\ & 1/2 \cdot P_{fer} \cdot [\mathcal{E}_{fer(\theta_2)}^2 - \mathcal{E}_{fer(\theta_1)}^2] + 1/2 \cdot P_{air(\theta_2)} \cdot \mathcal{E}_{air(\theta_2)}^2 - \\ & 1/2 \cdot P_{air(\theta_1)} \cdot \mathcal{E}_{air(\theta_1)}^2 \end{aligned} \quad (56)$$

On utilise à nouveau l'hypothèse du paragraphe 3.3. C'est à dire : $|\delta \mathcal{E}_{fer}| = |\delta \mathcal{E}_{air}| = |\delta \mathcal{E}| \ll \mathcal{E}_{air(\theta_1)}$ et $\mathcal{E}_{air(\theta_2)}$ ainsi que devant $\mathcal{E}_{fer(\theta_1)}$ et $\mathcal{E}_{fer(\theta_2)}$.

Par conséquent $\mathcal{E}_{air(\theta_1)} \# \mathcal{E}_{air(\theta_2)} = \mathcal{E}_{air}$ et $\mathcal{E}_{fer(\theta_1)} \# \mathcal{E}_{fer(\theta_2)} = \mathcal{E}_{fer}$

L'expression de $\Delta W'_{1 \rightarrow 2}$ devient :

$$\Delta W'_{1 \rightarrow 2} = 1/2 \cdot P_{air(\theta_2)} \cdot \mathcal{E}_{air(\theta_2)}^2 - 1/2 \cdot P_{air(\theta_1)} \cdot \mathcal{E}_{air(\theta_1)}^2 \quad (57)$$

D'où :

$$\Delta W'_{1 \rightarrow 2} = (1/2) \cdot [(P_{air(\theta_2)} - P_{air(\theta_1)}) \cdot \mathcal{E}_{air}^2] \quad (58)$$

On retrouve alors la même expression que précédemment et on aboutit avec ces hypothèses à la même formule pour le couple (51) ; le couple s'obtient à partir de la variation de perméance de l'entrefer et de la force magnéto-motrice à ces bornes.

4. Conclusion

Cet article rappelle les bases de l'étude énergétique d'un système électromécanique permettant à partir d'un bilan énergétique de faire apparaître l'expression du couple électromagnétique, élément fondamental de la conversion électromécanique.

L'utilisation de cette formule dans le cas d'un système électromagnétique est présentée avec différents niveaux d'hypothèses classiquement utilisées. L'intérêt de la démarche, est d'observer suivant les simplifications apportées, l'évolution du problème. Dans un circuit à réluctance, l'expression du couple est déterminée, est dépend principalement de la perméance d'entrefer et de la force magnéto-motrice à ces bornes. C'est à dire que l'ensemble de la conversion se crée au niveau de l'entrefer, le fer canalise le flux, mais ne crée pas de couple.

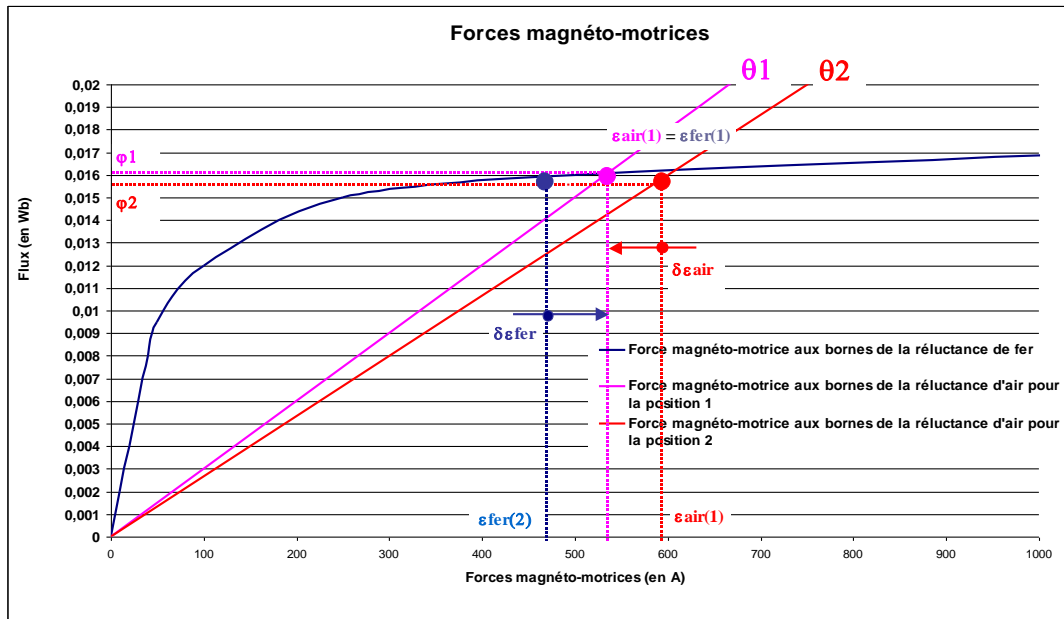


Figure 9 : Caractéristiques magnétiques et points de fonctionnement lorsque le fer n'est plus négligé et est saturé

5. Bibliographie

- [1] Grenier. F Labrique. H.Buyse. E. Matagne. Electromécanique Convertisseurs d'énergie et actionneurs. Paris. Dunod. 2001.
- [2] B.Multon. Moteur synchrone monophasé à excitation par aimants permanents à alimentation électronique. La Revue 3EI n°22-septembre 2000, p25-29
- [3] A.Mailfert. F-M.Sargos. Machines à réluctance variable. Principes des MRV. Machines à commutation. Techniques de l'Ingénieur. Vol. D 3680, Mai 2004
- [4] M.Kant. Les actionneurs électriques pas à pas. Paris. Hermès. 1989.
- [5] L. El Amraoui. Conception électromécanique d'une gamme d'actionneurs linéaires tubulaires à réluctances variables. Thèse de doctorat en Génie Electrique , Université de Lille et Ecole Centrale de Lille, 2002.
- [6] Jufer.Électromécanique, Traité d'électricité, volume IX. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 1995.
- [7] H.Polinder, J.G. Sloopweg, M.J. Hoeijmakers, J.C. Compter. Modeling of a linear PM Machine including magnetic saturation and effects : maximum force-to-current ratio. Industry Applications, IEEE Transaction, Volume :39, Issue : 6, Pages :1681-1688, Nov.- Dec 2003.



La lente diffusion des idées nouvelles en automatique en France au cours des années 1950

Patrice REMAUD

Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle

École Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers, 40 avenue du Recteur Pineau, 86022 POITIERS Cedex

France

patrice.remaud@univ-poitiers.fr

Résumé : Cette communication est la dernière d'une trilogie commencée avec « L'introduction en France des idées nouvelles en automatique au lendemain de la seconde guerre mondiale » [1], suivie de « L'introduction de l'enseignement de l'automatique en France » [2] et terminée par « La lente diffusion des idées nouvelles en automatique en France au cours des années 1950 ». L'ensemble de ces trois articles permet de comprendre la façon dont l'automatique s'est imposée en France au lendemain de la seconde guerre mondiale comme une science à part entière.

Mots-clés—Histoire des sciences, histoire des techniques, histoire de l'automatique.

1. Introduction

Au cours de l'année 1956, deux événements parachèvent l'implantation de l'automatique dans le paysage scientifique français. La création de la revue *Automatisme* en janvier et la tenue d'un congrès international à Paris en juin. Avant d'aborder ces deux événements, une remarque s'impose sur leurs intitulés. Le nom de la revue, *Automatisme*, laisse penser qu'en janvier 1956, les problèmes de vocabulaire au sein de la communauté naissante ne sont pas tous résolus. A contrario, en juin, l'intitulé du congrès, le Congrès international de l'automatique, ne laisse aucun doute sur l'implantation en France de cette science que l'on nomme maintenant automatique.

2. La création de la revue « *Automatisme* » en janvier 1956

La revue *Automatisme*, créée en janvier 1956, est la première revue à paraître en France traitant uniquement d'automatique. Jusqu'à cette date, en effet, les publications dans ce domaine s'effectuent au sein de revues spécialisées dans les différents domaines des sciences concernés par les problèmes d'automatique. Dans les domaines des télécommunications et de l'électricité, électrotechnique et électronique, il s'agit de revues telles que *Les Annales des P.T.T.*, *la Revue générale de l'électricité* ou *L'Onde électrique*. Puis, selon les domaines des sciences concernées, les publications se sont faites dans les revues spécialisées de chaque domaine. Comme exemple de ce type de revue, la revue *Mesures. Essais. Régulation. Contrôle industriel* concerne les appareils de mesure et

d'instrumentation dans le domaine de la régulation. La création de cette revue date de 1922. A l'origine son nom est *Mesures*, et quelques années plus tard, elle inclut le contrôle industriel et la régulation industrielle dans les thèmes traités, d'où son nom. Les différents domaines scientifiques tels que la mécanique, la thermique, l'hydraulique, la chimie, l'électronique y sont traités. Les articles sont très orientés vers les techniques.

Revenons maintenant à la revue *Automatisme*. La nouvelle revue ne s'appelle pas *Automatique* comme on aurait pu s'y attendre. Dans l'éditorial présent dans le premier numéro de janvier 1956 [3], une information nous permet d'en comprendre la raison. L'automatique y est définie dès la première page comme étant « la science des automatismes », et dans le premier article [4], Henri Longchambon, président du Conseil supérieur de la recherche scientifique et du progrès technique, précise que :

Aujourd'hui nous voyons, dans le même esprit, les techniciens et les théoriciens de l'automatisme, des systèmes asservis, des machines mathématiques, de l'information, faire un effort similaire de synthèse de ces disciplines pour arriver à les fusionner en une nouvelle science, l'Automatique.

On retrouve dans son titre la difficulté déjà remarquée d'utiliser un vocabulaire précis et partagé par l'ensemble de la communauté naissante.

Parmi les créateurs de cette revue, on retrouve les noms des principaux protagonistes de l'introduction des idées nouvelles en automatique après la seconde guerre mondiale [1]. Le rédacteur en chef est Maurice Lachin, et les différents membres du comité de rédaction sont Victor Broïda, Léon Chevillotte, Félix Esclangon, Pierre



Naslin, Pierre Nicolau, Auguste Pommier, François-Henri Raymond, Roger Robert, Pierre Schnerb, Maurice Surdin et Zelbstein L'analyse de la formation, de l'activité professionnelle et du secteur d'activité des personnes constituant ce comité de rédaction est très instructive. Tout d'abord, la formation de ces personnes s'est effectuée pour six d'entre eux à l'École polytechnique et à l'École supérieure d'électricité. Pour trois d'entre eux, il s'agit d'écoles d'ingénieurs plus appliquées, et il faut noter la présence de trois universitaires. En ce qui concerne les fonctions exercées, sept personnes sur onze ont des activités d'enseignement, et quatre sont en activité dans le monde industriel. Les grands secteurs d'activité sont représentés par le transport ferroviaire, la production, le transport et la distribution de l'énergie électrique ainsi que l'industrie nucléaire. Une entreprise de petite taille, la Société d'électronique et d'automatisme (S.E.A.), est présente à travers son créateur, François-Henri Raymond. En fin, la présence des militaires est notable, Pierre Naslin et Pierre Nicolau du secteur de l'armement, et Pierre Schnerb du domaine de l'aviation.

Le général Pierre Nicolau est visiblement un personnage central dans le développement de l'automatique en France des années 1940-1950. On le retrouve à l'origine des premiers cours d'automatique au sein de l'Institut supérieur des matériaux et de la construction mécanique et il est membre du Comité de rédaction de la revue *Automatisme* dès sa création en janvier 1956. Il en devient le rédacteur en chef en janvier 1958.

Dès l'éditorial du premier numéro [3], le Comité de rédaction affiche sa volonté de promotion de l'automatique vers le monde industriel :

La revue [...] se propose de rassembler à l'intention des Chefs d'entreprises, Ingénieurs et Techniciens, les fondements théoriques, les méthodes de mise en oeuvre pratique et les développements technologiques relevant d'une discipline générale actuellement en voie d'expansion dans tous les domaines de l'action et de la production : l'Automatique, la science des automatismes.

Après quelques généralités sur « la haute portée morale et sociale » de l'automatique, la nécessité de rassembler les connaissances de ce « domaine scientifique et technique extrêmement vaste et complexe » est affirmée « pour permettre une vue d'ensemble ». Il est rappelé que les théories de l'automatique sont « à l'avant-garde des mathématiques appliquées », et que la réalisation des automatismes nécessite un « mariage des techniques où la jeune électronique s'allie aux techniques plus anciennes : mécanique, pneumatique, hydraulique, électrotechnique ».

Le deuxième article publié en janvier 1956 est intéressant à plus d'un titre. Il est l'oeuvre de Victor Broïda et s'intitule *L'étendue et les limites de l'automatisme* [5]. Victor Broïda a déjà donné une conférence, en mai 1945, sur *Le mécanisme général du réglage automatique* [6] à l'occasion de la série de conférences organisées par le C.N.A.M. sur la Régulation thermique automatique. La comparaison de ces deux articles montre l'évolution des idées en une dizaine d'années. Dans l'article de 1945, il ne s'agit que de mettre en équation le système étudié et d'en tirer des conclusions sur son fonctionnement. En 1956, l'étude globale des systèmes s'est diffusée depuis quelques années et est acceptée. L'explication passe maintenant par l'usage du schéma-bloc ou de l'analyse fréquentielle. Il est à noter, également, que le deuxième article de ce mois de janvier est de Pierre Naslin (un des hommes du congrès de Londres [1]) et porte sur un essai de synthèse autour de l'automatique au service de la machine-outil.

En janvier, les éditions Dunod, éditeur de presque tous les ouvrages d'automatique en français, éditent le premier numéro de la revue *Automatisme*. Cette parution précède de peu la création de l'Association française de régulation et d'automatisme (A.F.R.A.). Cette revue est créée par les mêmes personnes qui ont été à l'origine de la revue *Automatisme* et sous l'impulsion du Comité supérieur de la recherche scientifique et du progrès technique.

3. La création de l'Association Française de Régulation et d'Automatique (A.F.R.A.)

Dans le numéro d'avril 1956 de la revue *Automatisme*, un petit texte au bas d'une page intitulé *Création d'une Association Française de Régulation et d'Automatisme (A.F.R.A.)* [7] signale la création de cette association dont le but est :

De regrouper les efforts épars des ingénieurs, en vue d'approfondir, au cours de réunions amicales, d'une part, les méthodes et les possibilités de l'automatisme, en France, et d'autre part, de donner plus de cohésion à l'action dans le domaine de l'Automatisme.

Donc, après la Belgique et l'Italie, la France se dote en 1956 d'une association dont le président d'honneur est Pierre Nicolau, le président Marcel Véron, les viceprésidents Victor Broïda et Félix Esclangon, le secrétaire général Liébault et le trésorier Jean Vivié. La plupart des membres du bureau nous sont déjà connus. Pierre Nicolau, Victor Broïda et Félix Esclangon font partie du Comité de rédaction de la revue *Automatisme*.



Marcel Véron est à l'origine du cycle de conférences du C.N.A.M. de 1945. Pierre Nicolau est le responsable de la participation de Pierre Naslin, Gérard Lehman et Julien Loeb au congrès de Londres en 1947. Il est aussi à l'origine des premiers cours d'automatique en France à l'Institut supérieur des matériaux et de la construction mécanique dont il est le directeur. Quant à Jean Vivié, il est le rédacteur en chef de la revue *Mesures. Essais. Régulation. Contrôle industriel*.

Le texte de l'allocution prononcée par Marcel Véron à la cérémonie d'inauguration de l'Association Française de Régulation et d'Automatisme, le 17 mai 1956, est reproduit dans un article de la revue *Automatisme* de juin 1956 [8]. Selon ce texte, le but de cette association n'est pas à vocation d'ordre commercial ni personnel, en effet « les douze spécialistes » qui ont décidé « de sa création l'ont voulue indépendante des Constructeurs, et même des Chambres Syndicales [...] et ont décliné toutes fonctions dans son Bureau ». L'A.F.R.A. se propose de servir de lieu d'échange entre les diverses communautés scientifiques concernées par l'automatique car :

Entre les méthodes des électriciens, hydrauliciens et thermiciens, un rapprochement et une comparaison s'imposent qui feront mieux apparaître l'unicité sous la diversité.

Le problème de vocabulaire est bien entendu toujours d'actualité :

Il importe d'arrêter un vocabulaire commun par élagage, puis symbiose entre les divers vocabulaires existants, où des mots différents désignent souvent des appareils équivalents ou des concepts identiques (régulateur et servomécanisme, asservissement et réaction ou contre-réaction, pompage et accrochage, réponse indicielle et fonction d'influence, etc.).

Le programme de l'association démontre une volonté de dynamisme tous azimuts :

- séances d'études, colloques, conférences, congrès, expositions, enseignements, moins diffus et plus efficaces que dans l'état actuel des choses,
- rapports, normalisations, publications, films,
- patronage, entretien, si possible création de laboratoires et de centres de documentation spécialisés,
- institution éventuelle de comités régionaux groupant localement ingénieurs, techniciens et industriels utilisateurs de la régulation et de l'automatisme,
- maintien de relations étroites avec les Associations françaises ayant des buts connexes, et avec les associations étrangères se donnant des buts similaires.

La première concrétisation de cette ambition se réalise par sa participation au Congrès international de l'automatique de Paris qui aura lieu en juin 1956.

Les liens avec la revue *Mesures. Essais. Régulation. Contrôle industriel* sont naturels, dans la mesure où elle prête ses services et ses bureaux à la nouvelle revue. La Société des ingénieurs civils est remerciée pour les facilités matérielles qu'elle offre. Dans le conseil de la revue, on note la présence du « doyen Pérès », pour la Société française des mécaniciens, de Rigal, pour la Société Française des Radioélectriciens, et de Pomey, pour le groupement pour l'Avancement de la mécanique industrielle. Il est à noter aussi la présence lors de ce discours d'allocution du président de la Société française des électriciens et celui du Comité de direction de la société de chimie industrielle.

C'est à partir du moment de la création de l'A.F.R.A. et de la mise en place de ses activités qu'un véritable domaine scientifique consacré à l'automatique existe en France. En septembre 1957, l'assemblée constitutive de l'International Federation of Automatic Control (I.F.A.C.) s'est déroulée à Paris sur l'invitation de l'A.F.R.A. [9]. Harold Chestnut en a été élu président. A moins de quarante ans, cet Américain est connu pour ses travaux sur les servomécanismes et sur la commande automatique. Sa carrière s'est déroulée presque exclusivement à la General Electric, partageant son temps entre les recherches, les applications et l'enseignement, « car la General Electric organise de façon continue des cours réservés à ses ingénieurs et techniciens pour promouvoir et développer leur formation », comme il est précisé dans l'article que lui consacre Maurice Lachin [9]. Au moment de sa création, cette association internationale regroupe des associations représentant dix-huit pays, son siège est à Genève [10].

4. Le congrès international de l'automatique de Paris de juin 1956

A. Un congrès international de l'automatique pour la première fois en France

Pour la première fois en France, du lundi 18 au dimanche 24 juin 1956, se déroule le Congrès international de l'automatique de Paris réunissant un millier de participants au C.N.A.M. à Paris. Ce congrès international fait suite aux congrès de Margate [11] en Angleterre en 1955 et au colloque de Milan [12] en avril 1956. Il sera suivi, en septembre de cette même année, par les congrès d'Anvers et d'Heidelberg [13]. Cette initiative revient à François-Henri Raymond qui en assure la présidence. Les vice-présidents du Comité



d'organisation du congrès de Paris sont Coales¹ et Campbell².

¹Professeur à l'Université de Cambridge et auteur d'un article en septembre 1956 intitulé : Historical and scientific background of automation [14] dans la revue Engineering.

²Professeur au Massachusetts Institute of Technology et auteur, entre autres, d'un ouvrage en 1948, Brown et Campbell, Principles of the servomechanisms [15]

La nécessité de promouvoir l'automatique et ses méthodes, inconnues de la plupart des ingénieurs et chercheurs à cette époque, a poussé Raymond à trouver le moyen le mieux adapté à cette promotion :

Il est donc essentiel qu'un Congrès international établisse un premier bilan des méthodes scientifiques qui s'offrent aux chercheurs de l'automatisme et dresse l'inventaire de ses possibilités techniques [...] Le congrès de l'automatique aura pour mission, entre autres, de mettre en valeur les théories fondamentales de cette science nouvelle qu'est l'automatique théorique et appliquée - qu'on ne saurait confondre avec la cybernétique dont le caractère doit encore s'affirmer [...] Il permettra de passer en revue les domaines d'application de l'automatisme, dans la production industrielle et dans la mécanique du travail de bureau et des méthodes de planning. Enfin, en faisant appel à des techniciens de la recherche opérationnelle, le congrès fera apparaître le caractère complémentaire de la recherche opérationnelle et de l'automatisme dans la gestion scientifique des entreprises. [16].

L'orientation vers le monde industriel de ce congrès est fixée, la différence avec la cybernétique est affirmée et l'ouverture vers la gestion des entreprises est prise en compte. Dans un article consacré à François-Henri Raymond [17], Maurice Lachin rappelle qu'« une première manifestation, qui a permis de mesurer l'intérêt que l'on porte en France aux questions de l'automatisme », s'est déroulée les 8, 9 et 10 février 1956 sous la direction du Commissariat général à la productivité. Cette manifestation s'intitule *Journées d'information sur l'automatisme*. Ces journées, comme le rappelle Léon Chevillotte [18], chargé de mission au Commissariat général à la productivité, ont été organisées par le Commissariat général à la productivité en liaison avec l'Association française pour l'accroissement de la productivité, pour « assurer une très large information » sur les questions de l'automatisme. Lors de la première séance, Léon Chevillotte, Pierre Naslin et Victor Broïda précisent « le véritable caractère de l'automatisme » et brossent « un tableau aussi complet que possible des moyens actuels de l'automatisme ». Après avoir écrit les deux premiers articles d'inventaire et de synthèse autour de l'automatisme dans le numéro de janvier de la revue *Automatisme*, Pierre Naslin et Victor Broïda sont de nouveau réunis lors de ces journées.

A l'issue de ces considérations, François-Henri Raymond propose « maintenant de faire davantage : de dégager et de proposer une doctrine française de l'automatisme »[17]. A partir de 1956, les scientifiques et ingénieurs français, par la voix de Raymond, revendiquent une automatique française. Pour l'affirmer, quoi de mieux que d'organiser un congrès international de « plus de 1 000 congressistes venus de France et de tous les pays du monde »[17]

B. François-Henri Raymond

Lors de la remise de la médaille André Blondel de l'Académie des sciences en 1950 à François-Henri Raymond, Louis de Broglie, secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences, justifie le choix de l'Académie en ces termes :

A la fin de 1948, âgé de 34 ans, François-Henri Raymond était déjà l'auteur de près de soixante publications et avait pris près de vingt brevets ; cela dénote une originalité et une puissance de pensée tout à fait rare qui en font, à 35 ans, un savant de très haute classe. [17]



Figure 1 : François-Henri Raymond

François-Henri Raymond est ingénieur de l'École supérieure de l'électricité en 1937, il passe un doctorat sur la théorie des réseaux polyphasés sous la direction de Louis de Broglie. Il enseigne à l'École nationale supérieure de l'Armement et occupe les fonctions de Chef de travaux au C.N.A.M. Les thèmes de recherche abordés par Raymond sont fort bien résumés par Louis de Broglie dans sa présentation à l'Académie :

Dans ses nombreuses recherches, il a abordé les sujets les plus divers de mécanique, d'électricité, d'électrotechnique et d'électronique. C'est surtout dans le domaine de l'électricité qu'il a fait une oeuvre très étendue et très originale. Il approfondit la notion de similitude en électrotechnique et en radioélectricité et applique la notion d'homothétie aux mesures



électriques ; il s'intéresse aux questions de radioguidage des avions et de radionavigation, aux télémesures, à l'étude de l'effet couronne. La théorie des réseaux électriques lui doit des contributions d'une originalité et d'une importance considérables. Il a aussi traité un grand nombre de questions particulières se rapportant à la théorie des circuits électriques. Ses recherches sur les problèmes de propagation lui ont permis de développer d'intéressantes analogies entre les systèmes moléculaires et certaines questions d'électrotechnique.

En plus de ce panorama éclectique, François-Henri Raymond est passionné par le calcul analogique et numérique. Au lendemain de la guerre, peu de personnes en France croient dans les possibilités des calculateurs électriques. Avec la volonté de fabriquer un outil de calcul, il crée la Société d'électronique et d'automatisme (S.E.A.) durant l'année 1948.

C. Le programme et les intervenants

François-Henri Raymond, par ailleurs président de l'Association des ingénieurs électroniciens, est le prototype de l'ingénieur capable d'établir un lien entre la science de l'automatique et les diverses techniques utilisées par l'automaticien. Il se propose lors de ce congrès :

de dégager un programme d'action qui constituera un commencement d'unification des méthodes de l'automatisme sur le plan international. Cette unification est indispensable si l'on veut éviter des tâtonnements et la répétition d'erreurs coûteuses. Jusqu'à présent, elle est laissée au soin des industriels qui, chacun dans leur domaine, s'efforcent d'adopter les améliorations les plus récentes réalisées par leurs concurrents. [...] Il est donc essentiel qu'un congrès international établisse un premier bilan des méthodes scientifiques qui s'offrent aux chercheurs de l'automatisme et dresse l'inventaire de ses possibilités technologiques.[16]

Le programme est divisé en trois groupes de travail. Les thèmes de chacun des groupes sont l'automatique générale pour le premier, l'automatique appliquée pour le deuxième et pour le troisième, automatique et production. Le travail à l'intérieur de chacun des groupes se déroule de la façon suivante :

après un rapport d'une heure, il est proposé aux congressistes trois exposés d'une demi-heure chacun, puis des communications suivies de discussions et de questions. Le rapport général d'une heure, qui a suivi la séance inaugurale, a présenté les concepts théoriques généraux de l'automatique. Puis, les exposés d'un mécanicien, d'un électricien et d'un chimiste ont terminé la journée. Le thème général de cette séance a été de présenter l'automatique comme une science et de mettre en évidence les liens de cette science nouvelle avec les autres sciences appliquées, les techniques et les mathématiques.

Pendant ce congrès, une centaine de conférenciers sont intervenus sur tous les aspects de l'automatique, scientifiques, techniques et industriels. De larges extraits de certaines conférences ont été publiés dans les numéros de juillet et d'août 1956 de la revue *Automatisme*. La présence d'ingénieurs anglais, américains, italien, suédois, yougoslaves assure effectivement le caractère international de la manifestation. Les sujets traités reflètent « les divers aspects de l'automatisme, les techniques auxquelles il a recours, les innovations qu'il introduit dans l'industrie, les expériences réalisées ou en cours, et les possibilités qu'il semble laisser prévoir » [19]. Les sujets abordés dans ces exposés se préoccupent des incidences économiques et sociales de l'automatisme.

L'image suivante montre la séance inaugurale du congrès. On y voit Marcel Buron (debout), ancien ministre, présidant la séance qui s'est tenue le 18 juin 1956. La personne assise au bout de l'estrade (de face) est François-Henri Raymond, le Président du congrès.



(D'après Halpery)
M. Robert Buron, ancien ministre, préside la séance d'inauguration du Congrès International de l'Automatisme, le 18 juin 1956. Au bout de la table, notre collaborateur M. François-Henri Raymond, président du Congrès.

Figure 2 : Congrès international d'automatique à Paris en 1956



5. Conclusion

Pour la première fois en France, une manifestation internationale a permis à de nombreux ingénieurs, scientifiques et techniciens d'aborder l'ensemble des problèmes liés à l'automatique. Lors de la clôture des travaux de ce congrès, Raymond a présenté une motion demandant « la création d'un Bureau International de l'automatique, dont les fonctions consisteront principalement à provoquer la réunion de nouveaux Congrès au cours des années à venir » [19]. La diffusion des idées nouvelles en automatique a donc été favorisée au milieu des années 1950 par la création d'une revue dédiée à l'automatique, d'une association permettant de regrouper les spécialistes de la régulation automatique et de l'automatisme, ainsi que par l'organisation du Congrès international de l'automatisme de Paris. Le rôle primordial joué par des hommes comme Pierre Nicolau, Marcel Véron, Victor Broïda, Pierre Naslin ou François-Henri Raymond, dans la diffusion de l'automatique en France en est confirmé [20].

Références

- [1] Patrice Remaud. L'introduction en France des idées nouvelles en automatique au lendemain de la seconde guerre mondiale. *3EI*, (48), Mars 2007.
- [2] Patrice Remaud. L'introduction de l'enseignement de l'automatique en France. *3EI*, (49), Juin 2007.
- [3] Le Comité de rédaction. Editorial. *Automatisme*, 1 : 3, janvier 1956.
- [4] Henri Longchambon. L'automatisme. *Automatisme*, 1 : 5–6, janvier 1956.
- [5] Victor Broïda. L'étendue et les limites de l'automatisme. *Automatisme*, pages 7–17, janvier 1956.
- [6] Victor Broïda. Le mécanisme général du réglage automatique. *Mesures. Essais. Régulation. Contrôle industriel*, 96 : 365–372, mai 1945.
- [7] Inconnu. Création d'une association française de régulation et d'automatisme (a.f.r.a.). *Automatisme*, 4 : 131, avril 1956.
- [8] Marcel Véron. Buts et moyens de d'une association française de régulation et d'automatisme (a.f.r.a.). *Automatisme*, pages 222–223, juin 1956.
- [9] Maurice Lachin. Harold chestnut. président de la fédération internationale de l'automatique. *Automatisme*, pages 323–325, septembre 1957.
- [10] Stephen Kahne. A history of the ifac congress. *IEEE Control Systems*, 16(3) : 10–12 et 78–83, juin 1996.
- [11] Inconnu. Les préparatifs du congrès international de l'automatisme de Paris. *Automatisme*, 5 : 165, mai 1956.
- [12] Inconnu. Un colloque international sur l'automatisme à Milan. *Automatisme*, 2 : 76, février 1956.
- [13] Inconnu. Les congrès internationaux de l'automatisme. *Automatisme*, 7 : 258, juillet 1956.
- [14] J. F. Coales. Historical and scientific background of automation. *Engineering*, pages 363–370, 21 septembre 1956.
- [15] G. S. Brown et D. P. Campbell. *Principles of the servomechanisms*. John Wiley & Sons, New York, 1948.
- [16] Inconnu. Un prochain congrès international de l'automatique de Paris accentuera l'orientation de la France vers l'automatisme. *Automatisme*, 3 : 109, mars 1956.
- [17] Maurice Lachin. Présentation de François Henri Raymond. *Automatisme*, pages 195–196, juin 1956.
- [18] Léon Chevillotte. Journées nationales d'information sur le développement de l'automatisme. *Automatisme*, page 40, janvier 1956.
- [19] Inconnu. Le congrès international de l'automatisme de Paris (18–24 juin 1956). *Automatisme*, 7 : 252–257, juillet 1956.
- [20] Patrice Remaud. *Histoire de l'automatique en France 1850- 1950*. Hermes Lavoisier, 2007.

RÉSÉLEC

Réseau National de Ressources en Électrotechnique

NOUVEAUTÉS

nouveaux référentiels

habilitation électrique

productions

contributions

évènements

concours

communiquer

forum

liens

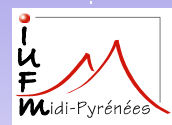
partenaires industriels

présentation de Résélec

contacts

rechercher

ministère
éducation
nationale
enseignement
supérieur
recherche



Nos missions 2006 / 2007 :

Production de ressources pédagogiques innovantes en génie électrique

- ◆ pour l'accompagnement de la rénovation
 - du BTS Électrotechnique,
 - du référentiel "Habilitation électrique",
- ◆ et le développement de la formation en économie d'énergie, éco conception, énergie renouvelables.

Missions antérieures :

Élaboration de documents pédagogiques pour

- ◆ le CAP PROELEC,
- ◆ le Bac Pro ELEEC,
- ◆ le BEP des métiers de l'électrotechnique,
- ◆ l'habilitation électrique.

www.iufmrese.cict.fr

Contacts :

Responsable pédagogique : Pascal MAUSSION
pmaussio@cict.fr
Chargé de la communication : Michel LEFÈVRE
mlefevre@cict.fr

Réseau National de Ressources en Électrotechnique
IUFM Midi-Pyrénées Site de Ranguel 118 route de Narbonne
31078 TOULOUSE CEDEX 4
Tél.: 05 62 25 21 85 ~ Télécopie: 05 62 25 21 58