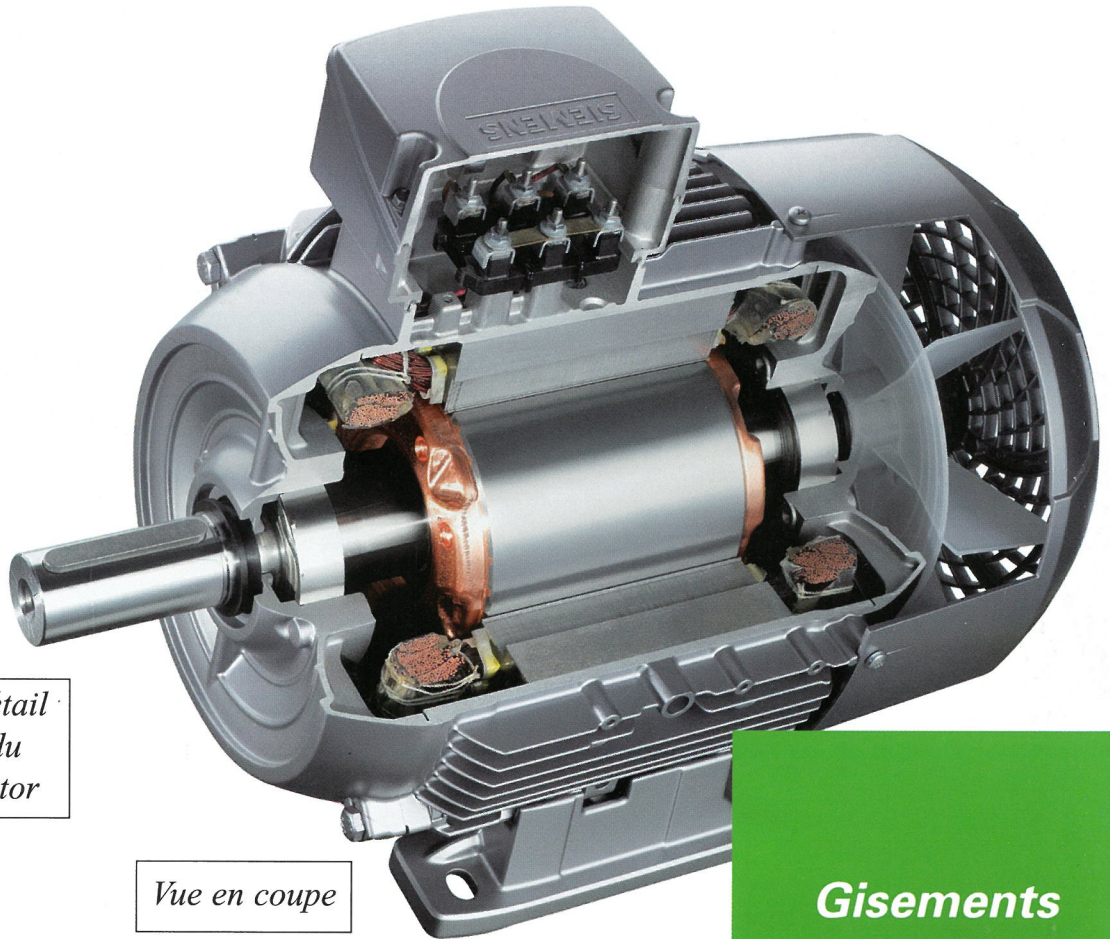
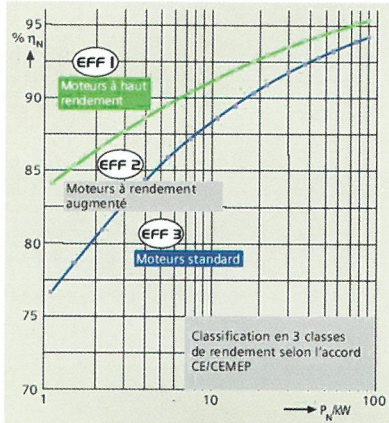


La Revue SEE



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



Détail du rotor

Vue en coupe

Gisements d'économies d'énergie

MOTEUR HAUT RENDEMENT (EFF3)

Crédit photos : Siemens A et D

Publication trimestrielle du Cercle Thématique 13.01 de la SEE

ENSEIGNER L'ELECTROTECHNIQUE ET L'ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE



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

N° 52 - Mars 2008



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 :</p> <p>Individuel : France et CEE.....36 € Pays hors CEE.....46 €</p> <p>Collectivités 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 : Mars 2008</p> <p>Commission Paritaire 1207 G 78028 ISSN 1252-770X</p>	<p style="text-align: right;">Sommaire du n°52</p> <p style="text-align: center;">Thème : Gisements d'économies d'énergie</p> <p>p. 2 <i>Éditorial,</i></p> <p>p. 3 <i>Publications, Informations,</i></p> <p>p. 4 <i>Efficacité énergétique dans les secteurs résidentiels et tertiaire</i> J F Sergent USTL Lille , J Bonal ECRIN</p> <p>p. 13 <i>Consommation des utilités et entraînements industriels, gagner plus en travaillant mieux</i> A. Brugier Lycée Clément Ader Athis mons</p> <p>p. 23 <i>Dimensionnement et contrôle des systèmes multi énergies pour les bâtiments à haute performance énergétique</i> J Virgone^{1,2}, E Fabrizio^{3,4}, Y Raffene^{3,5}, E Blanco⁵, G Thomas⁵ 1 université deLyon ; 2 LASH ENTPE Vaulx en velin ; 3 CETHIL Lyon ; 4 DENER Turin , 5 AMPERE Lyon</p> <p>p. 31 <i>Thermoélectricité : une nouvelle mine verte ?</i> C. Godart CNRS CIMPE</p> <p style="text-align: center;">Hors thème</p> <p>p. 46 <i>Redresseur à absorption de courants sinusoïdaux, commande dans le repère triphasé</i> G Fadat Y Dorali ESIEE Amiens</p> <p>p. 59 <i>Etude didactique des systèmes photovoltaïques , optimisation thermique et électrique</i> C Jaouen², E Lacombe², O Bethoux¹, J P Kleider¹ 1 CNRS, SUPELEC 2 ENS Cachan (EEA)</p> <p>p. 73 <i>Les systèmes de génération d'énergie électrique à partir des courants de marrée</i> S E Ben Eelghali, L Drouen, MEH Benbouzid J F Charpentier, J A Astolfi, F Hauville</p> <p>p. 86 <i>Sonde différentielle 1 /100 2 voies , dix ans déjà</i> V. Fichet Lycée Jules Fil Carcassonne</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 continuons avec ce numéro à traiter le thème riche, en évolution incessante et rapide, des gisements d'économie d'énergie.

La seconde partie de l'article d'Arnaud Brugier étudie la consommation des utilités et entraînements industriels tandis que Jean Bonal et Jean-François Sergent d'une part et Joseph Virgone d'autre part nous parlent d'économies d'énergie dans le domaine du bâtiment. A la date de parution, la mise à jour des données de l'article d'Olivier Sidler étant en cours, nous préférons attendre son actualisation : il vous faudra donc patienter encore un peu pour tout savoir sur la maîtrise de la demande d'énergie.

A la lisière de ce thème, nous présentons un autre aspect de l'économie d'énergie : comment récupérer la chaleur perdue dans les composants électroniques ayant envahi notre univers ? Claude Godart fait un état de l'art de la thermoélectricité.

Les rubriques Histoire des Sciences et Sciences Appliquées ne seront pas présentées dans ce numéro, mais reprendront dans le numéro de Juin dont le thème sera entièrement consacré aux FPGA (Field Programmable Gate Array) à la grande joie de nos lecteurs passionnés d'électronique de contrôle.

Les prévisions pour les thèmes abordés au cours des numéros de l'année 2008/2009 sont :

- **La pile à combustible** pour le mois de Décembre 2008
- **La Cogénération** pour le mois de Mars 2009
- **Le Magnétisme** pour le mois de Juin 2009

Ces projets de thèmes sont susceptibles d'être modifiés ou décalés en fonction du nombre d'articles reçus.

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

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 :

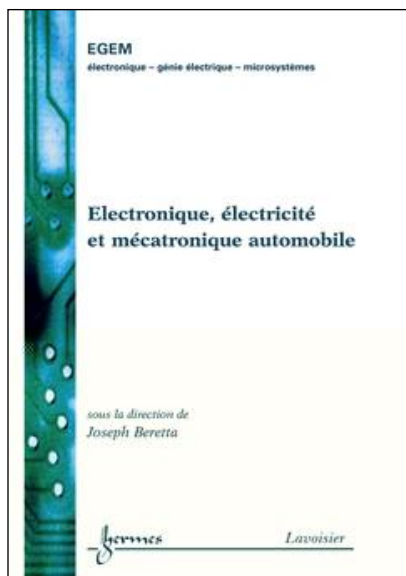
Numéros : 51 (décembre 2007), 52 (mars), 53 (juin) et 54 (septembre 2008).

<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**



Électronique, électricité et mécatronique automobile (Traité EGEM, série génie électrique)

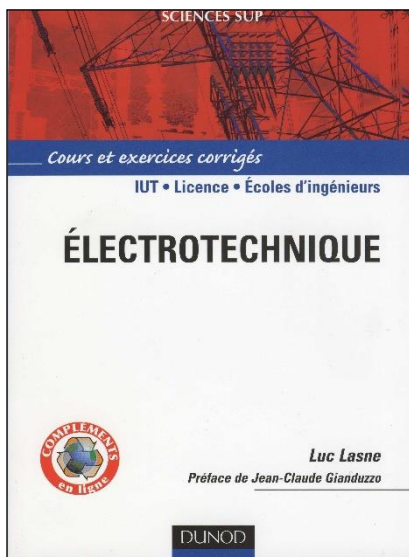
BERETTA Joseph

Editions Tec et Doc Lavoisier

Depuis la fin du XXe siècle, l'électricité et l'électronique ont envahi notre vie quotidienne (robots électriques, ordinateurs, téléphones etc.). Présents dans la plupart de nos objets de tous les jours, ces disciplines investissent en force l'automobile. Si la mutation a été dans ce domaine assez lente au début, elle s'accélère aujourd'hui, poussée par les contraintes réglementaires des lois du marché. L'électricité et l'électronique automobile ont maintenant pris une place importante dans le véhicule et ont ouvert la porte à la mécatronique.

La mécatronique est un mélange de mécanique, d'électricité, d'électronique et de logiciel. L'électron, apporte l'intelligence à la mécanique en la rendant plus performante et plus précise et, cette électronique est aujourd'hui intégrée jusqu'au cœur de la mécanique. Sa part en coût sera bientôt plus importante que la mécanique. Dans ce contexte, cet ouvrage apporte à la fois des éléments historiques, scientifiques, et prospectifs pour comprendre l'évolution de ces technologies dans l'automobile.

À partir des contraintes automobiles, il aborde ainsi : le rôle des différents systèmes électriques et électroniques tels que l'architecture électronique, les réseaux, les calculateurs, les capteurs. Il décrit les principes de fonctionnement et de dimensionnement de l'alternateur, du démarreur, de la batterie. Tout un chapitre est consacré à la mécatronique, basé sur des exemples concrets comme la supervision du GMP, les Systèmes Alterno-Démarreur Réversibles, le contrôle des soupapes sans arbre à came, la direction assistée et le moteur réversible d'essuie-glace. Pour terminer les perspectives d'évolution de l'électricité et de l'électronique sont décrites et argumentées.



Electrotechnique :

Luc LASNE

Editions Dunod

Sommaire :

Rappels et grandeurs sinusoïdales. Les puissances électriques. Circuits à courants alternatifs triphasés. Systèmes triphasés déséquilibrés, résolutions matricielles et composantes symétriques. Magnétisme, matériaux et circuits magnétiques. Circuits magnétiques en régime alternatif sinusoïdal. Circuits magnétiques à aimants permanents. Énergies, puissances et forces liées au magnétisme, méthode des travaux virtuels. Transformateurs. Les convertisseurs électromécaniques. Machines à courant continu. Alternateurs et machines synchrones. Machines asynchrones. Transformations matricielles – modèles « d, q » des machines à courants alternatifs triphasés. Harmoniques et régimes déformés.

Public : Étudiants en Licences 2 ou 3 (EEA) ; Élèves d'IUT

Efficacité énergétique dans les secteurs résidentiel et tertiaire

Jean-François SERGENT

USTL Cité Scientifique Bâtiment P2 bureau 118 - 59 655 Villeneuve d'Ascq Cedex - jean-francois.sergent@univ-lille1.fr

Jean BONAL

Président d'ECRIN-Electronique de puissance/Conversion d'énergie

ECRIN – 32 boulevard de Vaugirard – 75 015 Paris

Résumé : Cet article est une contribution à la thématique concernant l'efficacité énergétique et les gisements d'économie d'énergie. Il concerne deux secteurs dont on sait qu'ils contribuent fortement en France à la consommation d'énergies fossiles et donc à l'émission de gaz à effet de serre (GES). Après avoir rappelé les enjeux et les objectifs à long terme, il s'attache dans un premier temps à analyser les différents postes de consommation dans le secteur résidentiel-tertiaire et leur évolution récente, puis il décrit les solutions qu'il nous faut impérativement et rapidement mettre en œuvre dans notre pays.

1. Introduction

Deux défis majeurs devront être relevés par l'humanité au cours de ce siècle. En premier lieu, nous le savons aujourd'hui, l'émission de GES d'origine anthropique devra fortement diminuer pour éviter un dérèglement climatique majeur aux conséquences largement évoquées, le dernier rapport du GIEC paru en 2007 [1] laisse en effet peu de place au doute. Le second point concerne l'épuisement programmé des ressources énergétiques fossiles [2] et leur substitution par des sources à faible émission de GES. Enfin nul besoin d'être expert en géopolitique pour comprendre que l'émergence de nouveaux pays (*Chine, Inde, Brésil ;...*) ne fera qu'amplifier les sources de problèmes et donc les risques de conflits. Il importe donc dès à présent, moins de réfléchir aux solutions à mettre en œuvre (nous en connaissons un certain nombre), que de modifier profondément nos comportements en particulier notre rapport à l'énergie.

2. Du facteur 100 au « facteur 4 »

Quand on examine au cours de l'histoire humaine la consommation individuelle d'énergie, on est frappé de constater une augmentation constante marquée par les grandes étapes de l'évolution de notre espèce (cf. Figure 1). Par rapport à l'homme « primitif » on peut dire qu'un homme « moderne » consomme environ 100 fois plus d'énergie. Si nous n'étions que quelques dizaines de millions sur Terre cela ne poserait sans doute que peu de problèmes, malheureusement la population mondiale devrait atteindre les 9 milliards d'individus d'ici 2050, cette situation n'est pas tenable.

La consommation mondiale d'énergie (11 435 Mtep en 2005) provient pour 81% de ressources fossiles carbonées (pétrole 35%, charbon 25%, gaz 21 %) auxquels s'ajoutent 6% d'origine nucléaire [3]. Ceci a provoqué l'envoi dans l'atmosphère de 27 GT de dioxyde de carbone soit près de 7,3 GT de carbone [4]. Les différents puits que constituent les végétaux en phase de croissance et les océans n'en réabsorbant qu'environ la moitié il nous faut donc diviser au moins par deux les rejets mondiaux. Mais pour ne pas entraver le développement des pays émergents, ceux de l'hémisphère Nord se doivent de redoubler d'effort ce qui nous amène, en considérant la population mondiale actuelle, au désormais célèbre « scénario facteur 4 » soit pour l'Europe une division par 4 de ses émissions de CO₂. Il faudrait sans aucun doute faire beaucoup mieux si on prenait en compte l'évolution réelle de la démographie.

Bien entendu tous les secteurs, au sens où ils sont définis habituellement par les instances gouvernementales, sont directement concernés (*industrie, résidentiel, tertiaire, transport et agriculture*). Un calcul élémentaire montre que diminuer de 75% d'ici 2050 ces émissions (hypothèse minimale) implique une diminution annuelle d'environ 3,2% ; nous sommes malheureusement loin du compte en effet il nous faudra d'abord inverser le signe de la dérivée ce qui représente un sérieux défi, à cet égard on ne manquera pas de signaler que les experts de l'AIE s'attendent eux à une augmentation globale de 50% pour la période 2005 – 2030 [5] !...

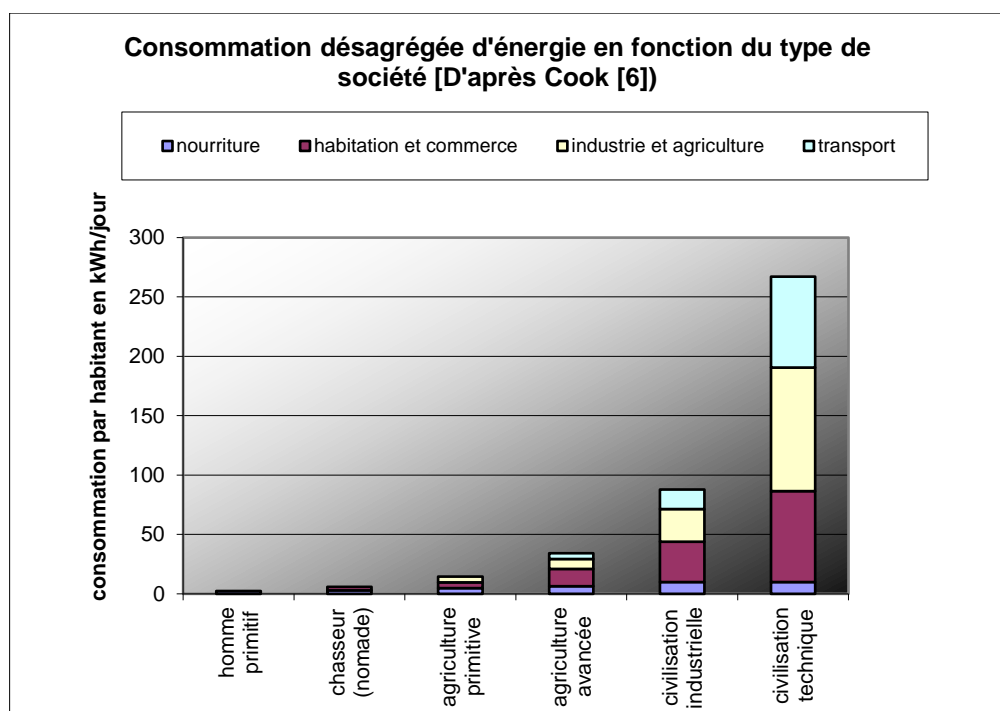


Figure 1

3. Les enjeux autour du bâtiment en France

3.1 Analyse du parc français

En France le secteur résidentiel-tertiaire représente à lui seul près de 45% de la consommation énergétique finale et environ 22% des émissions de CO₂ [7], à la lecture des propositions du Grenelle de l'environnement on constate qu'un large consensus existe aujourd'hui pour modifier en profondeur les performances énergétiques des bâtiments. Pourtant une analyse du parc français montre l'ampleur de la tâche. Ce dernier est constitué d'environ 31 millions de logements [8] dont 56% de logements individuels et 44% de logements collectifs.

Ce parc est relativement âgé, 60% des logements ont été construits avant 1960 et 15% seulement depuis 1982 avec d'ailleurs des performances énergétiques désormais insuffisantes. Pour atteindre les objectifs cités précédemment, on considère qu'il faudra rénover à peu près 400 000 logements anciens par an sur 40 ans [9]. On comprend vite où se situe l'enjeu majeur, modifier en profondeur les vieux logements est devenue une impérieuse nécessité. Malheureusement s'il existe bien une réglementation thermique à l'usage des bâtiments neufs (RT 2005 et bientôt RT 2010), la France ne dispose pas encore d'outils qui imposeraient un cadre réglementaire pour les habitations à rénover.

3.2 Les objectifs à atteindre

Le tableau ci-dessous donne les valeurs cibles, en énergie primaire pour la consommation destinée au chauffage des locaux et d'eau chaude sanitaire (ECS), en énergie finale pour l'électricité spécifique (usages captifs tels que l'éclairage, la production de froid, le matériel multimédia...), à ce sujet rappelons qu'en France 1 kWh d'électricité prélevé au réseau représente en moyenne 2,58 kWh d'énergie primaire, il faut garder ce coefficient en mémoire lorsque l'on examine les bilans énergétiques ; ne considérer que la seule énergie finale dans le cas de l'électricité revient évidemment à minorer la part prélevée dans les réserves de ressources fossiles. Les valeurs cibles sont calées sur l'objectif précédent.

Secteur	Usage	Bâtiments <1975	Bâtiments neufs	Ensemble actuel	Valeurs cibles
Résidentiel	Chauffage kWh/m ² /an ⁽¹⁾	328	80 à 100	210	50
	ECS* kWh/m ² /an ⁽¹⁾	36	40	37,5	10
	Electricité à usage spécifique (kWh/pers/an)	1000	1000	1000	250
Tertiaire	Chauffage kWh/m ² /an ⁽¹⁾	209	155	196	50
	ECS* kWh/m ² /an ⁽¹⁾	19	40	29	7
	Electricité à usage spécifique (kWh/m ² /an)	?	variable selon secteur	96	24

(1) en kWh d'énergie primaire par m² habitable

Tableau 1 [9]

4. Bilan énergétique du secteur résidentiel

4.1 Consommation finale par source d'énergie

Le secteur résidentiel couvre l'habitat individuel et collectif. La figure 2 nous éclaire sur un certain nombre de points, si la consommation totale n'a augmenté que de 10% en 30 ans, on constate une profonde mutation dans le mix énergétique. Ainsi le charbon, grand émetteur de CO₂, a quasiment disparu au profit du gaz et de l'électricité, le recours au fioul a lui aussi fortement diminué ; quant à la part de l'électricité celle-ci a quadruplé sur 30 ans. Ceci résulte évidemment des choix politiques en matière d'énergie après le premier choc pétrolier. Malgré l'utilisation importante de l'électricité on s'aperçoit que près des deux tiers de la consommation contribuent encore à l'émission de GES. Pour ce qui concerne le bois son bilan carbone est neutre, sous réserves d'une gestion adaptée du parc forestier.

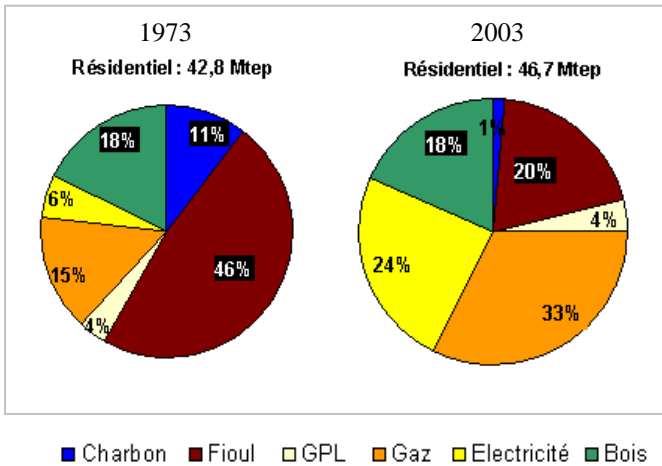


Figure 2 - Répartition de la consommation finale d'énergie par source [10]

4.2 Consommation finale d'énergie par usage

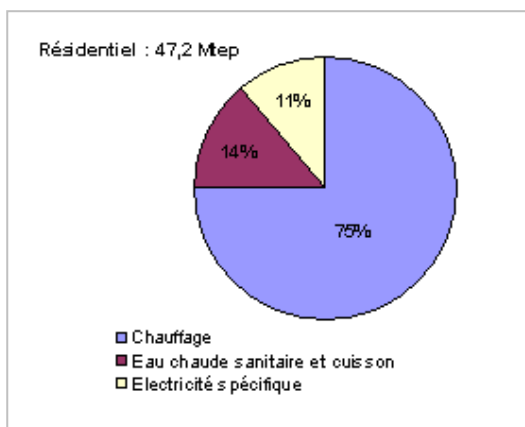


Figure 3 - Répartition de la consommation par usage [11]

La figure 3 nous délivre une information de première importance : réduire la consommation de ce secteur c'est d'abord et surtout réduire les déperditions thermiques des locaux, les surfaces à chauffer représentent en effet un peu plus de 2 milliards de m².

4.3 Consommation française d'électricité par usage

	1985	1990	1995	1999	2000	2001	2002	2003
Chauffage électrique à climat réel	35,8	36,9	39,7	39,8	38,8	39,7	37,3	40,6
Correction climatique	- 4,7	3,9	4,3	3,7	4,9	3,7	5,9	2,7
Chauffage climatique à climat corrigé	31,1	40,8	44,1	43,4	43,7	43,4	43,2	43,3
Eau chaude sanitaire	10,9	13,3	17,5	18,2	19	19,7	19,4	19,4
Cuisson	4,7	6,2	8,8	10	10,1	10,1	10,2	10,4
Electricité spécifique	35,7	39,6	46	53,6	55,7	58,7	60,3	61,6
Consommation du secteur résidentiel en TWh	82,4	99,9	116,4	125,2	128,5	131,9	133,1	134,7

Tableau 2 - Consommation d'électricité corrigée par usage [12]

Rappelons que la consommation des secteurs résidentiel et tertiaire a presque été multipliée par 5 entre 1973 et 2003 et qu'elle représentait en 2006 près des deux tiers de la consommation nette française (39% seulement en 1973).

Sur le tableau précédent on constate la part importante consacrée au chauffage électrique, elle a augmenté d'environ 40%, après correction climatique, au cours de la période considérée. En effet compte tenu des faibles coûts d'investissement ce mode de chauffage a souvent la faveur des particuliers ou des investisseurs privés que ce soit pour les constructions neuves ou rénovées. Son utilisation et sa pertinence font aujourd'hui débat, il faut savoir qu'il est interdit dans certains pays européens. La consommation d'eau chaude sanitaire a quant à elle quasiment doublé sur la même période on le sait d'autres voies sont envisageables (capteurs thermiques solaires). Pour ce qui concerne l'électricité spécifique, la situation est encore plus frappante, près de la moitié de l'énergie imputable au secteur résidentiel y est consacrée.

Si des gains substantiels sont souvent possibles, il serait sans doute opportun de porter un regard plus critique sur nos achats d'équipements électriques et au delà sur leur utilisation. Car même avec des technologies à priori intéressante les réductions de consommation sont très rapidement anéanties par notre niveau d'exigence et de confort ; le meilleur exemple que l'on peut donner ici est celui des écrans « plasma »* (ils sont de plus en plus grands et de plus en plus fréquents dans les foyers), la

* Consommation en fonctionnement autour de 350 à 400W

technologie ne suffit pas à enrayer notre « boulimie » énergétique.

4.4 Consommation d'électricité spécifique

	1973	1979	1985	1990	1995	1997	1998	1999
Eclairage	3,2	4,9	5,5	8,1	9,9	10,5	11,0	11,5
Appareils ménagers	12,9	21,3	25,6	30,3	33,0	32,5	33,1	33,7
Divers	3,6	5,6	6,6	9,2	11,6	19,3	23,1	29,4
Total en TWh	19,7	31,8	37,7	47,6	54,5	62,3	67,2	74,6

Tableau 3 - Consommation spécifique du secteur résidentiel [3]

Les chiffres donnés ici ne sont pas en accord avec les précédents car la source et le mode de calcul sont différents. Jusqu'au milieu des années 90 et pour les trois postes considérés, la progression a été fulgurante puisque multipliée par 3 ! Par la suite pour l'éclairage et les appareils ménagers la croissance s'est ralentie, on peut certainement l'expliquer par un taux d'équipement des ménages relativement élevé et un report d'intérêt pour d'autres produits. Le dernier poste est lié aux achats de technologie récente (petits appareils électriques et électroniques ne rentrant pas dans la classification ci-dessous) ; sur 25 ans la croissance annuelle a été en moyenne de 12,3 % ; aujourd'hui ce poste représente plus que le chauffage électrique ou les gros appareils ménagers détaillés dans le tableau 4 !...

4.5 Consommation des appareils électroménagers

	1973	1979	1985	1990	1995	1997	1998	1999
Réfrigérateurs	6,5	10,0	11,3	13,1	12,4	11,1	11,1	11,1
Congélateurs	0,8	3,5	5,2	6,2	7,1	7,3	7,4	7,5
Lave-linge	3,9	5,1	5,6	5,7	4,7	4,0	4,0	4,0
Sèche-linge			0,5	0,8	2,5	2,6	2,7	2,8
Lave-vaisselle	0,2	1,0	1,6	2,4	3,6	3,8	3,9	4,0
Téléviseurs	1,5	1,7	1,9	2,1	2,7	3,7	4,0	4,3
Total en TWh	12,9	21,3	26,1	30,3	33,0	32,5	33,1	33,7

Tableau 4 - Consommation de certains appareils [3]

Pour la période 1990-1999 l'accroissement de la consommation s'est nettement ralenti ; la production de froid (les 2 premières lignes) constitue l'essentiel du total. La mise en vente de réfrigérateurs mieux isolés a permis au milieu des années 90 une légère décrue mais qui ne compensent pas l'augmentation sur les autres produits. En fait comme très souvent deux effets s'opposent, d'un côté la technologie permet une

amélioration unitaire notable de l'efficacité énergétique de l'autre la demande s'accroît.

5. Bilan énergétique du secteur tertiaire

5.1 Etat des lieux

Le secteur tertiaire concerne les activités suivantes, enseignement, santé, bureaux, commerces, cafés, hôtels et restaurants, sports et loisirs, transports (gares et aéroports), habitat communautaire. La décomposition par branches donnée ci-dessous nous montre là aussi une certaine vétusté du parc.

Surfaces du parc tertiaire	2004	dont parc	
		d'avant 1980	1981 et après
	Millions de m ²		
Transport	24,6	55 %	45%
Cafés-Hôtels-Restaurants	57,3	71 %	29%
Commerce	194,8	62%	38%
Bureaux-administration	182,5	51%	49%
Sports-Loisirs-Culture	65	20%	80%
Enseignement-recherche	171,7	73%	27%
Santé-Action sociale	98,6	71%	29%
Habitat communautaire	55,5	nd	nd
Total du tertiaire	850	60%	40%

Tableau 5 - Analyse du parc du secteur tertiaire

5.2 Consommation finale par source d'énergie

A l'inverse du secteur résidentiel, la consommation globale a presque doublé. L'utilisation du fuel (dédié au chauffage) a largement régressé au profit du gaz et de l'électricité ; l'utilisation du bois dans ce secteur est inexistante ce qui n'est pas le cas dans certains pays d'Europe du Nord et en Autriche.

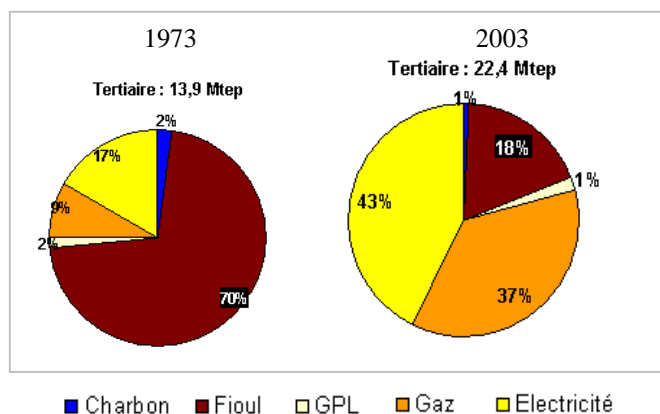


Figure 4 - Répartition de la consommation finale d'énergie [10]

5.3. Consommation finale d'énergie par usage

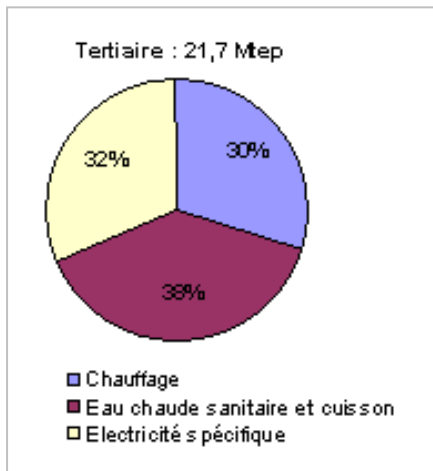


Figure 5 - Répartition de la consommation par usage [11]

La consommation globale est relativement équilibrée; il n'y a donc pas, contrairement au secteur résidentiel, une priorité forte il faudra par conséquent agir de manière coordonnée sur les trois postes.

5.4. Consommation d'électricité par usage

	1985	1990	1995	1999	2000	2001	2002	2003
Chauffage électrique à climat réel	n.d.	11,4	12,7	14,3	13,9	14,5	13,9	15,6
Correction climatique	n.d.	1,1	1	1,1	1,6	1,1	2	0,8
Chauffage climatique à climat corrigé	8,4	12,5	13,7	15,4	15,5	15,6	15,9	16,4
Eau chaude sanitaire et cuisson	3,7	8,6	10,1	10,8	11	11,2	11,4	11,6
Electricité spécifique	45,7	58,6	66,7	72,6	74,5	76,5	78,9	79,9
Consommation du secteur résidentiel en TWh	57,8	79,7	90,5	98,8	101	103,3	106,2	107,9

Tableau 6 - Consommation d'électricité corrigée par usage [12]

Concernant le chauffage, l'augmentation des surfaces et le recours à l'électricité ont provoqué un doublement de la consommation ; la mise en place des réglementations thermiques successives (en 1988, 2000 et 2005) a heureusement permis de freiner cette demande. Par contre la nécessité d'éclairer ces nouveaux locaux, le recours massif aux appareils de bureautique (ordinateurs, imprimantes, copieurs...) enfin l'installation de climatiseurs ont alourdi la part liée aux usages captifs de l'électricité. Ce poste représente aujourd'hui près de la moitié de la consommation du secteur tertiaire. Pour la cuisson et l'eau chaude sanitaire, on peut faire les mêmes constats que pour le secteur résidentiel.

6. Réduction des besoins pour le confort thermique des bâtiments

6.1 Cas du chauffage

6.1.1 Forme et orientation du bâtiment

On a vu précédemment l'impact du chauffage sur les besoins énergétiques globaux ; réduire ces besoins passe par deux points clefs.

En premier lieu il faut limiter les déperditions thermiques ceci suppose une forme géométrique compacte (pour limiter les échanges par convection-rayonnement avec l'air extérieur), de ce point de vue l'habitat collectif est plus favorable que l'habitat individuel (voir par exemple le quartier de Fribourg en Allemagne). D'autre part pour diminuer les pertes par conduction à travers l'enveloppe du bâti, la résistance thermique des parois opaques devra être dimensionnée en conséquence et le choix des ouvertures (fenêtres, portes) se portera sur les produits les plus performants du marché.

Le deuxième impératif concerne l'orientation du bâtiment, en effet en hiver on peut chercher à bénéficier au maximum des apports solaires gratuits. Quand elle est possible, l'orientation au sud est alors la plus favorable, ainsi dans les maisons dites « passives » on préconise 60% des surfaces vitrées dans cette direction. Evidemment des dispositions devront être adoptées pour éviter une surchauffe en été (toit débordant, végétation, stores amovibles...).

6.1.2 Isolation thermique de l'enveloppe

Pour les parois opaques (murs, toiture et dalle), la résistance thermique devra la plus élevée possible ($R_{th} > 10 \text{ K.W}^{-1}$ pour une surface de 1 m^2). Ceci passe par une épaisseur d'isolant minimale de 30 cm (pour être en conformité avec la réglementation thermique en vigueur, 10 cm suffisent), et des matériaux à basse conductivité thermique ($\lambda < 0.04 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$). Enfin, contrairement à l'habitude prise en France, l'isolation devra impérativement être placée à l'extérieur, c'est la seule solution pour éviter les ponts thermiques.

6.1.3 Choix des matériaux isolants

Les critères de choix s'appuieront sur les éléments suivants :

- conductivité et diffusivité thermique
- énergie grise (fabrication, transport, recyclage)
- résistance à la compression
- perméabilité à la vapeur
- renouvelabilité

- recyclabilité
- biocompatibilité
- tenue au feu et à l'humidité
- contraintes de pose
- prix

On trouve sur le marché une grande quantité de produits aucun d'entre eux ne satisfait simultanément l'ensemble de ces critères.

Les matériaux de synthèse se répartissent en deux grandes familles parmi eux on trouve les produits dérivés du pétrole (polystyrène, polyuréthane) ils sont, pour l'instant, très bon marché et donc largement utilisés mais ils sont responsables d'une énergie grise très importante et libèrent des gaz hautement toxiques en cas de combustion. On peut leur préférer la laine de roche ou la laine de verre qui constituent un bon compromis en terme de performances et de coût.

Les matériaux naturels, de plus en plus appréciés, sont à priori moins nocifs pour l'environnement, ils se déclinent en deux catégories les produits d'origine animale (plume, laine de mouton...) ou d'origine végétale (bois, chanvre, paille, cellulose...). Eu égard à leurs qualités tous ces produits sont certainement appelés à se répandre mais ils souffrent encore d'une faible diffusion et d'un prix d'achat nettement plus élevé que les matériaux de synthèse.

6.14 Fenêtres

C'est probablement, et pour de nombreuses années encore, le point faible de l'enveloppe. Même avec les meilleurs produits disponibles, les déperditions thermiques surfaciques sont 6 à 7 fois plus élevées qu'à travers les parois opaques ; il y a donc un enjeu majeur pour la recherche dans ce secteur.

Tableau comparatif de différents vitrages thermiquement isolants [13]

Les chiffres donnés correspondent à des vitrages existant réellement sur le marché, il en existe beaucoup d'autres.

Type de vitrage	Simple	Double vitrage basique	Double vitrage peu émissif	Double vitrage peu émissif avec gaz rare	Double vitrage peu émissif avec gaz rare et protection solaire	Triple vitrage peu émissif avec gaz rare
Épaisseur en mm du vitrage verre/lame (air ou gaz)/verre	6	4/10/4 (air)	4/12/4 (air)	4/16/4 (argon)	4/16/4 (argon)	4/12/4/12/4 (krypton)
U en W/m ² .°C	5,7	3	1,9	1,2	1,1	0,5
Facteur solaire	82 %	75 %	69 %	78 %	43 %	52 %
Taux de transmission lumineuse	89 %	81 %	69 %	65 %	71 %	72 %
Économie d'énergie par rapport à un simple vitrage en kWh/m ² /an de vitrage	-	298 kWh/m ² soit 29,8 €/m ²	419 kWh/m ² soit 41,9 €/m ²	497 kWh/m ² soit 49,7 €/m ²	508 kWh/m ² soit 50,8 €/m ²	574 kWh/m ² soit 57,4 €/m ²
Économie d'énergie par rapport à un double vitrage basique en kWh/m ² /an de vitrage	-	-	121 kWh/m ² soit 12,1 €/m ²	199 kWh/m ² soit 19,9 €/m ²	210 kWh/m ² soit 21 €/m ²	276 kWh/m ² soit 27,6 €/m ²
Économie d'énergie par rapport à un double vitrage peu émissif avec gaz rare en kWh/m ² /an de vitrage	-	-	-	-	-	77 kWh/m ² soit 7,7 €/m ²

* Prix calculé selon un tarif du kWh de 0,1 euro

6.15 Renouvellement d'air

Un bâtiment parfaitement isolé se doit d'être étanche (voir à ce sujet les normes définissant la maison « passive »), en même temps il faut garantir à ses occupants un air sain et donc procéder à un renouvellement d'air. Les meilleurs systèmes de ventilation sont la plupart du temps à double flux avec récupérateur de chaleur ; ils affichent un rendement de l'ordre de 70 à 80%. On peut pousser plus loin encore les performances en construisant un puits canadien (ou puits provençal). L'air neuf entrant se réchauffe progressivement dans une conduite enterrée dans le sol avant de pénétrer dans l'habitable diminuant ainsi l'énergie nécessaire pour le réchauffer.

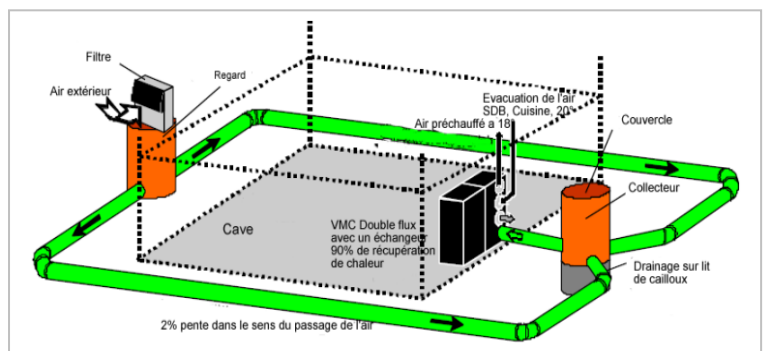


Figure 6 – Schéma de principe d'un puits canadien [14]

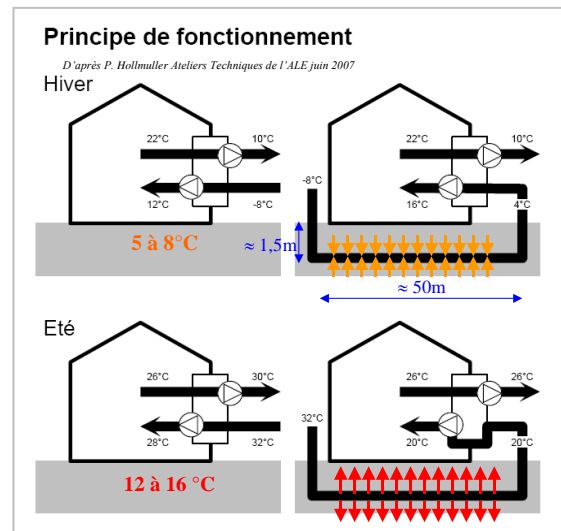


Figure 7 – Comparaison de 2 systèmes de renouvellement d'air [15]

6.16 Source primaire d'énergie pour le chauffage

Là encore le choix est vaste mais pour rester dans le périmètre du « scénario Facteur 4 », on se doit de privilégier le recours à des sources primaires à faibles émissions de GES (chaudière à gaz à condensation) ou mieux des sources à bilan carbone quasi nul (il faut toujours prendre en compte le conditionnement et le

transport du combustible), le chauffage au bois à l'aide d'une chaudière ou d'un poêle en est un très bon exemple ; c'est sans doute la raison de son succès actuel auprès des particuliers.

Malgré des qualités indéniables, le chauffage électrique pâtit d'un rendement global médiocre. En effet produire 1 kWh de chaleur avec un convecteur, ou un radiateur, revient à puiser 3 kWh d'énergie primaire avec de surcroît une charge en carbone à peu près égale à 180 g de CO₂ [16]. Ce n'est d'ailleurs pas un hasard si la future réglementation thermique mettra en avant, comme procédé électrique de chauffage, la pompe à chaleur ; dans ce cas avec un COP (COefficient de Performance thermodynamique) compris entre 3 et 4,5 le bilan est nettement plus favorable.

6.2 Cas de la climatisation

6.2.1 Importance de l'inertie de l'enveloppe

Contrairement à une idée largement répandue, une résistance thermique élevée ne suffit pas à garantir un confort d'été satisfaisant ($\theta_{int} < 26\text{ °C}$). Il faut en effet atténuer et déphaser la part du flux thermique solaire pénétrant à travers le bâti. Par analogie électrique et pour simplifier disons que les parois doivent se comporter comme un filtre passe-bas à forte constante de temps. Or obtenir des constantes de temps thermiques de plusieurs heures nécessite des matériaux à la fois massifs et affichant une chaleur massique élevée ; l'emploi du polystyrène n'est ici d'aucun secours. Certains produits tels que les briques à isolation répartie (aussi appelées briques alvéolaires) remplissent parfaitement cette fonction, leur énergie grise est toutefois notable (675 kWh.m⁻³).



Figure 8 – Brique alvéolaire [17]

6.2.3 Renouvellement d'air

Tout comme pour le confort d'hiver, le puits canadien peut s'avérer une solution pertinente. La température du sol étant plus faible en été que celle de l'air extérieur, on refroidit cette fois l'air neuf pénétrant dans l'habitable.

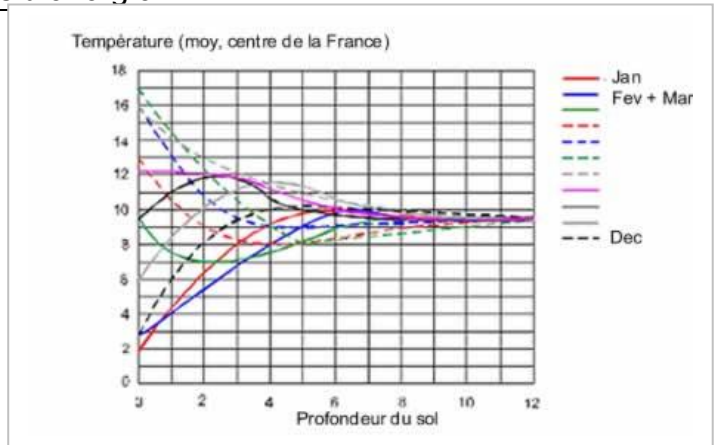


Figure 9 – Température moyenne du sol selon les saisons [18]

6.2.4 Usage des climatiseurs

Si toutes les dispositions évoquées précédemment étaient systématiquement mises en œuvre, le recours aux climatiseurs serait limité à quelques situations particulières (hôpitaux, maisons de santé ...) ou à certaines zones géographiques. Signalons enfin que ces appareils utilisent souvent des fluides qui sont de puissants gaz à effet de serre (CFC type R134 par exemple).

6.3 Un exemple à encourager : la maison passive

La mise en œuvre de toutes les améliorations décrites précédemment se décline à travers différentes réalisations dont certaines débouchent sur un label ou une certification. On trouve ainsi en Suisse le label « Minergie » qui a servi de référence au label français « Effinergie ». En Allemagne la référence est aujourd'hui le critère « Passivhaus », pour y prétendre une habitation doit répondre aux trois critères suivants [19] :

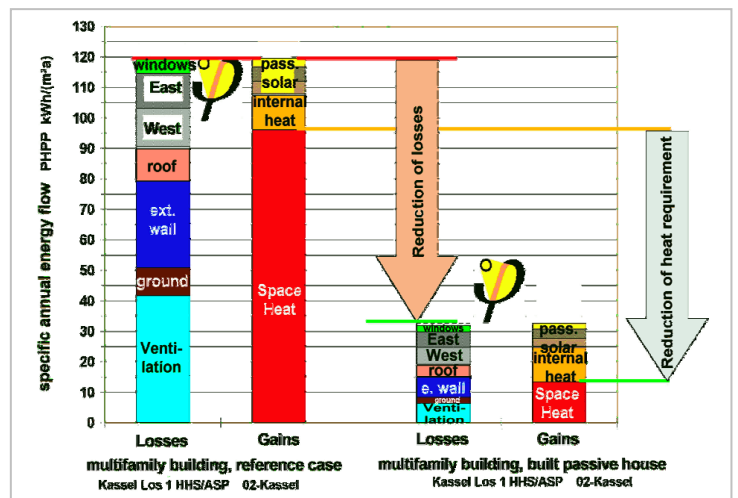


Figure 10 – Bilan énergétique d'une maison passive [20]

- besoins annuels en chauffage < 15 kWh.m²
- test de l'étanchéité de l'enveloppe (Blower Test Door) : < 0,6 V.h⁻¹
- consommation annuelle **totale** en énergie **primaire** : < 120 kWh. m²

Plusieurs milliers d'habitations de ce type existent en Allemagne ou en Autriche, le surcoût par rapport aux constructions classiques est de l'ordre de 10 à 15% qui sont largement amortis sur la durée de vie du bâti compte tenu des économies réalisées sur les différents postes. Lorsqu'un système local de conversion d'énergie est possible et que les apports sont en moyenne supérieurs aux besoins, on parle alors de bâtiment à « énergie positive » (voir l'article de J.Virgone dans ce numéro).

7. Maîtrise de la demande en électricité

7.1 Eclairage

D'énormes potentiels d'économies existent sur cet usage. Les lampes à incandescence sont les plus mauvais récepteurs électriques, leur piètre efficacité lumineuse, de l'ordre de 10 à 12 lm/W soit un rendement de l'ordre de 2 à 3%, devrait conduire à leur abandon (en principe à partir de 2010) ; ces lampes sont déjà interdites dans quelques pays étrangers (Cuba, Australie). On peut leur préférer les lampes fluocompactes (efficacité de 40 à 50 lm/W) ou mieux encore les tubes fluorescents (efficacité comprise entre 80 et 100 lm/W). Ces derniers sont surtout utilisés dans le secteur tertiaire ; l'utilisation conjointe de ballasts électroniques modulables et de capteurs (lumineux ou de présence) permet une diminution sensible de la consommation (jusqu'à 70 % dans certaines situations [21]). Dans les bâtiments neufs, on peut aussi favoriser les apports de lumière naturelle par une meilleure architecture ou en utilisant des puits de lumière.

7.2 Produits « blancs »

Il s'agit de produits électroménagers tels que les réfrigérateurs, congélateurs, cuisinières, lave-linges et lave-vaisselles. Pour les appareils de production de froid, le renforcement de l'isolation a permis une nette diminution de la consommation, ainsi les produits étiquetés classe A+ ou A++ consomment de 25 à 35 % en moins que les appareils de classe A. Concernant la cuisson domestique on trouve sur le marché, certes à des tarifs élevés, des plaques à induction dont le rendement est de l'ordre de 80% ; pour mémoire celui des plaques vitrocéramiques radiantes ou en fonte ne dépasse pas 50%. Quant aux lave-linges ou aux lave-vaisselles, il

faut savoir que la part la plus importante concerne le chauffage de l'eau. On conçoit alors l'intérêt d'utiliser les cycles à basse température ; par ailleurs un système de préchauffage de l'eau par capteurs solaires peut fournir éventuellement et sous réserves d'adaptabilité, un appoint intéressant.

7.3 Produits « bruns »

On fait référence ici aux appareils suivants : aspirateurs, téléviseurs, magnétoscopes, matériels hi-fi et informatiques. Pour les téléviseurs ou les ordinateurs, la technologie LCD est plus performante, à taille égale, que celle des écrans à tube cathodique (CRT) ; toutefois, certaines études montrent que les gains peuvent rapidement être annihilés par un besoin de confort accru (multiplicité du nombre d'appareils et/ou augmentation de la taille de la dalle).

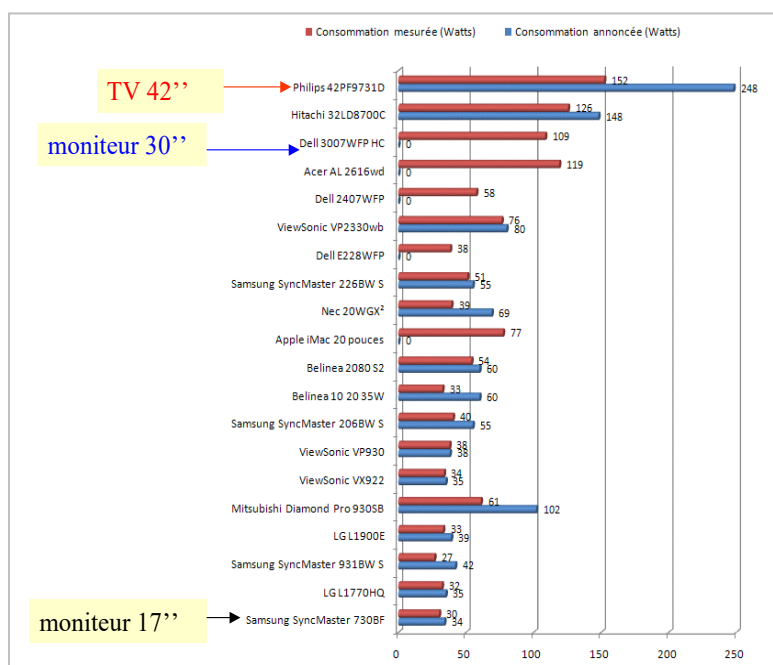


Figure 11 – Evolution de la consommation d'écrans LCD selon leur taille[22]

Pour le secteur tertiaire, les appareils de bureautique constituent (avec l'éclairage) le premier poste de consommation. Il est donc impératif d'en limiter leur consommation en programmant les mises en veille automatique lors des phases d'inactivité et de couper leur alimentation lors des arrêts prolongés. En effet, comme de nombreux appareils électroniques, ces équipements continuent à consommer même à l'état de veille. Enfin, un dernier point mérite d'être souligné, selon une étude de chercheurs américains l'analyse du cycle de vie aurait montré que l'énergie grise (fabrication et transport) imputable aux ordinateurs

personnels, est environ quatre à cinq fois plus élevée que celle consommée durant les quelques années de fonctionnement, le remplacement systématique des parcs de matériel informatique n'est donc pas toujours neutre d'un point de vue énergétique.

De façon plus générale une analyse complète du cycle de vie de nos différents biens de consommation s'avère aujourd'hui plus que nécessaire.

8. Conclusions et perspectives

Les enjeux sont connus, les objectifs en matière énergétique ont été clairement établis. Pour le secteur du bâtiment les solutions, dont nous avons ici dressé un rapide contour, devront très vite se concrétiser. L'heure n'est plus à la réflexion mais à des actions menées à grande échelle ; il n'est pas sûr que l'incitation soit le meilleur moyen d'y parvenir, une réglementation renforcée sera sans doute indispensable. Impliquer et mobiliser tous les acteurs, utilisateurs, constructeurs, architectes, maîtres d'ouvrage, décideurs sera une des clefs de la réussite. D'autre part, bien que non évoqués ici, les problèmes de financement de ces opérations ne peuvent évidemment être occultés, en clair tout ceci demandera une volonté politique accrue et pérenne.

Enfin n'oublions pas qu'en tant qu'individus nous avons une responsabilité forte et que tous nos choix devront être cohérents : construire une maison à énergie positive au beau milieu de la campagne et prendre son 4X4 pour se rendre à son lieu de travail n'est peut-être pas le meilleur exemple à suivre ! Il nous faudra donc repenser nos priorités pour inventer un nouveau mode de développement, un nouveau mode de vie.

9. Références

9.1 Bibliographie

* Energies Alternatives ouvrage collectif sous la direction de J. Bonal et P. Rossetti – Collection Ecrin – (*Omniscience*)

[1] 4^{ème} Rapport du GIEC – Résumé à l'intention des décideurs (02/2007)

[2] Jean-Marc Jancovici « Qu'est ce qu'une réserve de pétrole ? » : www.manicore.com

[3] Key World Energy Statistics 2007 - IEA

[4] Les émissions de CO2 liées à combustion de l'énergie dans le monde en 2005– *DGEMP Observatoire de l'énergie - 11/2007*

[5] World Energy Outlook 2002 –IEA

[6] The flow of energy in an Industrial Society – *Scientific American 09/1971 Earl Cook*

[7] Substances relatives à l'accroissement de l'effet de serre - mise à jour mai 2007 *CITEPA Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable*

[8] La maison du XXI^e siècle Hors-Série n°241 *Revue Science et Vie 12/2007*

[9] Rénovation à basse consommation d'énergie des logements en France – Projet Renaissance - Olivier Sidler 08/2007

[10] La comparaison de la part de chaque énergie consommée par le secteur résidentiel et tertiaire, entre 1973 et 2003. *DGEMP-Observatoire de l'énergie*.

[11] Les consommations d'énergie du secteur résidentiel et tertiaire par usage. *DGEMP-Observatoire de l'énergie*.

[12] La consommation d'électricité du secteur résidentiel et tertiaire par usage. *DGEMP-Observatoire de l'énergie*.

[13] Les vitrages au grand jour – *Revue La maison écologique* n°32 04/2006

[14] Schéma de principe du puits canadien combiné avec une ventilation mécanique contrôlée à récupération de chaleur double flux. – *Ekopédia* (http://fr.ekopedia.org/Puits_canadien)

[15] Ateliers techniques de l'ALE – P. Hollmuller 06/2007

[16] Note de cadrage ADEME-EDF 01/2005

[17] Documentation technique Wienerberger www.monomur.com

[18] Température moyenne du sol - Ekopédia (http://fr.ekopedia.org/Image:Temp%C3%A9rature_moy_sol.jpg)

[19] Certification en tant que « maison passive » www.lamaisonpassive.fr

[20] What can be a Passive House in your region with your climate? – W. Feist *Passive house Institute* www.passiv.de

[21] *Catalogue Osram 2002/2003* p.13

[22] Tube contre LCD - Pierre-Jean Alzieu, Vincent Alzieu Test mai 2007 - www.lesnumeriques.com

9.2 Sites web

Les lecteurs intéressés pourront éventuellement consulter les sites suivants :

www.citepa.org

www.cstb.fr

www.eole-fr.com

www.ideesmaison.com

www.iea.org

www.industrie.gouv.fr/energie/statisti/

www.lamaisonpassive.be

www.lamaisonpassive.fr

www.manicore.com

www.passiv.de

Consommation des utilités et entraînements industriels : gagner plus... en travaillant mieux

Arnaud BRUGIER

Lycée Clément Ader,

37bis rue Geneviève Anthonioz-De Gaulle,

91200 Athis-Mons

arno.brugier@wanadoo.fr

Résumé :

Cet article vise à décrire les principales solutions techniques de réduction de la consommation dans le domaine industriel (utilités et entraînements), à savoir l'utilisation de moteurs à haut rendement et de la variation électronique de vitesse. Il est également proposé un texte de TP en STS électrotechnique dans le cadre du thème « coût et facturation de l'énergie » des essais de systèmes.

1. Contextes européens

Dans le secteur de l'industrie, qui représente 29% de la consommation totale d'énergie de l'UE, on note une forte réduction de l'intensité énergétique dans les 10 ans précédent 2004. Sa part dans la consommation totale d'énergie n'a guère bougé à cause du développement industriel. L'intensité énergétique de l'industrie devrait encore baisser, cependant la consommation d'électricité devrait fortement augmenter. Ainsi, l'UE propose de soutenir les progrès déjà réalisés (systèmes énergétiques utilisés dans les procédés) par un cadre plus propice aux investissements (exonérations ou réductions fiscales, aides à l'investissement, instruments de financement innovants pour les petits projets...), d'inciter à respecter les valeurs maximales d'émissions de GES imposées par les plans nationaux d'allocation de quotas d'émission, d'amplifier les campagnes d'information à destination des industriels, des architectes, des producteurs d'énergie, des chauffagistes et des électriciens, de développer des instruments du marché accompagnés de mesures réglementaires pour pallier aux insuffisances actuelles, de faire la promotion des meilleures pratiques et favoriser l'échange d'informations sur les résultats des différents accords volontaires, d'augmenter ces derniers et les codes de conduite par branche pour un objectif d'efficacité énergétique, de mettre en place des programmes communautaires (Ecolabel, management environnemental...).

2. Efficacité énergétique dans les procédés d'entraînements et les utilités (mises en circulation de fluides)

Face au renforcement des exigences environnementales et au renchérissement des prix des énergies, les industriels sont donc aujourd'hui à la recherche de nouveaux gains de productivité sur les utilités et procédés industriels pour réduire ces postes de coût.

Dans l'industrie et le tertiaire, les moteurs électriques et leurs systèmes associés représentent la plus grande part de l'électricité utilisée. Les potentiels d'économie d'énergie sont importants. Ils ont été estimés à plus de 120TWh, soit 12 milliards d'euros, dans chacun de ces secteurs pour l'Europe.

Ainsi, afin de concevoir des équipements moins énergétivores, le bon sens devrait pousser le concepteur à effectuer un calcul précis du besoin de puissance (notamment à l'aide de logiciels de dimensionnement¹) et des paramètres de régulation plutôt que de les estimer selon la technique « du doigt mouillé » et obtenir une installation surdimensionnée, coûteuse à l'achat et à l'usage. Cela est d'autant plus pertinent que les solutions techniques existent, sont rentables et permettent d'obtenir un coût du kW économisé (négawatt) bien inférieur à son coût de production (surtout avec la tendance actuelle d'augmentation des prix). Cette démarche fine de conception peut être réalisée en essayant de respecter les normes d'analyse de cycle de vie (norme ISO14040) et d'éco conception (norme ISO 14062) qui aident les constructeurs à concevoir des produits réduisant l'impact environnemental sur l'ensemble du cycle de vie, y compris donc la phase d'utilisation avec le critère de consommation d'énergie.

Celui-ci est significatif pour les produits électriques et électroniques (jusqu'à 80% des impacts environnementaux et d'autant plus vrai que la durée de vie est longue (> à 15ans)²).

Il est regrettable de constater que les clients de ces équipementiers ne s'en tiennent encore qu'au seul critère du coût d'investissement et invitent donc la plupart des intégrateurs de systèmes à tirer les prix au plus bas avec des constituants de qualité et rendement médiocres. C'est tout le sens de l'exemplarité en la matière dont sont censés faire preuve à l'avenir les marchés publics en intégrant dans les cahiers des charges des critères d'efficacité énergétique et des clauses environnementales, mettant ainsi en avant les coûts environnementaux et financiers d'exploitation.

Deux technologies sont à l'origine de l'exploitation d'une grande partie du gisement d'économies d'énergie dans les domaines des entraînements et des utilités : l'utilisation de moteurs haut rendement (HR) et la variation électronique de vitesse (VEV). Un exemple de service d'efficacité énergétique mettant en œuvre ces deux technologies est donné par EdF avec son opération « motorisation performante ». La société met ainsi à la disposition des installateurs partenaires des outils contribuant à la promotion de ces techniques ainsi que des aides facilitant l'investissement pour les clients lorsque les projets de ces derniers répondent aux critères requis pour la délivrance de Certificats d'Economies d'Energie.

Mais on peut citer des technologies complémentaires comme la nature de la transmission mécanique, la « démarche mécatronique » qui optimise l'intégration et donc la consommation des entraînements³, la capacité qu'a un convertisseur électronique à renvoyer l'énergie au réseau, une meilleure surveillance et un contrôle fin du procédé grâce aux technologies de l'information ou encore la réduction du courant efficace appelé au réseau (filtrage harmonique, relèvement du $\cos\phi$).

2.1. Les moteurs haut rendement (HR)

Les moteurs électriques représentent près de 70% de l'électricité consommée dans l'industrie française (30% dans le tertiaire) et le gisement d'économie d'énergie atteindrait 10% à 35% sur les quelques 90TWh/an absorbés par ce poste selon l'ADEME.

D'autre part, le coût d'achat d'un moteur ne représente qu'une infime partie des dépenses générées pour sa mise en œuvre (cf. **figure 1**).

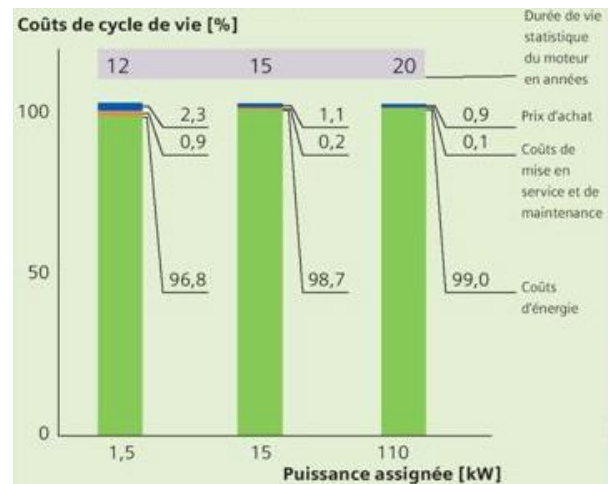


Figure 1 : Coût global en fonction de la puissance assignée et de la durée de vie du moteur pour une utilisation de 3000h/an.

Source : Siemens© A&D et Statistiques sur la durée de vie des moteurs DK1 Informationsdruck 09/99, page 10.

L'utilisation d'un moteur HR est à privilégier chaque fois que l'on a un fonctionnement quotidien prolongé, sous forte charge, avec peu de démarrages et de freinages. Il faudra bien sûr l'associer à des réducteurs performants :

- sortie coaxiale : réducteur à engrenages cylindriques et à trains parallèles ($94% < \eta < 98%$),
- sortie perpendiculaire : réducteur à renvoi d'angle à couple conique ($94% < \eta < 98%$) plutôt qu'à roue et vis sans fin ($70% < \eta < 90%$).

Malgré la fin de l'accord en 2003 entre le CEMEP⁴ et la Commission européenne visant à promouvoir le moteur standard à haut rendement, le marquage EFF est pour l'instant toujours utilisé par les constructeurs et est obligatoire en ce qui concerne les moteurs asynchrones triphasés standards suivant EN 50347 (4 pôles depuis le 01.07.2000 et 2 pôles depuis le 01.01.2001) pour usage général à dimensions et puissances normalisées (comprises entre 1,1 et 90 kW), de tension d'alimentation 400V/50 Hz.

Les moteurs spéciaux, tels que les moteurs à puissance augmentée, à plusieurs vitesses, etc., sont exclus de cette obligation de marquage.

Le CE/CEMEP a défini 3 classes de rendement (**Figure 2**) pour les moteurs 50Hz, 2 et 4 pôles et de 1,1kW à 90kW :

- "eff1" (moteurs à haut rendement),
- "eff2" (moteurs à rendement augmenté),
- "eff3"

Les rendements sont calculés suivant l'EN 60034-2.

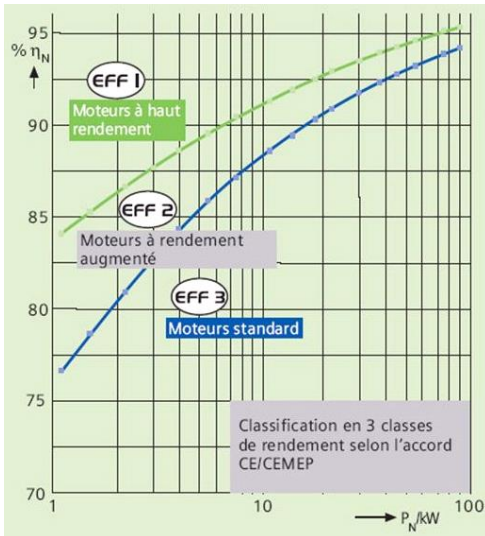


Figure 2 : classes de rendement. Source : Siemens© A&D

On observe sur la figure 2 que plus la gamme de puissance est importante et plus l'écart de rendement diminue entre 2 machines. Evidemment, plus le procédé fait tourner le moteur et plus le retour sur investissement est rapide (figure 3). Siemens affirme qu'au-delà de 2000h de fonctionnement par an, le choix d'un moteur EFF1 est systématiquement le plus économique.

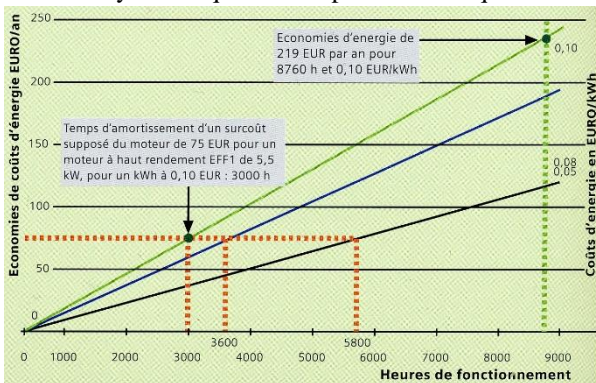


Figure 3 : temps d'amortissement en fonction des économies d'énergie et du coût de l'énergie. Source : Siemens©

2.1.1. Technologie des moteurs haut rendement

L'augmentation des rendements est obtenue par une utilisation plus importante de matières actives (Figures 4 et 5) :

- meilleure qualité des aciers et paquets de tôles plus longs afin de réduire les pertes fer,
- résistance des enroulements au stator réduite par une section plus grande des conducteurs,
- résistance des enroulements au rotor réduite par des encoches rotoriques surdimensionnées (géométrie sectionnelle),
- roulements et ventilateur optimisés
- amélioration de la qualité de fabrication, des isolements, des imprégnations...



Figure 4 : les parties actives EFF1 sont plus importantes que pour EFF2 (moteur plus long), source Siemens© A&D

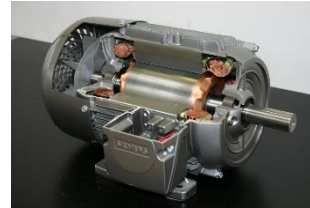


Figure 5 : innovation technologique avec le nouveau moteur « Ultra NEMA Premium » à rotor cuivre injecté sous pression (rendement plus élevé et réduction des pertes jusqu'à 10%). Volume réduit. Source Siemens© A&D. Idem chez Sew-Usocom ©

Ces moteurs à rotor cuivre sont compatibles à l'heure actuelle avec les spécificités NEMA (Amérique du nord, 60Hz) et une version européenne 50Hz est prévue pour avril 2007 chez Siemens©. Une difficulté supplémentaire à s'implanter sur le marché est apparue dernièrement avec la hausse du coût des matières premières : le cuivre est passé de 200€/kg à 700€/kg en un an. L'écart de prix à l'achat s'établit toutefois autour de 10% à 20% avec un moteur de base et est à mettre en rapport avec les 1% à 2% du coût global.

2.2. La variation électronique de vitesse (VEV)

Aujourd'hui, seulement 5% des installations sont équipées en VEV alors qu'elle permet généralement d'améliorer la productivité, la qualité, le confort d'utilisation du procédé et surtout de ne consommer que l'énergie strictement nécessaire. La VEV perce sur le marché depuis 2 à 3ans car les produits sont plus simples à utiliser (bien que plus complexes), mieux acceptés et que les économies réalisables sont devenues un énorme argument commercial.

C'est dans les applications de pompage, ventilation et compression fonctionnant en régime permanent (que ce soit dans le bâtiment, les infrastructures ou l'industrie) que son utilisation est la plus profitable en termes de maîtrise de la consommation.

Dans une moindre mesure, les entraînements où les contraintes dynamiques sont fortes (temps de décélération court, inertie forte, démarrages fréquents) comme dans les applications de levage, de manutention ou avec des machines spéciales à balourd offrent quand même un potentiel d'économie en régime transitoire car :

- en démarrage direct, les accélérations du moteur asynchrone engendrent de fortes pertes dites « rotoriques » dues au fort glissement,
- à l'inverse, lors des freinages, l'énergie cinétique emmagasinée dans la machine en mouvement est dissipée dans la plupart des cas dans une résistance.

2.2.1. Principe

Les deux principaux avantages liés à l'utilisation de la VEV sont :

- la variation de l'amplitude et de la fréquence de la tension aux bornes du moteur permet à celui-ci de fonctionner comme s'il était à chaque instant à son point de fonctionnement nominal (déplacement de la caractéristique $C=f(\Omega)$) et donc au rendement optimal.
- le contrôle à tout instant du courant et du couple moteur adapte et optimise l'énergie consommée en fonction des besoins de l'application.

Prenons l'exemple d'une application classique de pompage ou de ventilation où le moteur est directement alimenté par le réseau et tourne à sa vitesse nominale. La variation de débit est alors obtenue par un dispositif de restriction à l'aspiration (amont) ou de pertes de charges à l'évacuation (aval), voire les deux. On retrouve donc des vannes pour une pompe, des registres et des ventelles pour un ventilateur (**figures 6 et 7**). La puissance absorbée par une pompe ou un ventilateur varie comme le cube de la vitesse, la VEV va donc dégager des économies directes d'énergie par adaptation de façon optimale du comportement du moteur à celui énoncé par la charge (avec une régulation de débit et une loi de commande appropriées). Le gain se situe entre 10 et 50% de la consommation d'électricité, avec une valeur moyenne estimée à 25%.

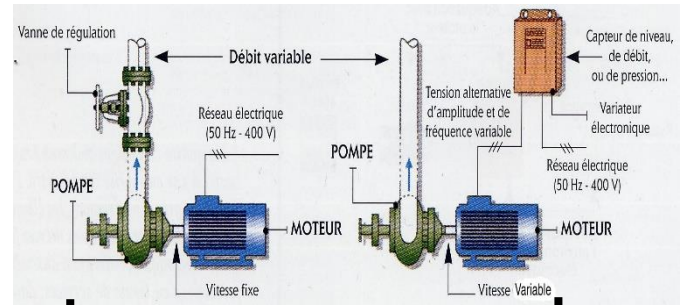


Figure 6 : schématisation des 2 principes (Source : EdF)

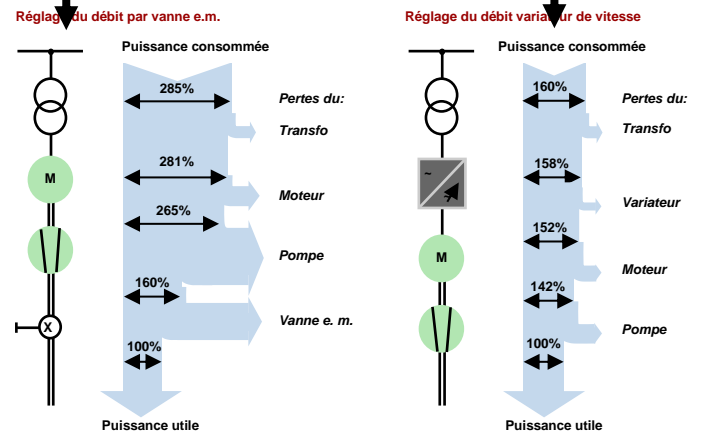


Figure 7 : schématisation des différents postes de pertes correspondants pour un entraînement à débit variable (à gauche : réglage du débit par vanne électro-mécanique / à droite : réglage du débit avec VEV). Source : Siemens© A&D

D'après les courbes expérimentales de la **figure 8**, on peut observer schématiquement que lorsque le débit est réduit par restriction, il n'y a que très peu de baisse de puissance absorbée (5% pour 20% de réduction de débit, cas des ventelles aval). Lorsque le débit est contrôlé par la variation de vitesse de rotation du moteur, la puissance absorbée chute fortement (50% dans les mêmes conditions) :

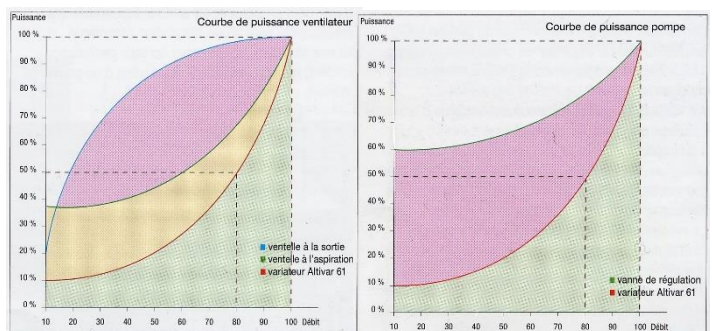


Figure 8 : courbes Schneider Electric© : sur document commercial « la vev au service des économies d'énergie dans le bâtiment, ATV21 et ATV61 »

Autre intérêt économique important, l'utilisation d'un variateur a l'avantage de présenter un cos phi unitaire et donc de réduire drastiquement la puissance réactive absorbée. Pour ce qui est de la minimisation du taux

d'harmoniques généré cela serait possible si l'étage de redressement présent en entrée du variateur était à absorption de courant sinusoïdal (redresseur MLI à transistors IGBT). Ce n'est malheureusement pas le cas sur les variateurs de série Siemens© et Schneider© et ce, pour plusieurs raisons :

- chute du rendement global à cause des pertes de commutation dans les transistors supplémentaires,
- nécessité d'ajouter une self en entrée,
- la capacité placée sur le bus continu est beaucoup plus stressée car elle doit gérer les signaux HF en même temps que le signal haute tension servant à ne pas perdre le contrôle du pont lors d'une phase de réversibilité,
- il y a deux fois plus de rayonnement et de courant de fuite à la terre ce qui nécessite de sur dimensionner le filtre CEM,
- l'optimisation du fonctionnement de l'ensemble est plus complexe.

Le coût pour atteindre un taux de distorsion de 4% devient donc prohibitif. Schneider Electric© préfère se concentrer sur les gros pollueurs en installant un filtre LC pour l'ensemble de l'installation et atteindre ainsi un taux de distorsion de l'ordre de 5%.

Cela ne veut pas pour autant dire que toute solution de réversibilité totale en puissance est écartée et que l'on doit ainsi se priver de renvoyer de l'énergie au réseau afin d'améliorer d'autant le bilan énergétique de l'installation. Les deux constructeurs proposent tout simplement un module supplémentaire (onduleur de freinage à thyristors ou IGBT + transformateur) placé en parallèle du pont redresseur et qui est principalement utilisé avec des applications spécifiques et de forte puissance : entraînement de bancs d'essais, de presses, de grues, d'engins de levage et de transport, de centrifugeuses et de machines avec moment d'inertie élevé.

En plus des réductions de puissance active et de puissance réactive absorbées, l'utilisation d'une VEV :

- simplifie le système de canalisation par suppression d'éléments superflus, comme la vanne de *by-pass* ou le dispositif d'étranglement (vannage), en pompage
- simplifie la chaîne de transmission mécanique par suppression de certains étages réducteurs ce qui permet aussi d'augmenter le rendement de l'ensemble et de réduire le niveau de bruit. Notons que le bruit peut aussi être réduit par augmentation de la fréquence de découpage du pont onduleur.

- améliore la fiabilité (taux de disponibilité proche de 100%) et la qualité (régulation à 1% près, voire mieux) des procédés,
- réduit la sollicitation du réseau d'alimentation électrique car le variateur électronique ne génère pas d'appel de courant trop important au démarrage et va même jusqu'à compenser certains défauts du réseau. La suppression des pointes au démarrage évite l'usure prématurée des câbles et des moteurs ainsi que l'utilisation de protections surdimensionnées et l'exploitation de procédés de production moins polluants aux heures pleines,
- optimise l'intégration des fonctions afin de répondre à des applications complexes (câblage réduit, économie d'un automate de régulation)
- réduit les à-coups sur les accouplements, les conduites (coup de bélier) ou les réducteurs au démarrage ce qui signifie une augmentation de la durée de vie de l'équipement.
- réduit les frais d'entretien (tous les autres systèmes de régulation du débit réclament une maintenance spécifique),
- permet de dépasser la vitesse nominale afin d'augmenter la capacité de production si la pompe le permet,
- permet sur une installation à concevoir de réduire le surdimensionnement des turbomachines (donc leur coût d'investissement), ainsi que le diamètre des câbles (surintensité de démarrage), de limiter le volume des réservoirs et bacs tampons ainsi que les équipements anti-coups de bélier en pompage, de choisir le rapport diamètre d'aspiration sur diamètre de la roue conduisant au meilleur rendement, ...etc.

Tous ces gains secondaires ne sont pas facilement chiffrables, mais existent bel et bien⁵.

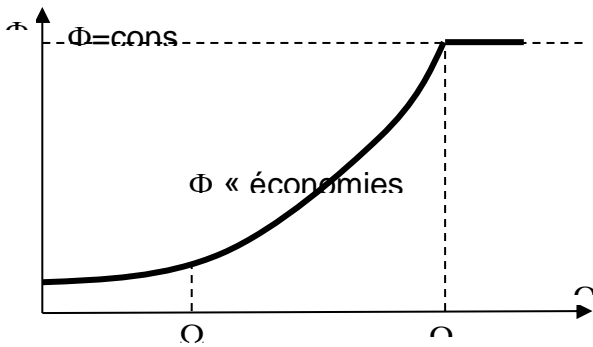
On notera tout de même quelques désagréments liés à l'utilisation de cet équipement d'électronique de puissance en l'apparition de perturbations rayonnées et conduites qu'il sera nécessaire de réduire, voire d'éliminer avec les remèdes adéquats.

Précisons ici que pour les applications de pompage ou de ventilation (couple quadratique) qui travaillent toujours au même point de fonctionnement (sans débit variable) un démarreur progressif peut tout de même être mis en œuvre et procurer à l'utilisateur quelques uns des avantages énoncés plus haut.

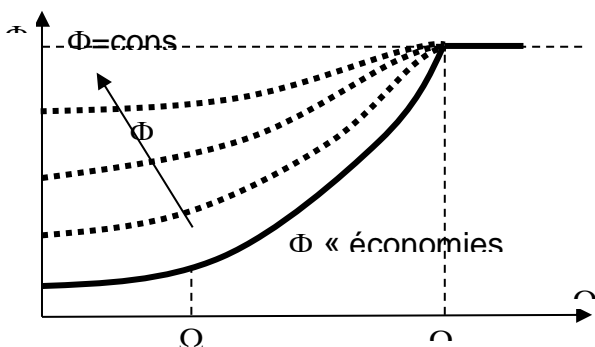
2.2.2. Lois de commande dites à « économies d'énergie » :

On retrouve chez la plupart des constructeurs des lois de commande ou des modes de fonctionnement permettant d'optimiser les performances de la VEV sur charges quadratiques (de 5% à 10% selon Schneider Electric©) : loi dites « couples variables ».

En U/f=constant : loi de commande basique pour ce type de charge. Le flux généré est nominal quelle que soit la vitesse du moteur, donc quelle que soit la charge (évolution du flux quadratique pour un couple résistant quadratique). Le rapport U/f n'est plus constant et le variateur défluxe en faisant chuter la tension d'alimentation. De façon à simplifier au maximum la loi, il n'y a pas de régulateur de flux. On a donc une seule caractéristique de flux (non adaptatif à la charge) :



En vectoriel de flux : la commande en contrôle vectoriel de flux ajuste en permanence le courant magnétisant (I_d , courant réactif) à la charge (caractéristique de couple de type quadratique ou constant) pour diminuer la consommation, ce qui se traduit par plusieurs courbes paramétrées en Φ . Le défluxage est réalisé par une chute de la tension d'alimentation, de façon adaptative. Indépendamment, le variateur peut contrôler I_q (courant actif) pour maintenir le couple nécessaire sur l'arbre :



Dans ce dernier cas un problème se pose pour les régulations rapides. En effet, ces régulations de flux ou de débit-pression peuvent « pomper » et entrer en résonance à cause de la recherche de précision inhérente

à l'« adaptabilité ». Cette situation peut même engendrer une surconsommation de courant. Toutefois, dans la mesure où les dynamiques demandées ne sont pas importantes (rampes de l'ordre de 30s, 1mn ou plus), il est tout à fait envisageable d'utiliser la loi d'économie d'énergie en version vectorielle de flux. Dans le doute, il est préférable de débiter par un essai en U/f=constant et si tout va bien tenter un passage en mode vectoriel de flux. Sinon, mieux vaut configurer le variateur en mode vectoriel de flux mais pour couple constant.

Une autre technique de maîtrise de la consommation utilisée par les constructeurs est la mise en sommeil/réveil des régulateurs de vitesse PID intégrés (cf. **Figure 9**). Cette fonction avancée permet de tester la régulation avant de se mettre en sommeil même si la vitesse atteinte n'est pas la vitesse minimale.⁶

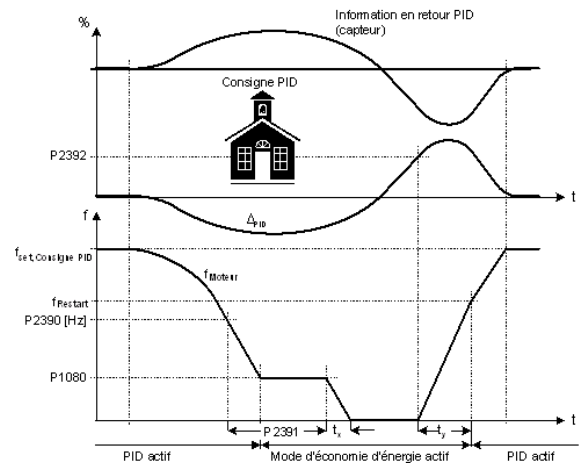


Figure 9 : mode économies d'énergie (mise hors énergie du variateur). Source : Siemens© A&D.

Ces deux dernières techniques permettant d'améliorer l'efficacité énergétique du procédé de 5% à 10% selon Schneider Electric© par rapport à l'utilisation de la loi U/f=constant basique.

2.2.3. Exemples de produits :

- Chez Schneider Electric© : les variateurs Altivar 21© (0,75kW à 30kW) et Altivar 61© (0,75kW à 630kW) sont des produits éco-conçus, (88% des pièces sont recyclables) respectant les directives RoHS et WEEE, atténuant les nuisances sonores (bruit aérolite, coup de bélier) équipés de fonctions de communication, de régulation, de lois d'économie d'énergie, de filtres et spécialement dédiés aux applications de pompage centrifuge, de ventilation et de compression rotative. Le variateur Altivar 31©, plus généraliste, est également doté de lois de commande à économie d'énergie.

- Chez Siemens® : le variateur de fréquence Sinamics®G120 est un produit éco-conçu, respectant les directives RoHS et WEEE, atténuant les nuisances sonores, équipé de fonctions de communication, d'automatisme, de régulation, de lois d'économie d'énergie et capable de réinjection de courant sur le réseau avec un module de puissance PM250 (AV : aucune self n'est nécessaire, plus de hacheur de freinage, le refroidissement de l'armoire devient superflu, les sections de raccordement sont réduites. En comparaison à des variateurs communs, pour un même courant de sortie, Siemens® une réduction d'environ 20% du courant absorbé).

2.2.4. Exemples de logiciels constructeurs permettant de chiffrer les performances

- **ECO8™** (Schneider Electric®) : est une application gratuite et téléchargeable (figure 19) qui, en fonction de l'application, des caractéristiques du moteur (en parties fournies selon la puissance choisie), du cycle de fonctionnement et du prix du kWh fournit un bilan comparatif des consommations avec et sans VEV (y compris énergie réactive), le montant des économies réalisées et le temps de retour sur investissement. Simple d'emploi.

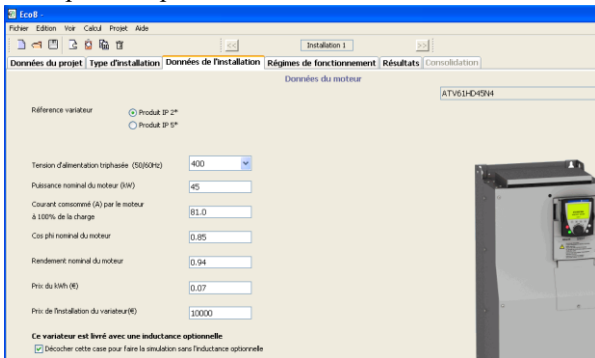
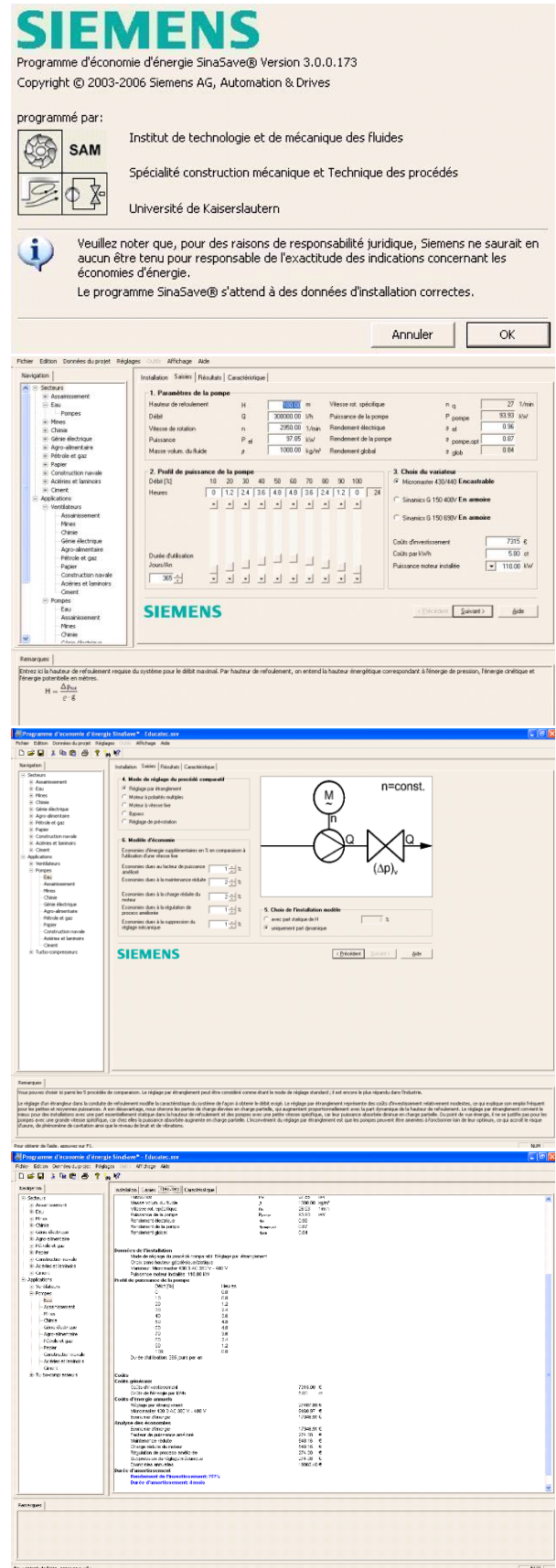


Figure 19 : exemple de page de paramétrage du moteur choisi. Logiciel ECO8™ de Schneider Electric®

- **SINASAVE™** (Siemens®) : est une application (figure 20) gratuite est téléchargeable permettant de saisir précisément le type et les caractéristiques de l'application et son régime de fonctionnement de manière à calculer les économies d'énergie réalisées et le temps d'amortissement des surcoûts. Il permet ainsi de savoir à partir de quand l'investissement dans une des technologies présentées plus haut est intéressant. De plus, une aide permet de comprendre les relations physiques et les données prises en compte dans les calculs. Ce logiciel nécessite plus de paramètres que le précédent et peut prendre en compte les caractéristiques de matériels autres que ceux du constructeur.



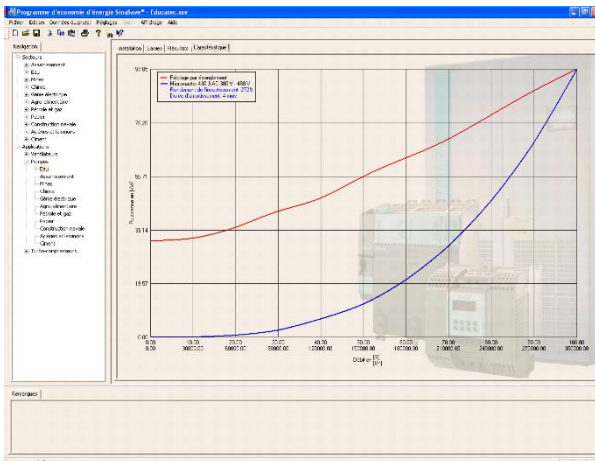


Figure 20 : écrans du logiciel SINASAVE™ de

Siemens©relatifs à une application de pompage : page d'accueil, pages de saisie des informations sur la structure et le fonctionnement de l'application, page de visualisation des résultats et page de comparaison des caractéristiques de puissance (étranglement / VEV).

Nota : la plupart des éléments techniques présentés dans cet article ont été glanés lors de stages CERPET (Schneider Electric©) et lors d'une journée d'information (Siemens©) dédiée aux économies d'énergies et organisée par l'inspection d'académie de Versailles.

3. Des pistes d'exploitation pédagogique

3.1. L'efficacité énergétique dans le référentiel de formation en STS électrotechnique

La lecture des « repères pour la formation » laisse clairement transparaître la transversalité de la notion d'efficacité énergétique. Ainsi, dès le chapitre consacré aux « Evolutions du BTS électrotechnique », on note :

« ...comme l'énergie électrique s'accumule difficilement et que son coût est élevé, sa gestion est devenue une préoccupation constante pour assurer la sûreté de fonctionnement et l'efficacité énergétique des systèmes mis en œuvre. »

« ...le technicien supérieur est également amené à développer de nouvelles compétences prenant en compte l'impact de ces équipements sur l'environnement. »

Dans celui présentant « Les orientations pédagogiques et l'organisation des enseignements », on relève :

« L'étude complète de l'application nécessite une modélisation fonctionnelle dont la frontière choisie délimite les constituants et où, par exemple, la notion d'efficacité énergétique est dépendante du bilan de l'ensemble des consommateurs d'énergie concernés.

La valeur ajoutée de l'application est telle qu'elle satisfait le client dans des conditions économiques fixées en garantissant le niveau de sûreté requis et en s'attachant à limiter les impacts sur l'environnement. A cet égard, le durcissement des normes environnementales débouche sur la production d'une « signature » caractéristique de la qualité environnementale et sur le mesurage des grandeurs physiques qui s'y attachent »

En ce qui concerne le projet : *« Dans tous les cas le CdC est réputé extérieur à l'établissement et la conception prend en compte les attendus de l'écoconception ».*

Les « Essais de systèmes » se trouvent être le lieu privilégié de cette approche : *« ... L'efficacité énergétique sera une préoccupation constante dans l'évaluation des performances globales des systèmes... Parmi les supports de la formation, on s'efforcera d'analyser les constituants issus d'une démarche d'écoconception ».*

Enfin dans le chapitre consacré à la « Construction des structures matérielles appliquées à l'électrotechnique » il est indiqué que *« La démarche d'éco-conception est au cœur de cette analyse fonctionnelle et structurelle des machines, procédés et systèmes ... »* et que *« ...on apportera une attention particulière à l'efficacité énergétique. Celle-ci consiste à réduire les consommations d'énergie, à diminuer les coûts écologiques, économiques et sociaux liés à la production et à la consommation d'énergie à service rendu égal ».*

Il apparaît donc clairement qu'il va s'agir pour les enseignants de caractériser les procédés et les solutions techniques présentées dans les cours et les TP sous l'angle de l'efficacité énergétique et en faire un critère majeur de choix pour l'étudiant. De nombreux systèmes déjà présents dans les laboratoires de génie électrique (entraînement, pompage, ventilation...) pourront illustrer les enseignements de ce point de vue. Il n'est pas nécessaire d'acquérir un système d'étude spécifique.

Par contre, si l'objet d'un projet consiste, entre autres, à améliorer l'efficacité énergétique d'un procédé il peut être intéressant de remplacer certains constituants (au bénéfice de moteurs EFF1, d'une VEV avec ou sans réversibilité, d'un réducteur performant...), ou d'en ajouter d'autres (compensation de réactif, filtrage...) après une phase d'étude technico-économique approfondie. Contrairement à d'autres fournisseurs, la société « ERM - automatismes industriels⁷ » propose un conseil dans le domaine et peut fournir les seuls constituants nécessaires sous forme de « kits ».

3.2. Quelques ressources

De nombreuses études de cas industriels sont mis à disposition sur les sites internet de l'ADEME (voir aussi les antennes régionales), de quelques constructeurs et SSEE (Schneider Electric®, Siemens®) et de producteurs d'énergie (EdF).

On peut aussi se référer à des sujets de concours ou d'examens qui traitent d'efficacité énergétique :

- agrégation interne de génie électrique 2006, option B, épreuve prenant appui sur un système industriel (château d'eau),
- étude d'avant-projet du BTS électrotechnique 2007.

3.3. Un exemple de TP en Essais de Systèmes⁸

Nous nous proposons ici de présenter un texte de TP relatif au thème n°8 « gestion des coûts – facturation » et qui s'appuie sur un système de ventilation « maison » présent au laboratoire de STS. Il s'agit d'une proposition qui sera testée au cours de cette année avec les étudiants. Précisons toutefois que les mesures préparatoires sont édifiantes quant aux économies d'énergie réalisées (VEV).

Ce TP, d'une durée de 6h, se déroule à la rentrée de septembre de deuxième année, en parallèle avec le thème « qualité de l'énergie ». Les étudiants ont acquis en première année une certaine autonomie dans la conduite des activités et l'utilisation des matériels, notamment de mesure. L'objectif est de montrer en quoi l'utilisation d'un moteur HR et d'une VEV en lieu et place d'un moteur standard, d'un démarrage direct et d'un registre permet de diminuer la consommation du système, de rentabiliser rapidement les investissements et, au total, de réaliser des gains de productivité tout en réduisant l'empreinte environnementale de l'activité. Un TP jumeau pourra être mis en œuvre l'an prochain avec l'arrivée dans la section d'une station de pompage. La boucle de régulation de débit devrait être plus facilement mise en œuvre étant donnée l'instrumentation du système.

Le second TP de ce thème (non présenté ici) s'appuie sur les résultats du pré diagnostic énergétique mené au lycée par un ingénieur thermicien (accompagné de quelques étudiants) pour le compte de l'ARENE⁹ et dans le cadre de la « semaine de l'énergie 2007 » à laquelle nous avons participé avec 3 autres lycées de la région Ile-de-France. Les étudiants sont amenés ici à proposer des solutions d'amélioration technique et financière (travail sur la tarification) et utilisent pour cela des feuilles de calcul pour les simulations financières et des bases de données techniques pour les solutions.



SEANCE D'ESSAIS de SYSTEMES – SERIE n°8
THEME : facturation de l'énergie
FAMILLE de SYSTEMES : procédés industriels

Installation de ventilation (photo) :



PROBLEMATIQUE :

La motorisation représente 70% de la consommation électrique dans le secteur de l'industrie et 15% de cette consommation est imputable aux procédés de ventilation (9,1TWh). La plupart du temps le réglage du débit d'air se fait en créant des pertes dans le circuit. Des solutions permettant de régler ce débit tout en consommant moins commencent à trouver un écho favorable auprès des exploitants (5% actuellement).

L'étude consiste à :

- « analyser le principe de différentes technologies de réglage du débit
- « estimer les gains énergétiques, financiers et environnementaux pouvant être obtenus par utilisation de VEV et de moteurs HR.

CONDITIONS de DEROULEMENT de l'ESSAI :

Phases de l'essai	Objectifs	Activités
1 Analyse des enjeux qui contraignent le procédé	Analyser les contraintes liées à la ventilation industrielle et définir des pistes d'amélioration.	Lecture et analyse
2 Comportement avec un registre pour une charge variable	Définir le comportement énergétique avec variation de débit par pertes de charge	Analyse, essais et calculs
3 Comportement avec un VEV pour une charge variable	Définir le comportement énergétique avec variation de débit par VEV	Analyse, essais et calculs
4 Optimisation avec VEV de la commande pour une charge variable	Définir le comportement énergétique avec variation optimisée de débit par VEV	Analyse, essais et calculs
5 Validation des gains énergétiques et financiers (VEV)	Valider les gains obtenus dans l'installation industrielle	Simulation et analyse
6 Validation des gains énergétiques et financiers (Moteur EFF)	Estimer les gains restant à obtenir dans l'installation industrielle	Simulation et analyse
7 Synthèse	Estimer les gains totaux	Calculs et conclusions

RESSOURCES DOCUMENTAIRES :

guide technique « Motor Challenge » des solutions pour optimiser les procédés / Etude de marché www.isi.fhg.de / dossier technique du variateur de vitesse « Altivar » au format informatique ou papier / annexes / documents réponses.

RESSOURCES LOGICIELLES :

logiciel « Ventil'Action » disponible sur le site de l'ADEME (www.ademe.fr) / tableur / logiciel ECO8™ / logiciel SINASAVE™ /

RESSOURCES MATERIELLES :

motoventilateur hélicoïdal à entraînement direct de puissance nominale 750W / gaines de diamètres variables / registre réglable / démarreur direct / variateur électronique de vitesse « Altivar » /

RESSOURCES MATERIELLES pour les MESURES :

un multimètre/avalmètre Nanovip® et sa notice de mise en œuvre ou un analyseur de puissance / un oscilloscope portable Scopix / un anémomètre /

CONSIGNES PARTICULIERES :

Les interventions sur l'installation seront évaluées dans le cadre de la validation des tâches d'habilitation électrique

MM. Brugier et Biop TP_ecc_nj_ventilation.doc Durée: 6h Page 1 / 8

Exemple de maîtrise de la consommation énergétique dans le domaine de la ventilation : le site TEMIC SEMICONDUCTORS de Nantes (MHS S.A.) comporte 12 centrales de traitement d'air (CTA) destinées à ventiler les salles blanches alimentaires en air dépoussiéré où sont fabriqués des composants électroniques. Les installations fonctionnent 24 heures sur 24, 365 jours par an, à flux tendu, avec des arrêts programmés exceptionnels pour effectuer la maintenance des circuits. Les 12 CTA ont un débit unitaire nominal de 125 000 m3/h mais le débit d'air distribué dans les zones varie de 75 000 à 120 000 m3/h selon les besoins, la régulation du débit de chaque centrale s'effectuant par des registres provoquant des pertes de charge variables. Le département « entretien - travaux neufs » a alors effectué une série d'études suivant des approches différentes de ce poste de dépense et toutes les analyses ont convergé vers la solution de la variation électronique de vitesse des moto-ventilateurs de 20 ans d'âge. Les calculs ont ensuite été confirmés par une simulation sur le logiciel ECO8™ qui laissait présager un temps de retour sur investissement inférieur à l'année. Les résultats enregistrés en 2000 ne concernent que les trois première CTA équipées de VEV de marque Schneider Electric®. La puissance consommée par les moteurs est passée de 230 à 103 kW et ce gain de 127 kW a effectivement entraîné un temps de retour inférieur à un an. (Article publié dans le supplément technique d'ENERGIE PLUS n°284 du 15 avril 2002 © ATEE - ENERGIE PLUS - Tous droits réservés)

1 Analyse des enjeux qui contraignent le procédé

1.1 Indiquer quel paramètre physique il convient de maîtriser dans l'installation industrielle de ventilation décrite plus haut et comment son contrôle était réalisé jusqu'alors (cf. ANNEXE 1 pour plus d'information sur cette technologie).

1.2 Vérifier sur l'ANNEXE 2 que le ventilateur hélicoïdal est bien adapté à cette application et donner la plage de variation du débit que permet l'utilisation de registres.

1.2 A partir de la description faite plus haut, et à l'aide :

- du logiciel « Ventil'Action » disponible sur le site de l'ADEME ([ww.ademe.fr](http://www.ademe.fr)),
- du « guide technique Motor Challenge des solutions pour optimiser les procédés »,

indiquer les raisons possibles de la mauvaise efficacité énergétique de cette installation (avant amélioration) et donner des pistes de progrès.

1.3 Parcourir les conclusions d'une étude de marché effectuée afin de déterminer le potentiel d'amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes de ventilation dans l'industrie et le tertiaire en Europe (www.isi.fhg.de). Noter les principales.

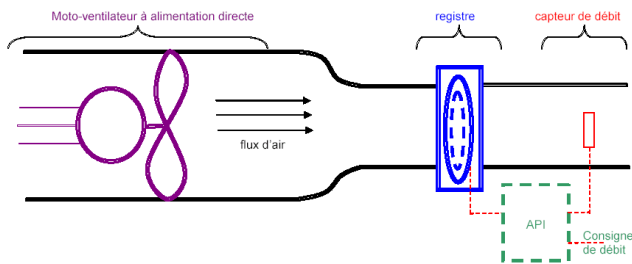
2 Comportement avec un registre pour une charge variable

L'étude du comportement d'une centrale de traitement d'air sera réalisé au laboratoire, pour une puissance plus faible, en mettant en œuvre les constituants suivants :

- moto-ventilateur hélicoïdal de puissance nominale 750W à entraînement direct,
- gaines de diamètres variables,
- registre et démarreur direct
- ou variateur électronique de vitesse (VEV).

Synoptique de l'installation (avec registre aval) :

La fermeture du registre provoque des pertes de charge et le trop plein d'énergie est dissipé sous forme de chaleur. On consomme donc de l'énergie afin de créer un débit que l'on vient réduire ensuite dans la portion de circuit plus étroite !
La manipulation du registre peut être commandée soit manuellement par un technicien soit par l'intermédiaire d'un API qui compare l'information de débit issue du capteur avec celle issue de la consigne et agit en conséquence (régulation de débit).

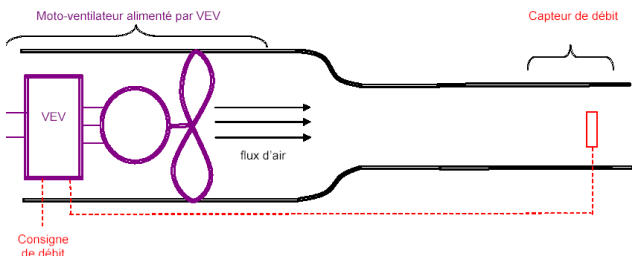


- 2.1 indiquer pourquoi, selon vous, le système de registre aval est le plus répandu malgré l'incongruité du procédé.
- 2.2 rappeler la relation (cf. série de TP n°3, thème « caractérisation des charges mécaniques ») entre la vitesse de rotation du ventilateur et le débit d'air.
- 2.3 rappeler (cf. série de TP n°3, thème « caractérisation des charges mécaniques ») l'évolution du couple résistant en fonction de la vitesse pour une application de déplacement de fluides (air, eau...). Dessiner la caractéristique $C=f(\Omega)$ sur votre copie.
- 2.4 connecter le moteur à l'armoire de distribution (démarrage direct) et installer un analyseur de puissance dans le circuit d'alimentation. Puis commander l'alimentation du moteur et relever, en régime permanent de fonctionnement, sur le D.R. n°1 :
 - les puissances absorbées pour le point de fonctionnement nominal (débit maximal, registre ouvert)
 - les puissances absorbées pour d'autres débits réglés mécaniquement à l'aide du registre. L'anémomètre placé en aval du registre vous fournira une indication relative au débit.
 - observer les formes d'ondes courant et tension en amont du variateur.
- 2.5 tracer la caractéristique expérimentale $P_{abs}=f(\text{débit})$. Valider le comportement observé à l'aide de l'ANNEXE 1. Conclure sur l'influence de la charge sur la consommation du système, notamment dans la plage de variation du débit comprise entre 60% et 100%.
- 2.6 toujours à l'aide de l'ANNEXE 1, justifier pourquoi il serait préférable de placer des ventelles en amont du ventilateur pour cette même plage.
- 2.7 à partir de la réponse 2.3, indiquer quelle doit être l'évolution de la caractéristique théorique $P=f(\text{débit})$. Comment expliquer une telle différence avec la courbe expérimentale ?

3 Comportement avec un VEV pour une charge variable

Synoptique de l'installation (avec VEV) :

La variation de débit est cette fois-ci obtenue par variation de la vitesse de rotation du moteur. Le VEV va ainsi contrôler cette vitesse à partir de la consigne et de l'information reçue de débit réel en provenance du capteur. L'API n'est plus indispensable pour assurer la commande.



- 3.1 connecter le moteur à l'armoire de distribution (VEV) et installer un analyseur de puissance dans le circuit. Mettre sous tension le variateur et, à l'aide de sa documentation, régler les paramètres suivants :
 - accélération : 30s
 - décélération : 30s
 - fréquence maximale : 50Hz
 - fréquence minimale : 0Hz
 - entrée analogique de tension validée pour consigne de vitesse par potentiomètre
 - courant de protection thermique : In
 - loi de commande : Uf constant, couple quadratique

3.2 commander l'alimentation du moteur et relever, en régime permanent de fonctionnement, sur le D.R. n°2 :

- les puissances absorbées pour le point de fonctionnement nominal (débit maximal)
- les puissances absorbées pour d'autres débits réglés par variation de vitesse du moteur. L'anémomètre placé en aval du registre vous fournira une indication relative au débit. Se caler sur les mêmes valeurs que précédemment.
- observer les formes d'ondes courant et tension en amont du variateur.

3.3 tracer la caractéristique expérimentale $P_{abs}=f(\text{débit})$.

Vérifier alors que le couple résistant opposé par cette charge mécanique est bien quadratique (on sait que $P=C.\Omega$ et que $C=k.\Omega^2$).

3.4 comparer les courbes issues des D.R. n°1 et n°2 et indiquer dans quel cas le système a fourni la juste puissance. Etant donné que sur le site de Nantes, le débit nominal relatif (100%) n'est jamais atteint et que la variation de débit relatif évolue de 60% à 96%, indiquer à partir de vos relevés (D.R. n°1 et D.R. n°2) quels sont les gains de puissance consommée obtenus pour ces deux valeurs extrêmes ?

3.5 citer d'autres avantages liés à l'utilisation d'un VEV dans cette application (point de vue électrique). Citer également des inconvénients.

4 Optimisation de la commande pour une charge variable (VEV)

4.1 réitérer l'étude précédente (3.1, 3.2, 3.3) mais en configurant le variateur de vitesse avec une loi de commande du type « contrôle vectoriel de flux » pour couple quadratique.

4.2 quantifier les économies d'énergie supplémentaires obtenues par cette optimisation.

5 Validation des gains énergétiques et financiers (VEV)

5.1 à l'aide du logiciel ECO8™, estimer les gains énergétiques et financiers totaux réalisés par le remplacement du registre aval et ce, dans les conditions d'utilisation données dans l'ANNEXE 3. Valider ces résultats à partir de la description de l'installation donnée plus haut. Imprimer le rapport.

5.2 citer d'autres postes d'économies réalisées indirectement par l'utilisation d'un VEV et qui n'ont pas été pris en compte dans la simulation.

6 Validation des gains énergétiques et financiers (MOTEUR EFF)

6.1 déterminer par lecture de la plaque du moteur sa classe de rendement (cf. ANNEXE 4). Indiquer la signification de cette partition des classes de rendement.

On considérera par la suite que les moteurs utilisés dans l'installation nantaise sont de même classe et qu'après 20 ans de service l'exploitant souhaite les changer.

6.2 à l'aide du logiciel SINASAVE™, estimer les gains énergétiques et financiers totaux réalisés par la mise en place de moteurs de classe EFF1 et ce, dans les conditions d'utilisation données dans l'ANNEXE 3. Imprimer le rapport.

Remarque : l'utilisation de SINASAVE™ implique un plus grand nombre de paramètres à configurer. L'assistance du professeur de génie électrique est souhaitable afin de construire correctement la démarche de simulation.

6.3 comparer les économies alors réalisées à celles obtenues par l'utilisation d'un VEV.

7 Synthèse

7.1 à l'aide du logiciel SINASAVE™, estimer les gains énergétiques et financiers totaux réalisés par la mise en place de moteurs de classe EFF1 et de VEV et ce, dans les conditions d'utilisation données dans l'ANNEXE 3. Imprimer le rapport incluant la page de comparaison des caractéristiques entre réglage par registre et réglage par VEV.

7.2 estimer, à partir des informations que vous trouverez sur le la répartition de l'origine des sources d'énergie utilisées pour produire de l'électricité en France, la quantité de GES que l'utilisation de ces 2 technologies ont pu éviter d'émettre et ce, sur un an.

7.3 conclure sur l'utilisation simultanée de ces solutions technologiques dans les applications de ventilation, pompage, compression d'air et même d'entraînement en milieu industriel.

4. Références

⁶ Pour plus d'informations sur cette technique :

Chez Siemens® : voir le fichier *MM440_Energy saving_e_en.pdf*. Voir aussi le manuel du MM430 et l'aide en ligne du logiciel *Starter™* de paramétrage des variateurs.

Chez Schneider Electric® : voir le guide de programmation de l'ATV61 p145 à 151 à l'adresse http://www.telemecanique.com/fr/library/index_doc_technique.htm (sélectionner « commande de mouvement », puis « Altivar 61 »).

⁷ ERM : www.erm-automatismes.com.

⁸ Le texte intégral du TP avec les documents réponses et les annexes peut-être fourni sur simple demande par courriel.

⁹ ARENE : agence régionale de l'environnement et des nouvelles énergies (Ile-de-France).

¹ On peut notamment citer Sizer™ de Siemens© en téléchargement gratuit et le logiciel de Sew-Usocom© (voir référence n° 27).

² L'écoconception de produits électriques et électroniques : enjeux, outils et exemples. Lynda Lescuyer et Marc Janin, CODDE. La revue 3EI, décembre 2005.

³ Brochure « Economiser l'énergie électrique dans les processus d'entraînement industriels », SEW-USOCOME©.

⁴ CEMEP = Comité Européen de Fabricants de Machines Tournautes et d'Electronique de Puissance Associée.

⁵ Pompes, ventilateurs - Bénéfices et coûts de la variation électronique de vitesse (VEV) - Economies d'énergie. Publié le 15 avril 2002 dans "Energie plus".

Dimensionnement et contrôle des systèmes multi-énergies pour les bâtiments à haute performance énergétique¹

Joseph VIRGONE ^{a,b}, Enrico FABRIZIO ^{c,d}, Yoann RAFFENEL ^{c,e}, Éric BLANCO ^e, Gérard THOMAS ^e

^a Université Lyon 1, Domaine scientifique de la Doua, 43 Bd du 11 nov., 69622 Villeurbanne, Cedex, France

^b LASH/DGCB, ENTPE, URA CNRS 1652, rue Maurice Audin, 69518 Vaulx-en-Velin, France

^c CETHIL, Centre de Thermique de Lyon, UMR 5008, INSA Lyon, UCBL, Domaine scientifique de la Doua, Bât. Freyssinet, 40 rue des arts, 69100 Villeurbanne, France

^d DENER, Dipartimento di Energetica, Politecnico di Torino, 24, corso Duca degli Abruzzi, I - 10129 Turin, Italie

^e AMPERE, UMR 5005, Ecole Centrale de Lyon, 36 avenue Guy de Collongue, 69131 Ecully Cedex, France

Résumé : On entend parler de plus en plus de bâtiments à énergie positive, c'est-à-dire qu'ils produisent plus d'énergie qu'ils n'en consomment. Pour arriver à ce résultat, les sources d'énergie renouvelable sont, et seront de plus en plus, amenées à cohabiter avec les sources d'énergie habituelles sur un même site ; cependant, elles ne font pas encore l'objet d'une réelle stratégie de gestion énergétique globale : il est en effet nécessaire de comprendre comment on peut obtenir le meilleur couplage entre demande et offre d'énergie, soit à l'échelle de bâtiment soit à l'échelle de quartier, et définir les règles expertes et les solutions les plus efficaces du point de vue énergétique, les plus rentables du point de vue économique ou les deux.

Du point de vue méthodologique, le travail engagé par plusieurs laboratoires est d'approfondir les techniques de couplage entre bâtiment, caractérisé par les profils de besoins (électrique, thermique et frigorifique) en puissance et en énergie, et système de production de l'énergie, caractérisé par des profils de production. Ce couplage doit pouvoir se caractériser par un indice permettant de juger l'efficacité du couplage.

L'objectif est alors de deux types : sur une installation existante, comment trouver des solutions de commande des systèmes pour réduire au mieux les consommations d'énergie en privilégiant les énergies renouvelables ; l'autre façon d'utiliser ce travail consiste à proposer un outil de conception d'un ensemble bâtiment-systèmes pour définir les conditions les meilleures du couplage entre demande et offre d'énergie et proposer un ensemble adapté de sources d'énergies et les caractéristiques des systèmes utilisant ces sources.

Mots clés : Energie renouvelable, Habitat Multi-sources, Commande, Modélisation, Optimisation, Intelligence Artificielle

¹ Cet article est une reprise, en grande partie, de l'article : Commande des systèmes multi-énergies pour les bâtiments à haute performance énergétique

Joseph VIRGONE, Enrico FABRIZIO, Yoann RAFFENEL, Éric BLANCO, Gérard THOMAS, présentés à la Journée thématique SFT - IBPSA, Chambéry, mars 2006

1. INTRODUCTION

Les acteurs de la construction figurent parmi les plus grands responsables de la dégradation de l'environnement et de la production de gaz à effet de serre.

La situation actuelle requiert un changement radical de nos habitudes, modes de concevoir et de construire. Il s'agit bien d'une révolution culturelle qu'il faut enclencher de toute urgence, révolution à l'image de la révolution industrielle dont on connaît l'ampleur et les bouleversements qu'elle a engendrés, mais aussi les progrès qu'elle a apportés dans nos sociétés et nos niveaux de vie.

Le secteur du bâtiment consomme aujourd'hui 47% de l'énergie produite et est responsable de 25% des émissions de gaz à effet de serre. Si ces chiffres sont généralement connus des acteurs de la construction, beaucoup ne sont pas conscients qu'une majeure partie des autres ressources non renouvelables de la planète sont également confisquées par l'activité bâtiment, sans considération pour les générations futures et leur capacité à répondre à leurs besoins.

Face aux changements climatiques qui en découlent, il est aujourd'hui plus que nécessaire de réduire les consommations d'énergie dans le bâtiment, tant au niveau du neuf que de l'existant, et de substituer aux énergies fossiles des énergies renouvelables. Pour cela, il faut moderniser les méthodes de conception et de rénovation des habitats en intégrant une démarche de Qualité Environnementale. L'objectif à l'horizon 2050 est le bâtiment à énergie positive, c'est-à-dire un bâtiment pouvant produire plus d'énergie qu'il n'en consomme.

Les bâtiments ont des besoins énergétiques qui se répartissent sur trois postes :

- Chaleur : chauffage, production de l'ECS (Eau Chaude Sanitaire) ;
- Froid : rafraîchissement ou refroidissement des locaux, conservation des aliments ;
- Electricité : utilisations captives de l'électricité (éclairage, électroménager, audiovisuel et divers auxiliaires tels que brûleurs, pompes, ventilateurs, ...)

Les combustibles fossiles et fissiles (uranium) ont des réserves limitées il est donc impératif et urgent de développer dans le bâtiment des solutions énergétiques fonctionnant directement avec des énergies renouvelables : solaire thermique, solaire photovoltaïque (pour l'électricité), géothermie, biomasse (bois -énergie), micro- ou pico-hydraulique (pour l'électricité). Ces énergies renouvelables se caractérisent par une diffusion spatiale qui est bien adaptée au caractère diffus de l'habitat.

Une autre caractéristique est que l'utilisation de ces énergies renouvelables correspond à une production de chaleur à faible niveau de température qui est tout à fait

compatible avec l'application bâtiment. Toutefois, sur le site d'un bâtiment ou à proximité immédiate, il existe d'autres sources énergétiques inutilisées et souvent à faible niveau de température. Ce sont par exemple des rejets thermiques industriels ou résultant d'une autre application énergétique déjà valorisée dans le bâtiment, l'énergie contenue dans le sol adjacent (géothermie de surface), dans l'air ou dans l'eau des nappes phréatiques et des rivières proches.

L'intégration énergétique consiste à utiliser une combinaison de ces sources, pouvant se réduire à au moins une énergie renouvelable, pour couvrir le maximum de besoins énergétiques du bâtiment avec la meilleure efficacité. On trouve quelques études partielles sur le sujet [1, 2, 3]. Les combinaisons envisageables sont nombreuses et constituent un gisement potentiel d'innovations. La cogénération solaire avec des cellules PV / T, mais aussi la cogénération classique permettent de compenser des besoins en chaud et en électricité. L'association solaire thermique et pompe à chaleur géothermale réversible prélevant (ou rejetant) de la chaleur dans le sol (ou d'autres combinaisons avec des pompes à chaleur) permet de compenser la totalité des besoins de chauffage et une grande partie des besoins en ECS ainsi qu'une partie des besoins en rafraîchissement des locaux. La production de froid à partir du solaire, soit avec des machines à absorption, soit avec des réacteurs chimiques à fonctionnement continu ou discontinu, soit en utilisant des cellules à effet Peltier alimentées en électricité photovoltaïque, soit encore avec le procédé DEC (desorption and evaporative cooling appelé aussi dessiccant cooling) sont autant d'exemples d'intégration énergétique.

L'objectif est de diminuer les consommations d'énergie primaire et de réduire les impacts environnementaux associés, afin de tendre vers des bâtiments "zéro énergie" ou "négawatts".

Les sources d'énergie renouvelable sont donc, et seront de plus en plus, amenées à cohabiter sur un même site, cependant, elles ne font pas encore l'objet d'une réelle stratégie de gestion énergétique globale. Les développements actuels visent à optimiser la cohabitation de sources de natures différentes pour profiter pleinement de leurs potentiels. C'est-à-dire que leur exploitation doit se faire non seulement en fonction des besoins mais aussi en fonction de la disponibilité de l'énergie. L'utilisation de cette énergie doit donc se faire de manière plus rationnelle pour ne pas conduire à une approche archaïque du dimensionnement consistant à opter pour la surcapacité.

Dans cet article, un état des lieux en matière de potentiel d'économies d'énergies est dressé, basé sur les réalisations de constructions performantes grâce à leur isolation thermique mais aussi aux systèmes à énergie renouvelable mis en place. Ensuite, pour l'intégration des différentes sources d'énergie sur un même site, nous

décrivons la méthodologie envisagée pour dimensionner au plus juste les installations sans faire appel à un nombre trop grand de techniques qui coûteraient trop cher et ensuite gérer le mieux possible le fonctionnement des différents systèmes en place.

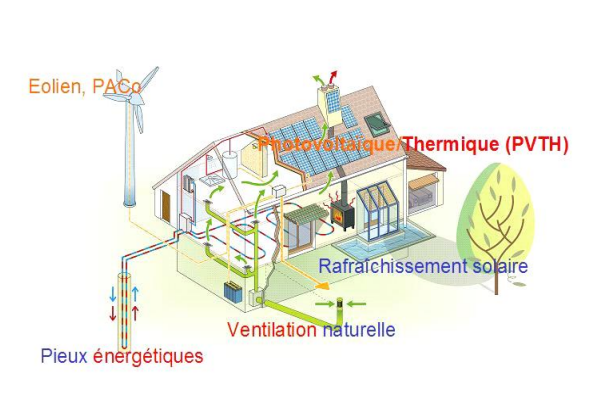


Figure 1 : Maison équipée de systèmes multi-énergies

2- VERS DES BATIMENTS A HAUTE PERFORMANCE ENERGETIQUE

Depuis 25 ans, cinq réglementations ont permis une réduction de deux tiers des consommations d'énergie dans les bâtiments neufs, la dernière étant la RT 2005 [4, 5].

Parallèlement aux réglementations, plusieurs initiatives ont éclos en France comme la démarche Haute Qualité Environnementale (HQE) [6] ou la certification Effinergie [7].

La démarche HQE est un "management de projet" visant à limiter les impacts d'une opération de construction ou de réhabilitation sur l'environnement tout en assurant à l'intérieur du bâtiment des conditions de vie saines et confortables. Esthétique, confort, agrément de vie, écologie, durabilité : la HQE intègre la globalité, joue le développement durable et représente ainsi l'état le plus avancé de l'art de construire.

La certification Effinergie est née en 2006 d'une dynamique autour des constructions et réhabilitations basse énergie. Inspirés par les enseignements d'une étude CSTB / PREBAT [8] et par le succès d'initiatives type PASSIVHAUS® (Allemagne) [9] et Minergie® (Suisse) [10]. □ Pour le neuf, le référentiel qui a été défini permet de se situer à un niveau de consommation d'énergie de 50 kWh/m²/an, modulé selon les zones climatiques. Les niveaux d'exigences définis pour les logements et les bâtiments tertiaires neufs correspondent à ceux du label national « bâtiment basse consommation » adopté en 2007. Des travaux sont en cours pour définir les niveaux à retenir pour le référentiel « bâtiment à énergie positive ». □ Pour l'existant, EFFINERGIE a défini en 2007 le référentiel pour l'existant qui fixe le niveau d'exigence à 80 kWh/m²/an.

Un arrêté du 8 mai 2007 [11] propose 3 nouveaux labels pour attester de la performance énergétique des constructions neuves, en plus des labels habituels (HPE et TPE) qui accompagnaient les réglementations précédentes. L'objectif de ces labels est de promouvoir des opérations performantes sur le plan de l'isolation thermique et de l'efficacité des systèmes. Nous distinguons désormais :

- le label "haute performance énergétique, HPE 2005", correspondant à une consommation conventionnelle d'énergie inférieure au moins de 10 % à la consommation conventionnelle de référence définie par la RT 2005 ;
- le label "très haute performance énergétique, THPE 2005" correspondant à une consommation conventionnelle d'énergie inférieure au moins de 20 % à cette même consommation conventionnelle de référence.
- le label "haute performance énergétique énergies renouvelables, HPE EnR 2005", lorsque la consommation conventionnelle de chauffage ayant pour origine un générateur utilisant la biomasse est supérieure à 50 % ou lorsque le système de chauffage est relié à un réseau de chaleur alimenté à plus de 60 % par des énergies renouvelables ;
- le label "très haute performance énergétique énergies renouvelables et pompes à chaleur, THPE EnR 2005", dès lors que la consommation conventionnelle d'énergie est inférieure au moins de 30 % au coefficient de référence de ce bâtiment (Cep réf) fixé par la RT 2005 et que l'immeuble remplit l'une des six conditions fixées par l'arrêté, relatives à l'utilisation de panneaux solaires, de pompes à chaleur ou d'équipements fournissant de l'énergie grâce à la biomasse ou d'autres énergies renouvelables ;
- le label "bâtiment basse consommation énergétique, BBC 2005", qui est délivré, pour les immeubles d'habitation, en fonction de la zone climatique et de l'altitude du terrain, et pour les autres immeubles, au regard d'une consommation conventionnelle d'énergie primaire du bâtiment inférieure ou égale à 50 % de la consommation conventionnelle de référence définie par la RT 2005.

La figure 2 présente l'évolution des consommations totales d'énergie liées aux différentes réglementations thermiques et le niveau de consommation qui peut être atteint actuellement compte tenu des technologies les plus performantes.

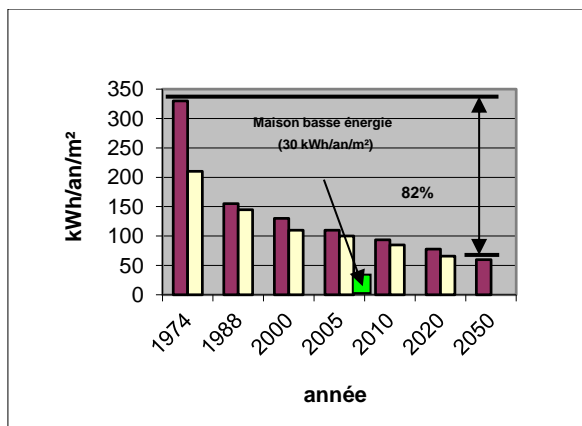


Figure 2 : Energie finale chauffage + ECS. Evolution de la réglementation thermique française et niveau de la maison basse énergie (ce qui est le meilleur à l'heure actuelle). En rouge : maisons individuelles et en blanc : logements collectifs

Des opérations à énergie consommée nulle ou positives existent mais ne sont actuellement que des opérations exemplaires ([12, 13]).

Pour soutenir et renforcer la filière photovoltaïque, les tarifs d'achat de l'électricité solaire photovoltaïque ont été réévalués à la hausse en juillet 2006.

Désormais, chaque kWh produit rapporte 30 c€ au propriétaire de l'installation si celle-ci est située en France métropolitaine et 40 c€ en Corse et dans les DOMTOM où le potentiel est supérieur. Lorsque les panneaux sont intégrés au bâti, le tarif de rachat est de 55 c€/kWh quel que soit le secteur géographique.

En avril 2007, le Ministère de l'Industrie a publié les critères d'éligibilité des équipements de production d'électricité photovoltaïque à la prime d'intégration au bâti.

Pratiquement tous les membres de l'Union européenne ont défini un but exigeant mais relativement lointain (de 2020 à 2050) et publient, tous les 3 ou 5 ans, une réglementation de plus en plus contraignante (en France les RT 2000, RT 2005, RT 2010...).

La Directive européenne sur l'efficacité énergétique des bâtiments les y contraint. À chaque étape, ces pays ajoutent des démarches volontaires plus exigeantes. En France, ce sont par exemple, les différents labels évoqués.

En Allemagne, pour être certifié Passivhaus (label créé en 1996) par l'institut de Darmstadt, une construction neuve doit respecter les quatre conditions suivantes :

- 1- des besoins de chauffage annuels inférieurs à 15 kWhep/(m².an) en énergie primaire,
- 2- des consommations d'énergie globale inférieures à 120 kWhep/(m².an)

Le Deutsche Energie Agentur (DENA), l'équivalent allemand de l'ADEME, a instrumenté 150 maisons construites selon le standard Passivhaus, ainsi que

plusieurs centaines de logements existants et de maisons neuves respectant simplement la réglementation EnEv, l'équivalent de notre RT 2005. Selon cette enquête, les logements existants allemands affichent des besoins d'énergie pour le chauffage de 159 kWhep/(m².an) en moyenne. Tandis que les maisons passives n'atteignent que 16,6 kWhep/(m².an), soit une économie d'énergie de 90 % par rapport à l'existant. Les logements conformes à la réglementation pour les constructions neuves EnEv consomment environ 66 kWhep/(m².an) pour le chauffage, soit quatre fois plus que la moyenne des maisons passives. Il est donc établi que le standard Passivhaus se traduit réellement par de très faibles consommations d'énergie sur le terrain. Avec des consommations annuelles de chauffage inférieures à 16 à 17 kWhep/m², une maison passive consomme environ 8 fois moins qu'une maison conforme à la RT 2005 en France. Ce qui se traduit par des coûts de chauffage de l'ordre de 10 à 20 € TTC/mois seulement, selon le volume. Le coût de construction de ces logements passifs est suffisamment maîtrisé pour que la démarche se justifie par un calcul actualisé sur 30 ans, avant prise en compte des divers avantages fiscaux octroyés tant par les Länder que par le gouvernement fédéral.

3- une étanchéité de l'enveloppe, telle que les fuites soient inférieures à 0,6 Vol/h (le débit correspondant déterminé en nombre de renouvellements du volume intérieur du logement, noté n50, est déterminé pour une mise en dépression de 50 Pa entre l'intérieur et l'extérieur doit être tel que : $n50 \leq 0,6 \text{ h}^{-1}$).

4- Enfin, le label Passivhaus n'est attribué qu'à des constructions dont les calculs ont été effectués avec l'outil diffusé par l'institut et l'étanchéité de la construction vérifiée (in situ) par un test Blower Door (ou test de la fausse porte).

Pour aider les maîtres d'ouvrage et les entreprises à atteindre ces performances, l'Institut Passivhaus propose certains conseils : emploi de matériaux d'isolation opaques dont le coefficient U soit inférieur à 0,10 W/(m².K), des ouvrants (fenêtres et portes) dont le Ug soit au plus égal à 0,7 W/(m².K), avec un facteur solaire de 50 % pour les fenêtres, des systèmes de ventilation double flux dont le taux de récupération soit supérieur à 90 %, etc.

Tous ces composants nécessaires existent depuis des années. Une maison passive allemande est avant tout une construction sur isolée, très étanche à l'air, dotée d'une ventilation double flux efficace, et construite avec soin.

Le mouvement Passivhaus s'est étendu à la Belgique, à la Grande-Bretagne, à l'Italie, à plusieurs pays nordiques. Depuis février dernier, il existe même une association La Maison Passive France, qui a reçu l'agrément de l'institut de Darmstadt.

Plus récent que Passivhaus, Minergie rattrape son retard puisque chaque année, environ 30 % de la construction de logements neufs en Suisse est ainsi labellisée.

Quatre niveaux pour le label Minergie. Le label suisse Minergie est un peu plus complexe et s'applique lui aussi à toute construction neuve, à l'exception des locaux industriels. Il compte quatre niveaux de performance. Le moins performant s'intitule Minergie. Viennent ensuite par ordre croissant de performance Minergie-P (P pour Passivhaus), Minergie- ECO et Minergie P-ECO. Le label Minergie définit la consommation maximale chauffage + ventilation + ECS + climatisation pour les bâtiments en utilisant des indices pondérés de dépenses d'énergie. L'indice pondéré Minergie est calculé d'après le rendement du générateur de chaleur, divisé par un facteur de pondération, différent selon l'énergie. Jusqu'en janvier 2005, les pompes à chaleur bénéficiaient d'une pondération nettement plus favorable que les chaudières de toutes natures. Pour les maisons individuelles, le label Minergie simple fixe un indice plafond à 42 kWh/(m².an). Depuis 2002, le label Minergie-P correspond à l'introduction du standard maison passive dans le référentiel. Il exige le respect de cinq conditions, dont un dimensionnement de la puissance de chauffage inférieur à 10 W/m² et un indice pondéré de dépense d'énergie inférieur à 30 kWh/(m².an). Les labels Minergie-ECO et Minergie-P-ECO ajoutent des exigences en matière de modes de construction sains et écologiques.

Mais contrairement au Passivhaus, l'attribution du label Minergie n'est pas soumise à un contrôle systématique sur chantier, ni à une vérification de la perméabilité à l'air.

En Italie, le gouvernement met l'accent sur les certificats blancs (certificats d'économies d'énergie), au Royaume-Uni sur les subventions, en Finlande sur les accords volontaires et les audits.

La réglementation thermique est plus contraignante dans les pays scandinaves que dans le Sud de l'Europe.

Pour ce qui concerne l'extérieur de l'Europe, l'étiquetage des systèmes de climatisation est plus implanté et les instruments économiques et fiscaux moins utilisés dans les pays en développement pour des contraintes financières et sociales. Mais il n'y a pas fondamentalement de différence importante entre les pays du Nord et du Sud sur le type de mesures implantées. On peut ainsi trouver de très bonnes pratiques d'instruments économiques dans les pays émergents comme en Thaïlande (fonds d'efficacité énergétique) ou au Brésil.

Dans le rapport CSTB / PREBAT [8], une synthèse internationale intéressante sur les constructions performantes permet de compléter les informations données ici.

3. POSITION DU PROBLEME : LA MODELISATION D'UN BATIMENT MULTI-ENERGIE

La première question à laquelle nous devons savoir répondre concerne la modélisation d'un bâtiment équipé de systèmes multi-énergies. Comment peut-on effectuer cette modélisation ? Y a-t-il des différences entre cette modélisation et celle d'un bâtiment traditionnel ? La première considération qui ressort est que, les sources d'énergie renouvelable ayant un caractère fortement dynamique, il est nécessaire de conduire une modélisation avec un pas de temps de calcul au moins horaire, si non le long de l'année, au moins le long de la durée du projet (en été et en hiver) et des jours moyens mensuels. Comme les décisions qui concernent l'exploitation des différentes énergies renouvelables doivent être prises au moment de la conception du bâtiment et de la définition des budgets, et comme il est long et difficile de conduire cette modélisation dynamique dans une phase, celle de conception, où on n'a pas de données suffisantes pour mettre en place un modèle type EnergyPlus ou TRNSYS, nous proposons donc l'idée d'adopter une modélisation paramétrable vis à vis de tous les flux énergétiques qui traversent le système bâtiment et qui peuvent être décomposés en flux thermiques, frigorifiques et électriques.

En outre, dans un bâtiment multi-énergies les interactions entre différentes formes d'énergies sont encore plus complexes que dans un bâtiment traditionnel (on ne peut pas dans un bâtiment multi-énergies conduire l'analyse de la partie électrique indépendamment de la partie thermique). Le modèle doit reproduire tous les flux mis en jeu et doit aussi être suffisamment détaillé et sensible pour reproduire les interactions entre les flux énergétiques qui très variables, changent de signe et ont une valeur moyenne généralement plus faible par rapport à celle d'un bâtiment traditionnel.

Le schéma de modélisation en offre et en demande donné dans la figure suivante permet aussi d'envisager les meilleures stratégies de gestion de la charge (*load management*) soit au niveau de la demande d'énergie du bâtiment (isolation thermique de l'enveloppe, adoption d'appareils à haute efficacité énergétique, ...) soit au niveau de l'offre d'énergie pour le bâtiment.

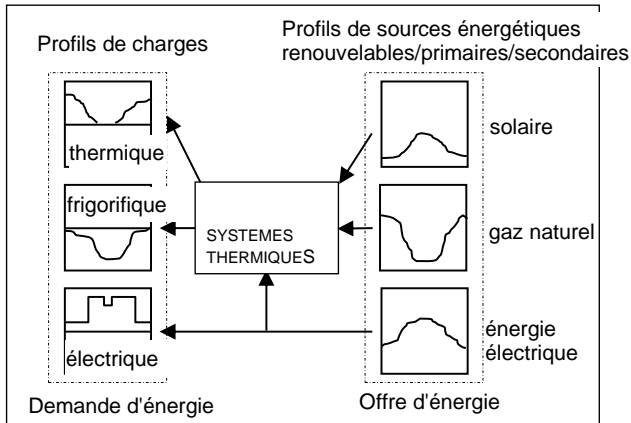


Figure 3 : Schéma de classement entre les flux énergétiques mis en jeu

Du point de vue méthodologique d'ailleurs, la différence entre une modélisation de bâtiment traditionnel et celle d'un bâtiment multi-énergies est importante : dans le premier cas on soumet des besoins aux sources énergétiques, dans l'autre la disponibilité et le coût des sources (particulièrement celle des sources renouvelables) interagissent avec les besoins.

4. CHOIX D'UNE ENERGIE ET VARIABILITE DES SOURCES RENEUVABLES ET DES BESOINS DE L'HABITAT

L'optimisation, dans le système envisagé dans le paragraphe précédent, ne se fonde plus sur la minimisation de la fonction coût du chauffage et de l'ECS, comme d'habitude, mais sur la minimisation de la facture énergétique totale payée par l'utilisateur. Celle-ci comprend [14] :

- l'ensemble des abonnements,
- les consommations observées pour toutes les énergies auxquelles le logement a accès (électricité, gaz, propane, fioul, etc.), ce qui inclut tous les postes utilisateurs sans distinction : chauffage, ECS, cuisine, électroménager, éclairage, VMC, etc.
- les locations (cuve, compteurs, etc.)
- les frais de maintenance ordinaires (mais pas les frais de grosses réparations qui sont directement prélevés à travers le loyer),
- la quote-part du coût des services généraux ayant trait au chauffage, à l'ECS, à la VMC.

La détermination du choix est liée à l'association d'énergies qui minimisera la facture annuelle de l'occupant et présentera sur ses concurrentes moins chères à l'investissement un temps de retour inférieur à une durée déterminée (10 ans par exemple).

Pour cela, il faut :

- inventorier les fournitures d'énergie présentes sur le site, ainsi que les techniques de chauffage/distribution/émission associées,

- déterminer pour chaque solution le montant de la facture énergétique du logement type, ramené à la surface habitable,
- évaluer le montant des travaux correspondant à chaque solution,
- classer les solutions par coût d'exploitation croissant, en indiquant pour les meilleures le temps de retour de l'investissement par rapport à leurs concurrentes moins chères.

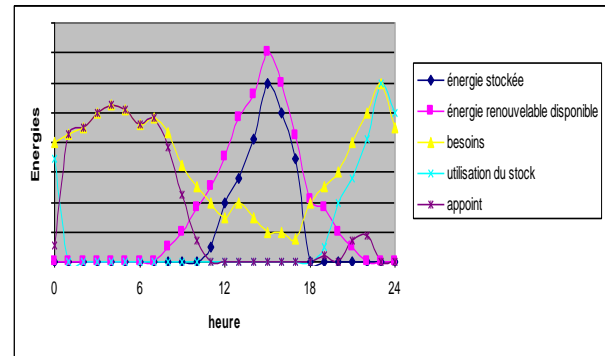


Figure 4 : Exemple de variations des flux d'énergies

5. LES SYSTEMES DE CONTROLE-COMMANDE

Dans le contexte de l'autonomie énergétique des bâtiments, les efforts de recherche du Laboratoire des Sciences de l'Habitat, du Politecnico de Turin, du laboratoire AMPERE et du CETHIL portent sur de nombreux domaines convergents sur une combinaison entre : l'isolation, la ventilation, les systèmes (producteurs) passifs, actifs ou adaptatifs, le stockage (du chaud et/ou du froid). Cette évolution plus ou moins facile à atteindre sur chacun des domaines engendre une complexité évidente de la gestion de ces systèmes à deux niveaux : d'une part à l'échelle des composants qui s'enrichissent en fonctionnalités (multi-flux, isolation, stockage intégré ...) et d'autre part à l'échelle du bâtiment qui intègre le chaînage production, distribution, émission, stockage de multi-énergies produites à partir de multi-systèmes.

5.1 Le bâtiment domotique

Un système domotique peut être vu comme un système de pilotage réparti spatialement visant à maîtriser différentes variables caractéristiques d'environnements (thermique-air, thermique-eau, lumineux, ventilation) et de services (cuisson, lavage, ...). La commande est réalisée au moyen d'équipements qui peuvent être qualifiés, par analogie avec la notion de capteur intelligent, d'actionneurs intelligents : les équipements embarquent une intelligence qui comprend généralement capteurs et mécanisme de commande locale. En guise d'exemple, un radiateur, actionneur agissant sur l'environnement thermique-air, dispose d'un capteur de température et d'un mécanisme de régulation.

Il en va de même du réfrigérateur qui participe au service réfrigération. Les commandes de ces différents équipements sont indépendantes les unes des autres et peuvent parfois conduire à des situations difficiles à gérer d'un point de vue énergétique.

Les systèmes de Gestion Technique des Bâtiments (GTB) sont aujourd'hui des solutions disponibles pour l'automatisation du fonctionnement des installations de chauffage et climatisation. A travers des stratégies de contrôles de défaillances des équipements, ces plateformes permettent d'alerter l'exploitant des maintenances à effectuer, mais ne sont aujourd'hui pas adaptées à l'arrivée des énergies renouvelables intégrées dans le Bâtiment.

5.2 Une domotique pour les énergies renouvelables

Par ailleurs, ces solutions classiques de contrôle commande (associées au chauffage, climatisation, etc) n'intègrent pas des concepts relatifs au caractère intermittent des sources renouvelables d'énergie. Cette particularité rend complètement inadaptées (voir inefficaces) les solutions classiques dans des configurations faisant appel aux sources renouvelables. Aussi, il est nécessaire aujourd'hui de travailler au développement d'un système de contrôle commande permettant d'exploiter au mieux le potentiel des différentes sources renouvelables, en gérant de manière globale les besoins en énergie et la capacité de production d'un habitat.

Bien entendu, cela suppose également une gestion des consommations en fonction de moyens de production disponibles. Cependant la consommation en énergie est fortement liée au mode de vie des habitants dont, malheureusement, le comportement peut être en complet désaccord avec une logique économique. La réduction des consommations passe donc par l'information des populations et par le développement d'habitat « intelligent ».

En effet, il n'est pas illusoire, compte tenu des avancées dans les domaines du contrôle commande et de l'intelligence artificielle, d'imaginer un système autonome capable de gérer les consommations d'un habitat en fonction de stratégies et de priorités définies par défaut (utilisation de décalage de services), et adaptables en fonction des utilisateurs. Il devra être également capable de gérer la production et répondre, autant que possible, à des pics ponctuels de consommation (accumulation-restitution). Cela suppose alors dans les habitats, une utilisation accrue de la domotique qui peut être vu comme un moyen de pilotage réparti visant à maîtriser différentes variables d'environnement et de service. La réalisation de cette « intelligence » nécessitera de formaliser un mécanisme de coopération entre les sources et les charges domestiques, coopération nécessaire dans le cas d'une production locale dont la capacité est limitée et variable dans le temps. Enfin, Il sera nécessaire d'opter pour une

interface homme-machine suffisamment simple et conviviale pour que la complexité réelle du système reste masquée et ne représente pas un frein à son développement.

Nous sommes encore loin de cet habitat « intelligent », mais il est important de poser dès aujourd'hui les premières pierres pour satisfaire au plus tôt les impératifs environnementaux. Ce chantier doit débiter par un contrôle le plus efficace possible de la production en fonction des besoins et de la disponibilité des énergies. C'est pourquoi, le laboratoire AMPERE a débuté en 2004 des travaux sur la modélisation des flux énergétiques dans un habitat. Un premier modèle de consommation électrique a été validé et différents modèles de sources de production énergie renouvelable (électrique) ont été réalisés. En collaboration avec le CETHIL, l'aspect thermique est en cours d'intégration et offrira sous peu un modèle complet des flux énergétiques, c'est-à-dire un outil de simulation complètement paramétrable (situation géographique, type et surface de l'habitation, nombre et habitudes des occupants, niveau de vie, appareillages...). De plus, AMPERE et le CETHIL ont organisé en 2005 et 2006 des rencontres baptisées « Journée Maison Autonome ».

6. DEMARCHE

Outre les recherches bibliographiques sur la gestion des systèmes multi-sources, la première partie du projet consiste à définir un ensemble de situations, ou plutôt d'habitats, présentant des caractéristiques suffisamment différentes au niveau architectural, équipement et situation géographique pour permettre de tester la pertinence de l'outil qui sera développé. Il sera nécessaire d'avoir des échantillons d'habitats en cours de conception et bien entendu d'habitats existants pouvant déjà présenter des sources d'énergie renouvelable.

La deuxième étape consistera dans un premier temps à rechercher des modèles de sources de production d'énergie renouvelable (solaire thermique, solaire photovoltaïque...). Dans un deuxième temps, la phase de dimensionnement des installations (production) sera réalisée pour chaque habitat en phase de conception défini dans l'étape 1. Pour les habitats existants, un bilan consommation-production devra être établi.

Du point de vue méthodologique ce travail demande la mise en place de procédures d'analyse de la charge journalière, mensuelle et annuelle de la demande et de l'offre des différentes formes d'énergies et l'évaluation des systèmes traditionnels de chauffage, rafraîchissement, production d'eau chaude sanitaire, production d'électricité, pour répondre à la demande d'énergie.

S'appuyant sur un modèle paramétrable des flux énergétiques dans un habitat, et sur les modèles des sources d'énergie renouvelable, différentes configurations existantes ou en cours de conception

seront modélisées. Elles serviront de base d'étude au choix et au bon dimensionnement des systèmes de production d'énergie en fonction des besoins en étant capable, autant que possible, de répondre à des pics de consommation (problème de la disponibilité de l'énergie et du stockage).

Cette phase nous conduira à la constitution de règles expertes permettant d'évaluer l'influence d'un paramètre de dimensionnement (surface de captation, puissance d'installation, volume de stockage ...) sur la consommation énergétique, le coût de l'installation ou l'impact environnemental.

Dans la troisième étape les méthodes de couplage entre profils de demande et d'offre d'énergie seront étudiées selon les techniques de *demand management* et *supply-side management* dérivées du secteur électrique. Ce couplage dépend de la technologie des systèmes, et du stockage d'énergie ou déphasage des charges.

La quatrième et dernière étape consistera à mettre en œuvre un outil d'aide à la conception basé sur une analyse multicritères (méthodes ELECTRE et PROMETHEE) permettant d'optimiser les choix fondamentaux au moment de la conception du bâtiment. Les critères décisionnels pourront être de type exclusivement économiques ou énergétiques, thermo-économiques ou liés à l'environnement.

Du côté de l'analyse multicritère, plusieurs travaux ont été réalisés au CETHIL : en particulier la mise en œuvre d'un outil informatique d'aide à la décision « CONCEPT » [15] pour optimiser dans la phase de conception du bâtiment, outre l'orientation du bâtiment, la surface des fenêtres, les protections solaires, la stratégie de ventilation. Un ensemble de 2304 simulations numériques ont permis de définir des règles expertes utilisées par une méthode d'aide à la décision multicritère de type ELECTRE III. L'utilisateur peut modifier les poids, voire les seuils de préférence, indifférence et veto utilisées dans la comparaison par couples des différentes solutions architecturales.

Un tel outil ; et d'autres similaires qui viendront tenant compte de l'intégration des énergies renouvelables représentera notre contribution pour atteindre le stade évolué de la conception d'un bâtiment à énergie positive.

7. CONCLUSION

Afin d'atteindre l'objectif d'habitat à énergie positive, les énergies renouvelables doivent nécessairement co-exister avec des sources d'énergie classiques. La conception et la gestion des systèmes demande de se pencher de plus près sur les démarches à utiliser. Le travail décrit envisage donc deux objectifs finaux : l'un est de trouver les solutions de commande optimale des systèmes sur une installation existante qui réduisent les consommations en privilégiant les énergies renouvelables ; l'autre est de proposer un outil de conception d'un ensemble bâtiment-systèmes pour définir les conditions les meilleures du couplage entre demande et offre d'énergie et pour estimer les consommations qui en découlent.

REFERENCES :

- [1] **N.J. Kelly**, Towards a design environment for building-integrated energy systems: the integration of electrical power flow modelling with building simulation, *A thesis submitted for the Degree of Doctor of Philosophy, Department of Mechanical Engineering, Energy Systems Research Unit, University of Strathclyde*, Glasgow, UK. October 1998.
- [2] **J.A. Clarke, J. Cockroft, S. Conner, J.W. Hand, N.J. Kelly, R. Moore, T. O'Brien and P. Strachan**, Control in building energy management systems: the role of simulation, , *Seventh International IBPSA Conference*, Rio de Janeiro, Brazil, August 13-15, 2001.
- [3] **Y Zhang and V I Hanby**, Model-based control of renewable energy systems in buildings, , *Ninth International IBPSA Conference*, Montréal, Canada, August 15-18, 2005.
- [4] Décret no 2006-592 du 24 mai 2006 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des constructions
- [5] Arrêté du 24 mai 2006 relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments
- [6] Association HQE, http://www.assoHQE.org/autres_documents_faq.php, 2008
- [7] <http://www.effinergie.org/xwiki/bin/view/Main/WebHome>
- [8] Comparaison internationale bâtiment et Energie, Rapport intermédiaire PREBAT, décembre 2006, téléchargeable sur le site <http://www.prebat.net/benchmark/benchmark.html>
- [9] Site de l'association Passivhaus, <http://www.passiv.de>
- [10] Site de l'association Minergie, <http://www.minergie.ch/fr/index.php>
- [11] Arrêté du 8 mai 2007, http://www.legifrance.gouv.fr/WAspad/UnTexteDeJorf?numj_o=SOCU0750649A
- [12] <http://www.cythelia.fr>
- [13] <http://www.polymtl.ca/>
- [14] **O. Sidler**, L'habitat social economie en charges, intervention au séminaire construction climatique de Saint-Etienne, 21 juin 2000, <http://perso.club-internet.fr/sidler>.
- [15] **E.B.P. de Castro, J. Virgone, L.E.G. Bastos**, *A computer program to aid architectural conception based on multicriteria analysis and on simulated building data*, CISBAT; septembre 2005, Lausanne.

Thermoélectricité : une nouvelle mine "verte" ?

Claude GODART, Directeur de Recherches CNRS

ICMPE -UMR 7182 / CMTR
2/8 rue Henri Dunand 94320 Thiais
godart@icmpe.cnrs.fr

Président de la 6^{ÈME} Conf. Européenne de Thermoélectricité - PARIS - 2-4 JUILLET 2008

[HTTP://ECT2008.ICMPE.CNRS.FR/](http://ECT2008.ICMPE.CNRS.FR/)

Résumé : *La recherche de nouvelles sources d'énergies non polluantes est devenue un enjeu majeur pour nos sociétés après notamment la signature du protocole de Kyoto. D'autre part, la micro-électronique nécessite des refroidissements puissants et localisés. Dans les deux cas, les modules thermoélectriques apparaissent à ce jour comme une voie très prometteuse. L'évolution des concepts et des matériaux, depuis une dizaine d'années, devrait faire émerger la thermoélectricité et la faire contribuer au développement durable ou s'intégrer à d'autres technologies émergentes telles que la photovoltaïque ou la géothermie. Le rôle des nano-structures, plus récemment mis en évidence, devrait s'avérer essentiel rapidement. Dans cet article, nous nous proposons de faire un état de l'art succinct de ce sujet interdisciplinaire, notamment de divers aspects matériaux, qui en rendent l'étude passionnante mais délicate.*

1. Introduction

Les effets thermoélectriques (TE) permettent la transformation d'énergie calorique en énergie électrique, ou son contraire, et ses applications comportent donc les deux volets : (micro)refroidissement ou production d'électricité à partir de sources de chaleur perdue.

La recherche de nouvelles sources d'énergies non polluantes est devenue un enjeu majeur de nos sociétés modernes après notamment la signature du protocole de Kyoto. C'est pourquoi la génération d'électricité à partir de chaleur perdue aux moyens de modules thermoélectriques (voir : effet Seebeck) apparaît à ce jour comme un réservoir d'énergie "verte". Outre cet aspect de production d'électricité, les matériaux thermoélectriques, à même de refroidir (voir effet Peltier), constituent un moyen d'évacuer la chaleur des composants de la microélectronique. Pour les premiers, la faible efficacité des systèmes thermoélectriques en a longtemps limité l'intérêt. Pour les derniers, les méthodes classiques (air/eau), ne correspondent plus aux besoins en raison de la miniaturisation et des densités de puissance à dissiper. Dans les deux cas, de nouveaux concepts ont conduit depuis 1995 à des progrès assez remarquables qui justifient l'apparition très récente du thème dans de nombreuses conférences et les programmes nationaux de divers pays.

La compréhension des phénomènes physiques mis en jeu dans la thermoélectricité et le développement de matériaux à propriétés TE se sont principalement déroulés durant deux périodes d'activité intense.

De 1821 à 1851, les trois effets thermoélectriques (Seebeck, Peltier et Thomson) ont été découverts et compris du point de vue macroscopique. Leurs possibilités d'application à la mesure de température, à

la réfrigération et à la génération d'électricité ont également été reconnues. Ensuite, de la fin des années 1930 au début des années 1960 s'est déroulée une période de progrès important, durant laquelle s'est développée une compréhension des phénomènes à l'échelle microscopique et ont été découverts et optimisés la plupart des matériaux semi-conducteurs utilisés à l'heure actuelle. Cependant, l'efficacité de ces matériaux était très insuffisante pour concurrencer la réfrigération par cycle de compression-détente ou pour des applications de génération d'électricité rentables économiquement, et la fin de cette période de recherche est bien résumée par le titre d'un article : « Thermoelectricity, the breakthrough that never came ».

Plus récemment, depuis le début des années 1990, un regain d'intérêt pour la thermoélectricité est apparu, dû en particulier à l'émergence de préoccupations environnementales concernant les gaz utilisés en réfrigération et les émissions de gaz à effet de serre, et la volonté de développer des sources d'énergie alternatives.

Les deux principaux axes de recherche suivis concernent d'une part le développement de nouveaux matériaux à structures complexes et/ou ouvertes, et d'autre part le développement de matériaux connus sous de nouvelles formes de basse dimensionnalité (puits quantiques, nanofils, nanograins, couches minces, nanocomposites...). Parmi les nouveaux matériaux, plusieurs possèdent des propriétés thermoélectriques intéressantes pour des applications en génération d'électricité dans la gamme 200-600°C, et devraient permettre d'améliorer les rendements de conversion de chaleur en électricité. L'amélioration des architectures des matériaux dans les modules TE et les potentialités des nano-structures devraient permettre de dépasser les 14% d'efficacité de conversion atteint en 2004 [1].

2. Effets thermoélectriques (TE)

2.1. Effet Seebeck

Le premier effet thermoélectrique a été découvert par Seebeck en 1821, mais ne fut compris que bien plus tard: une différence de potentiel ΔV apparaît entre Y et Z lorsque deux matériaux a et b reliés en W et X, sont soumis à une différence de température ΔT aux mêmes points.

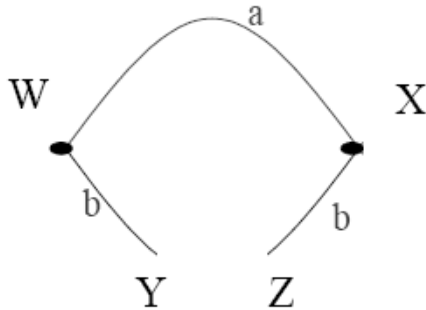


Figure 1: circuit thermoélectrique basique

L'utilisation la plus connue de l'effet Seebeck, $S_{ab} = \Delta V / \Delta T$, est la mesure de température à l'aide de thermocouples. Le coefficient Seebeck S est l'entropie Σ par porteur de charge divisée par la charge q : $S = \Sigma / q$.

2.2. Effet Peltier

Quelques années plus tard, en 1834, Peltier découvre le second effet thermoélectrique: un courant électrique I imposé au circuit entraîne une libération de chaleur Q à une jonction et une absorption de chaleur à l'autre jonction. Le coefficient Peltier Π_{ab} est alors défini par $\Pi_{ab} = Q/I$.

2.3 Effet Thomson

Le troisième effet thermoélectrique (l'effet Thomson) est mis en évidence lorsque sont présents simultanément un gradient de température et un courant électrique. Il y a alors génération ou absorption de chaleur dans chaque segment de thermocouple pris individuellement. Le gradient de flux thermique au sein des matériaux est donné par : $dQ/dx = \tau I dT/dx$ où x est la coordonnée spatiale et τ est le coefficient Thomson du matériau. Thomson (Lord Kelvin) montra en 1851 que les effets Seebeck et Peltier sont liés $\Pi = S.T = Q/I$: un matériau soumis à un gradient thermique et parcouru par un courant électrique échange de la chaleur avec le milieu extérieur. Réciproquement, un courant électrique est généré par un matériau soumis à un gradient thermique et parcouru par un flux de chaleur. **La différence fondamentale entre les effets Seebeck et Peltier considérés séparément et l'effet Thomson est que ce dernier existe pour un seul matériau et ne nécessite pas la présence d'une jonction.**

3. Réfrigération ou génération d'électricité par effets TE – Rendements

Pour la réfrigération ou la génération d'électricité par effet TE, un module est constitué de couples connectés électriquement. Chacun des couples est constitué d'un matériau de type p ($S > 0$) et d'un matériau de type n ($S < 0$), conduction par trous et électrons respectivement. Ces deux matériaux sont joints par un matériau conducteur dont le pouvoir thermoélectrique est supposé nul. Les deux branches (p et n) du couple et tous les autres couples composant le module sont connectés en série électriquement et en parallèle thermiquement. Cette disposition permet d'optimiser le flux thermique qui traverse le module et sa résistance électrique. Par souci de simplicité, nous raisonnerons dans la suite sur un seul couple, formé de deux matériaux de sections constantes. La figure 2 présente le schéma de principe d'un couple p-n utilisé pour la réfrigération thermoélectrique et la génération d'électricité.

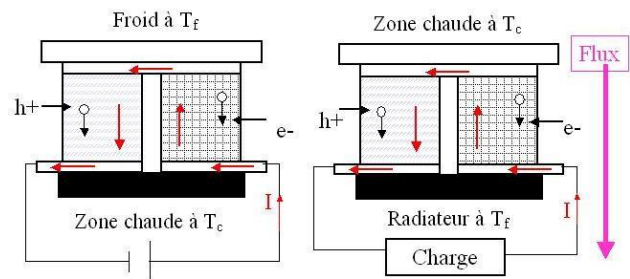


Figure 2 : Unicouple thermoélectrique: gauche pour refroidissement, droite pour génération électrique

Le courant électrique est imposé de telle manière que les porteurs de charge se déplacent de la source froide à la source chaude (au sens thermodynamique) dans les deux branches du couple. Ce faisant, ils contribuent à **un transfert d'entropie** de la source froide à la source chaude, et donc à un **flux thermique qui va s'opposer à celui de la conduction thermique.**

Dans chacune des deux branches, le flux généré par l'effet Peltier s'oppose à la conductivité thermique. La chaleur est donc extraite de la source froide avec un flux $Q_f = (Q_n + Q_p)|_{x=0}$. Dans le même temps, le courant qui parcourt les deux branches est à l'origine d'une création de chaleur par effet Joule $I^2 \rho / A$ par unité de longueur des branches, dans leur section A .

En considérant des conditions aux limites $T = T_f$ en $x = 0$ et $T = T_c$ en $x = L_p$ ou L_n avec L_p ou L_n les longueurs des branches, T_f et T_c les températures des sources chaude et froide, le flux Q_f s'écrit :

$$Q_f = (S_p - S_n)IT_f - K\Delta T - \frac{1}{2}RI^2$$

avec K et R les conductance thermique et résistance électrique totales des bras du module :

$$K = \frac{\lambda_p A_p}{L_p} + \frac{\lambda_n A_n}{L_n} \quad R = \frac{L_p \rho_p}{A_p} + \frac{L_n \rho_n}{A_n}$$

La puissance électrique dissipée dans le couple correspond à l'effet Joule et à l'effet Seebeck, soit :

$$W = I \cdot [(S_p - S_n) \cdot \Delta T + IR]$$

Le rendement du système de réfrigération thermoélectrique correspond au rapport de la chaleur extraite de la source froide à la puissance électrique dissipée, soit :

$$\eta = \frac{Q_f}{W} = \frac{(S_p - S_n)IT_f - K\Delta T - \frac{1}{2}RI^2}{I((S_p - S_n) \cdot \Delta T + IR)}$$

Pour une différence de température ΔT donnée, le rendement dépend du courant électrique imposé. Deux valeurs particulières du courant permettent de maximiser soit le rendement de conversion η soit la chaleur extraite de la source froide Q_f .

Par un raisonnement similaire, le rendement d'un module formé d'un couple p-n utilisé en génération d'électricité sera donné par le rapport de la puissance électrique utile délivrée à une résistance de charge r au flux thermique traversant le matériau :

$$\eta = \frac{P_u}{Q_c} = \frac{I[(S_p - S_n) \cdot \Delta T + IR]}{(S_p - S_n)IT_c + K\Delta T - \frac{1}{2}I^2(R + r)}$$

Ici encore, deux valeurs particulières de I maximisent soit le rendement de conversion soit la puissance électrique délivrée par le système.

4. Maximalisation des rendements de conversion – Facteur de mérite adimensionnel

En maximisant ces deux rendements de conversion, on peut montrer qu'ils dépendent uniquement des températures T_c et T_f et du facteur de mérite adimensionnel $Z_{pn}T_M$ avec $T_M = (T_c + T_f)/2$ la température moyenne et $Z_{pn} = (S_p - S_n)^2 / RK$. Notons que Z_{pn} pour un couple n'est pas une quantité intrinsèque au matériau mais dépend des dimensions relatives des branches du module. Le rendement est maximum lorsque Z_{pn} est maximum, donc lorsque le produit RK est minimum, ce qui est vérifié quand

$$\frac{L_n A_p}{L_p A_n} = \left(\frac{\rho_p \lambda_n}{\rho_n \lambda_p} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Le facteur de mérite Z_{pn} devient alors fonction uniquement de paramètres intrinsèques aux matériaux :

$$Z_{pn} = \frac{(S_p - S_n)^2}{(\sqrt{\lambda_p \rho_p} + \sqrt{\lambda_n \rho_n})^2}$$

Pour obtenir un rendement de conversion maximum, il convient donc de choisir les matériaux constituant le couple de manière à maximiser Z_{pn} . En règle générale, cela ne revient pas simplement à optimiser individuellement les deux matériaux pour optimiser leurs facteurs de mérite respectifs $ZT = S^2 T / (\rho \lambda)$. A la plupart des températures utilisées dans la pratique, et notamment celles utilisées pour la génération d'électricité, les

propriétés thermoélectriques des meilleurs matériaux de type p et de type n sont similaires. Dans ce cas, le facteur de mérite du couple est proche de la moyenne des facteurs de mérite individuels, et il est raisonnable d'optimiser les deux matériaux indépendamment l'un de l'autre.

L'optimisation de matériaux pour une utilisation dans la conversion d'énergie par effet thermoélectrique passe donc nécessairement par l'optimisation de leurs propriétés de transport de manière à maximiser le **facteur de mérite adimensionnel** $ZT = S^2 T \sigma / \lambda$ avec $\sigma = 1/\rho$ la conductivité électrique.

Pour une utilisation en réfrigération, l'efficacité d'un système est généralement représentée par le coefficient de performance COP. Pour un système dont la géométrie est optimisée, il est égal à :

$$COP = \frac{\gamma T_f - T_c}{(T_f - T_c)(1 + \gamma)} \quad \text{avec } \gamma = \sqrt{1 + ZT}$$

Pour un système utilisé en génération d'électricité, le rendement de conversion maximum η_{max} est donné par :

$$\eta_{max} = \frac{(T_c - T_f)(\gamma - 1)}{T_f + \gamma T_c}$$

Cette expression permet d'évaluer l'efficacité maximale (en négligeant toutes les pertes) qui peut être attendue d'un générateur thermoélectrique (Fig. 3) en fonction de la température de la source chaude (la température froide est la température ambiante 300K indiquée par une barre rouge verticale). La double flèche horizontale montre que pour un ZT de 1 et un gradient de 100°C, l'efficacité maximale est de 5%. On y observe que cette efficacité peut augmenter avec la température chaude (ΔT) pour un même ZT et qu'à une température donnée elle augmente avec ZT . Dans les 2 cas, un problème de matériaux se pose: pour augmenter ZT et pour que le matériau soit stable à plus haute température.

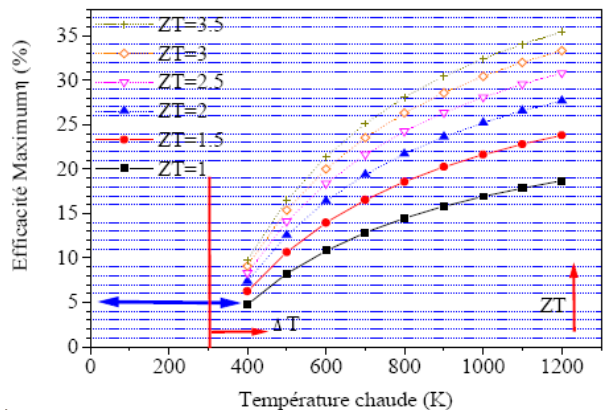


Figure. 3 : efficacité de conversion maximale en génération d'électricité

5. Facteurs contrôlant ZT

5.1. Facteur de puissance

L'augmentation de la température pose de nombreux problèmes, notamment de contacts électriques qui

doivent rester de très faibles résistances, ne pas s'oxyder, ne pas diffuser dans les matériaux thermoélectriques p & n. Enfin, ce calcul préliminaire suppose que ZT est constant avec la température ce qui est évidemment faux lorsque le gradient de température est grand (voir les courbes de ZT(T)).

L'expression du facteur de mérite résume à elle seule la difficulté à optimiser les propriétés de transport d'un matériau thermoélectrique. Intuitivement, il paraît difficile pour un matériau de posséder simultanément une bonne conductivité électrique et une mauvaise conductivité thermique, caractéristique des isolants. Le numérateur du facteur de mérite ZT, $S^2\sigma$ est nommé **facteur de puissance**. En génération d'électricité par effet thermoélectrique, la puissance utile sera d'autant plus grande que le facteur de puissance sera grand. Malheureusement, le pouvoir thermoélectrique et la conductivité électrique ne sont pas indépendants l'un de l'autre, et varient de manière opposée avec la concentration en porteurs de charge : **les meilleurs pouvoirs thermoélectriques seront obtenus dans des matériaux de faible concentration en porteurs tandis que les meilleures conductivités électriques le seront dans des matériaux à forte concentration de porteurs**. Les meilleurs matériaux thermoélectriques appartiendront donc à la classe des semi-conducteurs. Cette conclusion peut-être aisément vérifiée par la théorie.

Considérons un matériau semi-conducteur dont la concentration de porteurs minoritaires peut être négligée. On peut montrer [2] par approximation de la statistique de Fermi-Dirac que le pouvoir thermoélectrique est une fonction de l'énergie de Fermi selon l'expression :

$$S = \pm \frac{k}{e} \left[\left(r + \frac{5}{2} \right) - \frac{\zeta}{kT} \right]$$

avec ζ le niveau de Fermi. S décroît donc comme le logarithme de la concentration de porteurs de charges.

Suivant le même modèle, la conductivité électrique s'écrit sous la forme : $\sigma = ne\mu$ avec μ la mobilité de porteurs de charge. σ est donc une fonction linéaire croissante de la concentration de porteurs de charge.

Globalement, le facteur de puissance $S^2\sigma$ présentera un maximum pour une concentration de porteurs de charge correspondant à un semi-conducteur à faible gap (la valeur idéale du gap semble être de quelques kT). Le résultat est sensiblement le même pour un calcul plus complexe prenant en compte des bandes multiples ou plusieurs types de porteurs.

La figure 4 présente l'évolution du pouvoir thermoélectrique, de la conductivité électrique et du facteur de puissance en fonction du logarithme de la concentration de porteurs de charge du système. Les meilleures valeurs du facteur de puissance sont observées dans la gamme de concentration de porteurs de charges 10^{18} cm^{-3} à 10^{21} cm^{-3} .

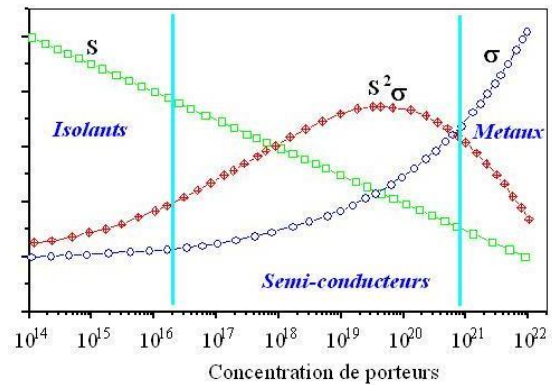


Fig. 4: Influence de la concentration de porteurs de charges sur le pouvoir thermoélectrique, la conductivité électrique et le facteur de puissance.

Il est également possible d'arriver à cette conclusion en raisonnant sur des paramètres microscopiques régissant la propagation des porteurs de charge dans un matériau. Chasmar et Stratton ont en effet montré que le facteur de puissance $S^2\sigma$ est une fonction croissante du paramètre β défini par :

$$\beta \propto T^2 (m^*)^2 \frac{\mu}{\lambda_L}$$

avec m^* la masse effective des porteurs de charge. Le compromis entre S et σ est alors équivalent au compromis entre m^* et μ : μ diminue en effet lorsque m^* augmente. Le terme λ_L sera discuté au paragraphe suivant. La recherche de bons matériaux thermoélectriques devrait donc, selon ce modèle, se limiter aux semi-conducteurs.

5.2. Conductivité thermique

Le second facteur important dans l'expression du facteur de mérite ZT (en sus du facteur de puissance) est la conductivité thermique : un matériau aura des propriétés thermoélectriques optimales pour une faible conductivité thermique. En effet, de manière intuitive, une bonne conductivité thermique tendrait à s'opposer à l'établissement du gradient thermique.

La conductivité thermique se compose principalement de deux contributions : une contribution électronique et une contribution des phonons (quantum (ou paquet élémentaire) de vibration dans un solide cristallin):

$$\lambda = \lambda_e + \lambda_L$$

avec λ la conductivité thermique totale, λ_e la contribution des porteurs de charges et λ_L la contribution du réseau.

La conductivité thermique électronique est reliée à la conductivité électrique par la loi de Wiedemann-Franz :

$$\lambda_e = LT\sigma$$

avec L le facteur de Lorentz. Dans les métaux, celui-ci est égal au nombre de Lorentz :

$$L_0 = \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{k}{e} \right)^2 = 2.45 \cdot 10^{-8} \cdot V^2 \cdot K$$

Cette valeur est généralement admise pour les semi-conducteurs étudiés en thermoélectricité, bien que dans une étude plus rigoureuse, L devrait dépendre du processus de diffusion des porteurs de charges ainsi que du niveau de Fermi.

En remplaçant λ par ces deux composantes et en appliquant la loi de Wiedemann-Franz, l'expression du facteur de mérite devient :

$$ZT = \frac{S^2 T \sigma}{L T \sigma + \lambda_1} \text{ soit } ZT = \frac{S^2}{L} \cdot \frac{\lambda_e}{\lambda_e + \lambda_L}$$

Au vu de cette expression, il est évident que l'optimisation du facteur de mérite passe par la minimisation de la contribution des phonons à la conductivité thermique. Si celle-ci était rendue négligeable par rapport à la contribution électronique, $ZT=1$ pourrait être obtenue pour $S=156 \mu\text{V.K}^{-1}$ et $ZT=3$ pour $S=270 \mu\text{V.K}^{-1}$ ($ZT=3$ correspond à un coefficient de performance en réfrigération de 1,1 proche de celui d'un réfrigérateur à compression).

Cependant, cette minimisation ne doit pas se faire aux dépens de la conductivité électrique, puisque l'équation précédente montre clairement que ZT croît avec le facteur λ_e/λ_L et donc avec le facteur σ/λ_L . Ceci a conduit à la proposition de Slack de **rechercher des matériaux qui conduisent l'électricité comme un cristal et la chaleur comme un verre** "Phonon Glass Electron Crystal" (PGEC) [3]. Il est donc nécessaire de trouver des processus de diffusion sélectifs ayant une influence plus marquée sur la propagation des phonons que sur celle des porteurs de charge.

5.3. Diffusion des phonons

Les processus physiques responsables d'une diffusion importante des phonons les plus couramment utilisés en thermoélectricité sont nombreux, citons :

- Les matériaux à structure cristalline complexe, ce qui favorise le nombre de modes de phonons optiques, la chaleur étant transmise principalement par les 3 modes acoustiques.

- L'insertion d'atomes lourds dans des cages de la structure cristalline susceptibles de vibrer indépendamment du réseau ("rattling" en littérature anglo-saxonne) et donc de créer de nouveaux modes de phonons.

- La formation de solutions solides entre différents matériaux de même type, pour lesquelles l'augmentation du désordre induit une diffusion importante des phonons par un phénomène de fluctuations de masse sur un ou plusieurs sites cristallographiques. Ces fluctuations de masse peuvent aussi être dues à la présence de lacunes.

- La diffusion des phonons par des impuretés ou des défauts ponctuels, qui conduit à étudier la formation de matériaux « composites » (mélange d'un bon matériau thermoélectrique et d'un autre matériau neutre d'un point de vue thermoélectrique) ou des techniques de synthèses ou de mise en forme « exotiques » induisant des concentrations de défauts ponctuels importantes.

- L'importance de la diffusion par les joints de grains, qui conduit à étudier des matériaux nanocristallins dans le but de réduire le libre parcours moyen des phonons.

Notons que ces processus ne sont pas exclusifs et que plusieurs d'entre eux peuvent être créés dans un même matériau.

6. Anciens matériaux thermoélectriques:

Dès 1960, la plupart des matériaux thermoélectriques actuellement utilisés (voir table 1) étaient connus et leurs performances, liées à un facteur de mérite thermoélectrique stagnant à la valeur 1, ont peu évoluées jusqu'en 1990. La seule application d'importance était basée sur Bi_2Te_3 pour le refroidissement. On remarque également l'absence de matériaux dans le domaine 400-700K.

	Bi-Sb	$\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$	$(\text{Bi,Sb})_2$ $(\text{Te,Se})_3$		PbTe	Te-Ag-Ge-Sb	Si-Ge
Type	n	n, p	n, p		n	p	n, p
T utilisation (T_u)	200	<300	~300-400	700	750	1000
ZT à T_u	1,1 (H)	0,8	0,9		0,8	1,1	0,6

Table 1: ZT des matériaux connus en 1960 à leur température optimale d'utilisation T_u (H signifie que cette valeur de ZT n'est obtenue que sous champ magnétique)

7. Matériaux thermoélectriques récents

L'utilisation des différents processus pour minimiser la conductivité thermique a conduit à une augmentation notable des valeurs de ZT depuis ~1995 dans plusieurs familles de composés [4]. Sans vouloir être exhaustif, il est instructif, notamment pour les recherches futures, d'examiner quelques cas. Remarquons de suite que le facteur de mérite des anciennes familles a pu être augmenté, mais surtout que la **découverte de nouvelles familles a non seulement accru ZT mais a étendu les**

domaines de température ou la thermoélectricité peut être utilisée.

La valeur maximale de ZT dans plusieurs familles dépasse 1,3 (soit 30% d'amélioration en ~10 ans). La meilleure valeur atteinte dans un matériau massif est actuellement de 1,7 [5]. Les courbes des meilleures valeurs de ZT (T) actuellement obtenues dans des matériaux massifs sont reportées dans les figures 5 et 6 pour les types p et n respectivement.

Dans le domaine de températures moyennes 400-600K, les composés dérivés de Zn_4Sb_3 , de type p, ou les

skutterudites de type $\text{In}_x\text{M}'_y\text{Co}_4\text{Sb}_{12}$, de type n complètent les anciennes séries dérivées de Bi_2Te_3 ou de PbTe tout en possédant des valeurs de ZT supérieures ($\sim 1.4-1.7$). Pour les matériaux de type n, les semi Heusler, type ZrNiSn , ont des valeurs de ZT élevées dans le domaine 500-700K. Dans le domaine des températures plus élevées 600-900K les skutterudites ou les clathrates de type $\text{M}_8\text{Ga}_{16}\text{Ge}_{30}$, à base de terres rares ou de terres alcalines, ont des valeurs de ZT supérieures à celles des dérivés de PbTe , notamment aux plus hautes températures et existent en type p ou n. Enfin, au dessus de 1000K, la phase de Zintl $\text{Yb}_{14}\text{MnSb}_{11}$ [6], de type p, ou $\text{LaTe}_{1.4}$, de type n, ont des valeurs de ZT nettement supérieures à celles des systèmes Si-Ge. A ces hautes

températures, les phases de Chevrel ou les oxydes ont un potentiel intéressant, leurs valeurs de ZT restent cependant faibles actuellement.

Observons que les performances améliorées de ces nouveaux matériaux ont été obtenues - dans des structures cristallines complexes (clathrate, $\text{Yb}_{14}\text{MnSb}_{11}$, phases de Chevrel, oxydes à désaccord de paramètres ("misfits"), - par la présence de cages vides dans la structure (skutterudites, clathrates, penta-tellurures ..), - avec des défauts de stœchiométrie (skutterudites, Zn_4Sb_3 , oxydes), - par des substitutions atomiques élaborées (semi-Heusler).

Nous allons brièvement examiner quelques cas

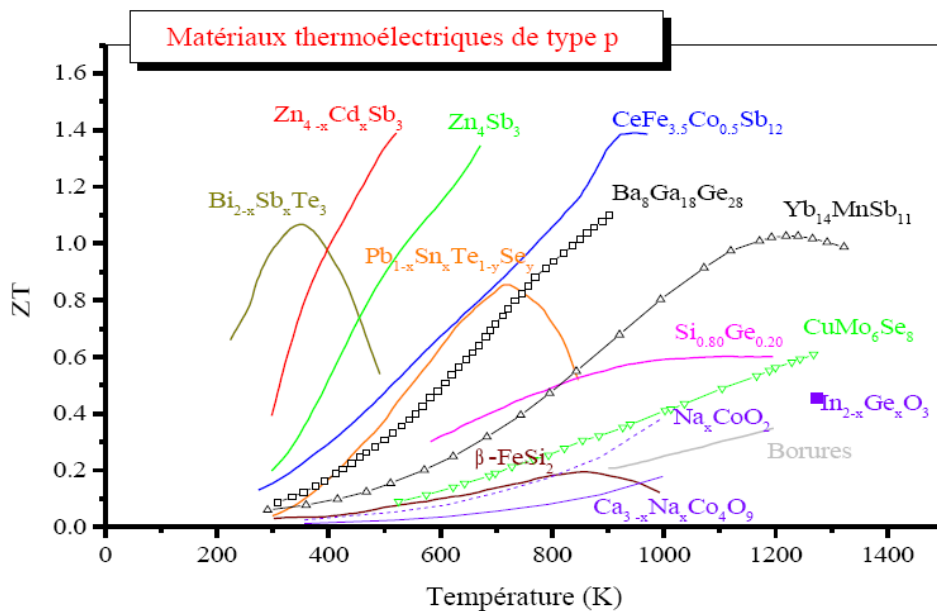


Figure 5: Plus grandes valeurs de ZT pour les matériaux de type p (non exhaustifs)

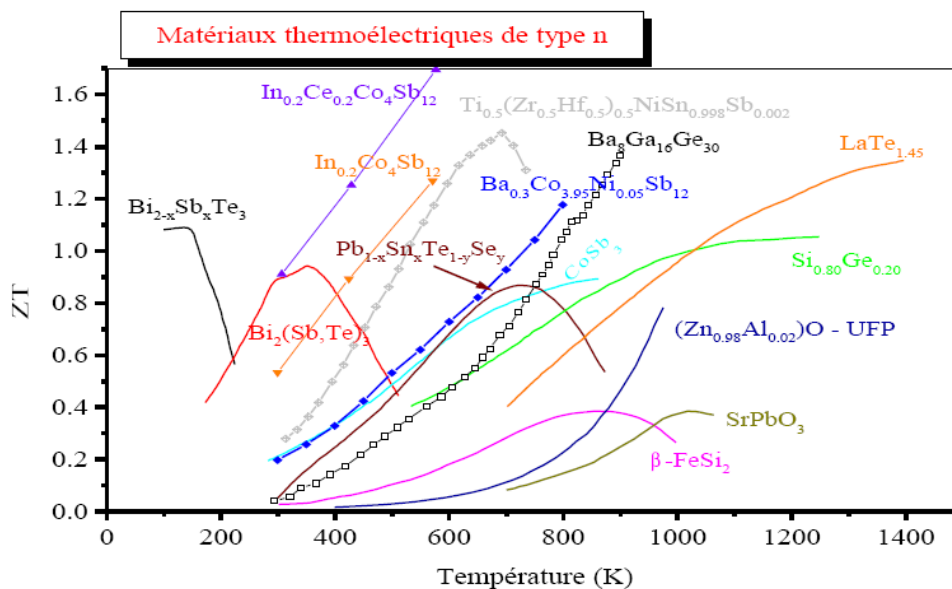


Figure 6: Plus grandes valeurs de ZT pour les matériaux de type n (non exhaustifs)

7.1. Matériaux à cage

Ce sont des matériaux ayant une structure rigide, responsable de la conductivité électrique, et possédant de larges cages vides. Lorsque ces cages sont remplies avec des atomes lourds, ceux-ci, faiblement liés à la structure, peuvent vibrer de manière incohérente ("rattling") par rapport au réseau et introduire de nouveaux modes de vibrations. Les deux familles de matériaux à cage les plus étudiés et ayant conduit à une augmentation significative de ZT sont les skutterudites de type $A_yM_4X_{12}$ (A élément électropositif, M un métal d et $X=P, As, Sb$) et les clathrates intermétalliques de type $A_8Y_{16}X_{30}$ (X et Y étant présentement Ga et Ge).

* Skutterudites $A_yM_4Sb_{12}$

Dans cette série de matériaux nouveaux, la plus étudiée depuis 10 ans, l'atome électropositif A inséré dans la structure skutterudite cubique binaire type $CoAs_3$ conduit à une structure cubique remplie $A_yM_4Sb_{12}$. Des atomes de degré d'oxydation variable peuvent être insérés (monovalents K, Na, divalents Ca, Sr, Ba, trivalents La, Ce, Pr, Nd, Th, U, valence mixte avec Yb [7]). le taux d'occupation du site de A dépend de la nature de A (~ 1 avec K, Na, il est inférieur à 1 avec les terres rares) mais dépend aussi fortement de la nature du métal M.

On a donc au moins 2 effets pouvant affecter λ_L : l'atome A étant peu lié, peut vibrer dans la cage, ce qui a été observé par diffraction de neutrons avec des paramètres de déplacement thermique (facteurs de Debye-Waller) environ trois fois plus élevés pour la terre-rare que pour le pnictogène ou le métal M (Fig. 7) [8] et un taux de lacunes variables dans $A_y(Fe,Co)_4Sb_{12}$.

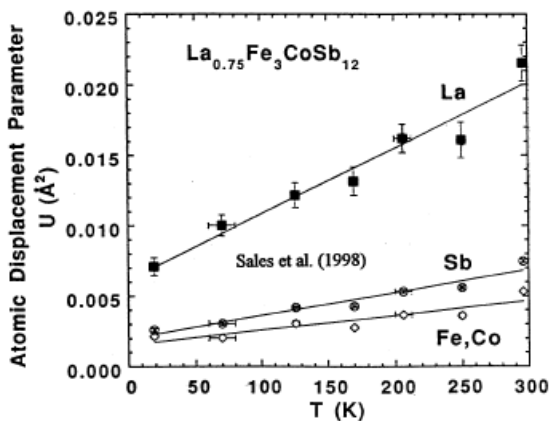


Figure 7: Paramètres de déplacement atomique dans la skutterudite $La_y(Fe,Co)_4Sb_{12}$

La conductivité thermique est fortement abaissée dans la structure ternaire remplie par rapport à celle des binaires et les plus faibles valeurs de λ_L ont été observées dans les antimoniures. Par des substitutions adéquates permettant de conserver le caractère semi-conducteur / semi-métallique, les valeurs de ZT sont

fortement améliorées depuis $\sim 0,4$ à 700K dans $CoSb_3$ à des valeurs atteignant 1,7.

Une caractéristique intéressante de cette famille est que de fortes valeurs du coefficient Seebeck peuvent être obtenues en type p et n, par diverses substitutions (voir figure 8), le passage du type p à n se produisant autour de 72 électrons par formule unitaire.

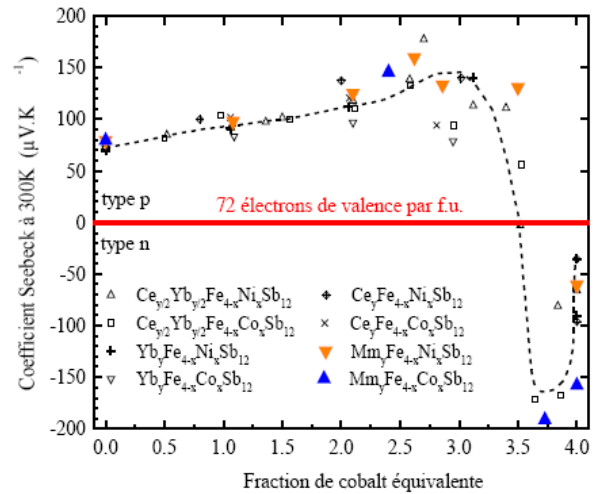


Figure 8: Évolution du coefficient Seebeck à 300K pour diverses substitutions dans $(MM')_y(Co)$

La possibilité d'obtenir des valeurs élevées de ZT dans un même domaine de température et pour des matériaux proches chimiquement et donc des comportements assez équivalents en fonctionnement est un point intéressant de cette série pour des applications.

* Clathrates de type $A_8Ga_{16}Ge_{30}$ (A=Ba, Eu)

La famille des clathrates intermétalliques dérivés du binaire A_8X_{46} comporte de nombreuses structures formées à partir de polyèdres complexes [9]: les atomes X forment des nano-cages (polyèdres divers X_{20}, X_{24}, \dots) remplies par l'élément électropositif A. L'effet de ces cages est de diminuer la conductivité thermique à des valeurs aussi faibles que dans les verres ou la silice. A l'heure actuelle, la structure de type I est la seule ayant conduit à des valeurs de $ZT \geq 1$ mais conduit à un caractère métallique. Pour obtenir l'état semiconducteur, il faut substituer l'élément X (Si ou Ge) par un élément accepteur des électrons du métal A. Si A est un élément divalent ceci nécessite de remplacer 16Ge par du Ga et on arrive à un matériau semi-conducteur $A^{2+}_8Ga_{16}Ge_{30}$ (structure cubique, groupe d'espace $Pm\bar{3}n$).

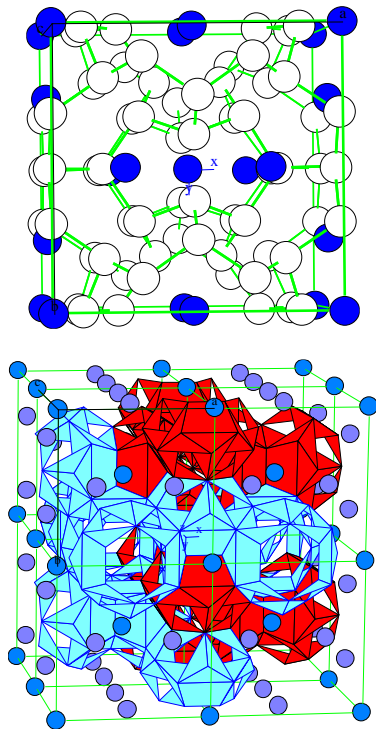


Figure 9: Structure type I des clathrates $AsGa_{16}Ge_{30}$:
 (● A, ○ Ge ou Ga) et les 2 types de polyèdres X20 et X24
 autour de A.

D'autres substitutions iso-électroniques (Al, In) conduisent aussi à des matériaux semiconducteurs. Il est aussi possible de jouer sur la stœchiométrie par exemple $Eu_8Ga_{16+x}Ge_{30-x}$ ou non-isoélectroniques telles que Zn qui conduit à insérer des lacunes [] pour compenser les charges dans $Ba_8Zn_xGe_{46-x-y}[]_y$. Seuls les composés à base d'euporium ou de baryum ont conduit aux valeurs élevées de ZT présentées dans la figure 6 pour Ba. La chimie de ces composés est loin d'être exhaustivement étudiée...

* pentatellurures

Deux séries de pentatellurures ont été examinées: Tl_2MTe_5 (M=Sn, Ge) et Re_2Te_5 . Dans la première série un des sites de Tl (site 1) possède des facteurs de déplacement anormalement élevés par rapport aux autres sites Tl(2), Te et Sn (analogue de la Fig. 7 pour les skutterudites). Des valeurs raisonnablement élevées $ZT \sim 0,6$ à 300K ont été obtenues sans que les possibilités offertes par les solutions solides ne semblent avoir été explorées. Cette série de matériaux souffre cependant, au niveau environnemental, de comporter un fort taux de tellure et de thallium et de n'avoir de bonnes valeurs de ZT que dans le type p. Dans la deuxième série, le composé avec 84 atomes par cellule unitaire orthorhombique (Gr. esp. Pbcn) a une structure présentant des similitudes avec les phases de Chevrel (clusters octaédriques $[Re_6]$ et de larges cages vides pouvant insérer des atomes (Fig.: 10a, b). Les types n et p sont réalisables selon les dopages.

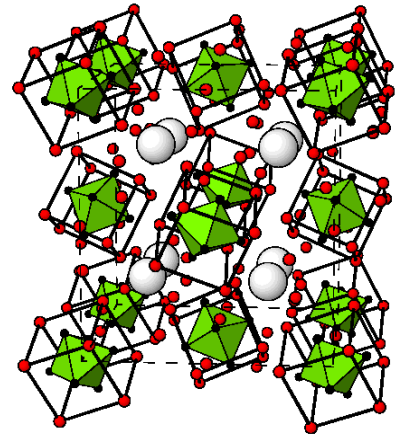


Figure 10 a : Structure de Re_6Te_{15} (cluster $[Re_6]$ entouré de 8 Te ● et cage O pouvant être inséré)

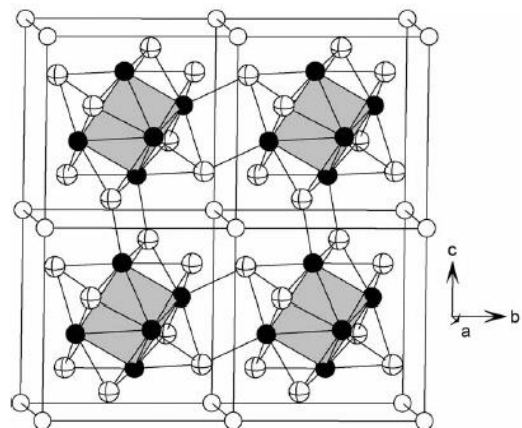


Figure. 10 b : Structure de Mo_6X_8 (Mo: ●, X: ○, les sites vides ○ peuvent être occupés par Pb, Cu etc..)

* phases de Chevrel

La structure des phases de Chevrel est composée d'un réseau tri-dimensionnel de clusters pseudo-cubiques Mo_6X_8 (X=S, Se, Te) (Fig. 10b) et grâce à la versatilité de la structure comporte de nombreux représentants. Ces clusters laissent des cavités ou des canaux à travers la structure qui peuvent être intercalés par divers éléments permettant de modifier les propriétés depuis l'état métallique dans Mo_6X_8 vers un état semi-conducteur. Les conditions pour des propriétés thermoélectriques sont donc rassemblées et un ZT de 0,6 à 1150K découvert dans $Cu_{3,1}Mo_6Se_8$ de la série $M_xMo_6Se_8$ (M=Cu, Cu/Fe, Ti). D'autres composés de cette série ont des facteurs de puissance élevés ce qui montre le potentiel de cette série pour découvrir de nouveaux matériaux thermoélectriques de type p ou n et stables à très hautes températures ($\sim 1200K$), potentiel accru par la possibilité de remplacer Mo par Ru, Rh, Re.

* phases à clusters Mo₉

Dans ces phases à clusters basées sur les motifs Mo₉Se₁₁, présentant des structures à tunnel l'insertion d'atomes (Ag, Cs, Cl.) dans des cages (figure 11)[10] conduit à des composés semiconducteurs ou semi-métalliques selon le nombre d'électrons par clusters. Ces différentes caractéristiques seraient donc favorables pour les propriétés thermoélectriques qui n'ont cependant pas été étudiées présentement.

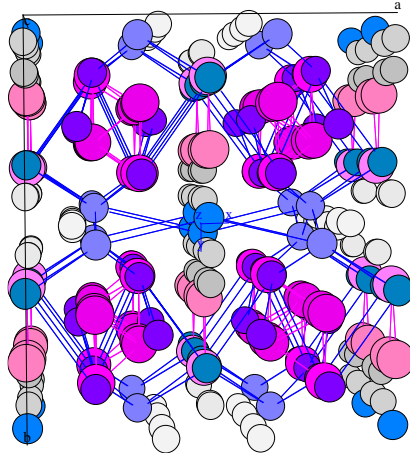


Figure 11 ; structure de Ag_{3.6}Mo₉Se₁₁ (Mo en violet, Se en bleu et Ag en gris).

7.2. Phases lacunaires

* Semi- Heusler

La structure des phases de Heusler X₂YZ (Gr. esp. *Fm* $\bar{3}$ *m*) consiste en 4 réseaux cubique face centrée interpénétrés. Si un des sites équivalents(1/4, 1/4, 1/4) ou (3/4, 3/4, 3/4) est vide, la phase semi-Heusler (Gr. esp. *F* $\bar{4}$ *3m*) se forme.

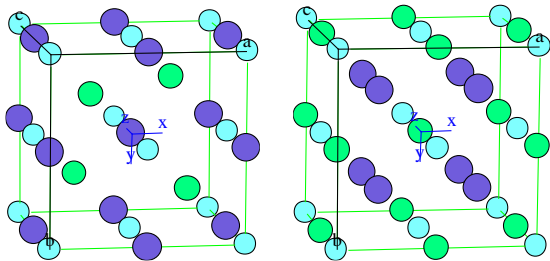


Figure 12: Structures des phases de Heusler - semi Heusler NiSnZr (gauche) et Heusler Ni₂SnZr (droite) (● Sn, ● Zr, ● Ni)

Parmi ces composés, ceux avec 18 électrons de valence ont une structure de bande de type semiconducteur et de forts coefficients Seebeck. La diminution de la conductivité thermique est alors obtenue par des substitutions complexes favorisant la diffusion des phonons par les fluctuations de masse.

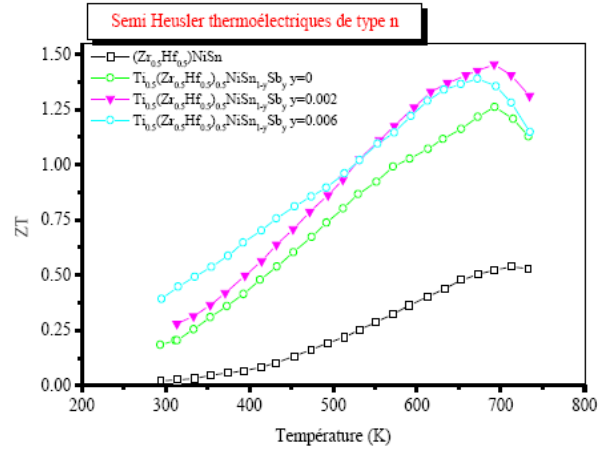


Figure 13: Effet de diverses substitutions dans le semi Heusler ZrNiSn.

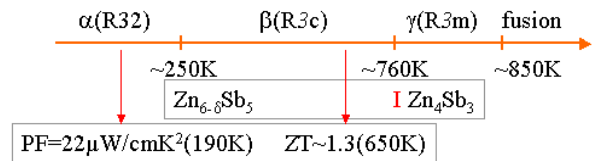
Par exemple, partant de TiNiSn (ZT<0,4 à 750K) et de ZrNiSn le composé, de type n, Hf_{0.5}Zr_{0.5}Ni_{0.8}Pd_{0.2}Sn_{0.99}Sb_{0.01} présente un maximum de ZT à 800K de 0,7 et le composé de type n Ti_{0.5}(Zr_{0.5}Hf_{0.5})NiSn_{0.98}Sb_{0.02} possède un ZT>1,4 à 700K.

Dans cette série, les composés de type LnPdSb (Ln=Sr, Y ou une terre rare, particulièrement Er) possèdent des coefficients Seebeck très forts à basse température (< 300K) qui pourraient conduire par l'étude de substitutions à des composés intéressants pour la réfrigération.

* Zn₄Sb₃

Zn₄Sb₃ existe sous 3 variétés: α stable en dessous de -10°C, β de -10°C à + 492°C et γ de 492°C au point de fusion à 566°C. La phase β a permis d'obtenir des matériaux avec de fortes valeurs de ZT en type p avec des maxima de 1,25 à ~650K dans β - Zn₄Sb₃ augmentant par substitution à ZT=1,4 à plus basse température ~525K dans Zn_{3.2}Cd_{0.8}Sb₃. L'observation de lacunes et d'interstitiels sur le site de Zn et de 2 types d'atomes Sb (ions sphériques Sb³⁺ et dimères Sb⁴⁺) entraînent un désordre important (en fait la composition est plutôt Zn_{6.8}Sb₅) qui contribue à la diminution de la conductivité thermique.

Les propriétés structurales et TE en fonction de la température sont résumées ci dessous:



Il ne semble pas que des dopages différents permettent d'obtenir le type n.

7.3. Solutions solides complexes dérivés d'anciens matériaux

* dérivés de Bi_2Te_3

A basse température, les propriétés thermoélectriques de CsBi_4Te_6 dopé par 0,05% de SbI_3 équivalent celles des anciennes compositions des alliages $\text{Bi}_{2-x}\text{Sb}_x\text{Te}_{3-y}\text{Se}_y$ avec un $ZT \sim 0,8$ à 225K susceptibles d'être utilisées pour la réfrigération.

Dans le système $(\text{Bi}_{0,25}\text{Sb}_{0,75})_2\text{Te}_3$ dérivé de Bi_2Te_3 , l'archétype des thermoélectriques utilisés dans des applications "niche" en réfrigération, la croissance de monocristaux fortement dopés a conduit à l'obtention de valeurs très supérieures à la valeur $ZT \sim 0,8-0,9$ autour de la température ambiante anciennement obtenue.

$\text{K}_2\text{Bi}_8\text{Se}_{13}$ forme deux phases : $\alpha\text{-K}_2\text{Bi}_8\text{Se}_{13}$ (triclinique, gr. $P-1d$) et $\beta\text{-K}_2\text{Bi}_8\text{Se}_{13}$ (monoclinique, gr. $P 2_1/m$). La phase β possède une architecture faite de fragments de Bi_2Te_3 , CdI_2 et NaCl , et une occupation mixte de sites par K/Bi.

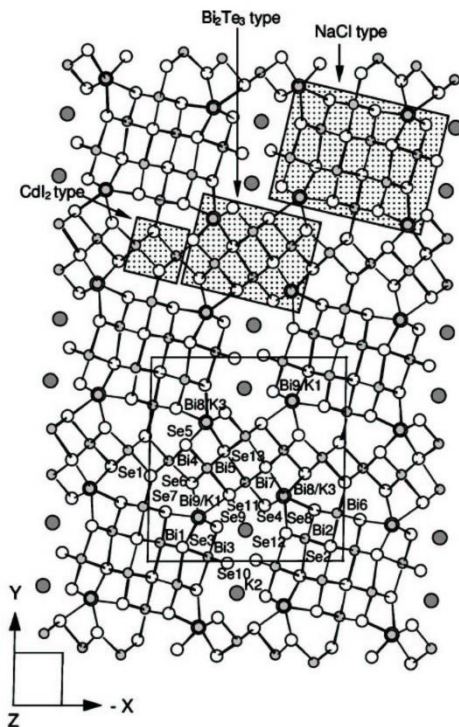


Figure 14 a : Structure de $\beta\text{-K}_2\text{Bi}_8\text{Se}_{13}$

La conductivité thermique y est très faible (structure complexe, atomes d'alcalin vibrant dans les tunnels), les dopages accroissent le coefficient Seebeck (type n) mais les valeurs actuellement atteintes de ZT sont insuffisantes pour être compétitives pour des applications en refroidissement.

* dérivés de PbTe et TAGS (Te-Ag-Ge-Sb)

La série de matériaux de structure cubique ($\text{Fm}\bar{3}m$) $\text{AgPb}_m\text{SbTe}_{2+m}$ dopé a donné naissance à des semiconducteurs de type n avec de fortes valeurs de ZT lorsque $m=10$ ($ZT=1$ à 700K) ou $m=18$ ($ZT=2,2$ à 800K) [11].

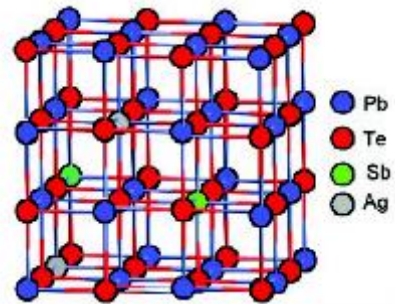


Figure 14 b : Structure cubique de $\text{AgPb}_m\text{SbTe}_{2+m}$

Des valeurs plus faibles ont été observées dans les échantillons déficitaires en Ag et recuits: $\text{Ag}_{1-x}\text{Pb}_{18}\text{SbTe}_{20}$ ($ZT= 1,07$ à 670K pour $x= 0,4$, ou $ZT=0,33$ pour $x=0,3$). La microscopie en transmission à haute résolution montrait des nano-cristaux de phase riche en Ag-Sb dans une matrice riche en Pb-Te, que d'autres auteurs présentaient comme des nano-clusters de $\text{AgPb}_3\text{SbTe}_5$ dans la matrice de PbTe . De tels nano-phases pourraient être responsables des valeurs élevées de ZT prédites théoriquement et observé dans des super-réseaux de puits quantique, ou de "nano dots", etc.. (voir ci dessous nano-matériaux). Le contrôle difficile de la nature, taille et dispersion de ces nano-phases pourraient être responsables de la disparité des résultats de la littérature. Le rôle des recuits n'a pas été élucidé ni d'un éventuel cyclage en température qui pourrait induire un grossissement de ces nano-objets.

7.4. Autres matériaux intermétalliques

Récemment plusieurs composés à base d'antimoine ont présenté de bonnes caractéristiques thermoélectriques, cette caractéristique semble due à la propriété de Sb de diffuser les phonons de manière plus efficace qu'un ion plus léger de même configuration électronique (nous avons déjà parlé des skutterudites et de Zn_4Sb_3). De plus, les matériaux constitués de métalloïdes et d'éléments légèrement plus électropositifs (phases de Zintl) semble avoir de grands ZT .

* $\text{Yb}_{14}\text{MnSb}_{11}$

La structure tétragonale d' $\text{Yb}_{14}\text{MnSb}_{11}$ $I4_1/acd$ complexe (Fig. 15) formé de diverses unités structurales, la flexibilité pour accommoder divers éléments (laissant ouverte la possibilité d'amélioration ultérieure) ont conduit à l'obtention d'un ZT supérieur à 1 dans ce matériau de type p.

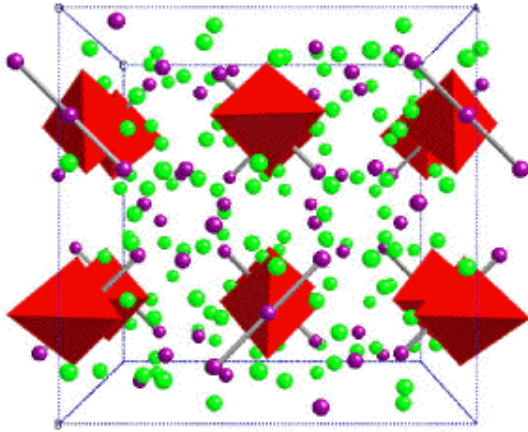


Figure 15: Structure cristalline de $Yb_{14}MnSb_{11}$

* $Mo_3Sb_{7-x}Te_x$ ($x=1,5$ et $1,6$)

La structure Ir_3Ge_7 (Gr. esp. $Im\bar{3}m$) des composés $Mo_3Sb_{7-x}Te_x$ ($x=1,5$ et $1,6$) forme des chaînes infinies dans les trois directions Avec un ZT de 0,8 à 1050K, $Mo_3Sb_{5,4}Te_{1,6}$ est supérieur aux meilleurs matériaux de type p à base de Si-Ge.

* autres composés de Sb

A la phase Mg_3Sb_2 de structure type $\alpha-La_2O_3$ inverse (Gr. esp. $P\bar{3}m1$) a été initialement attribué un ZT de 0,55 à 600K qui a été infirmé récemment avec un maximum de $ZT=0,21$ à 875K. De plus la phase perd du Mg et s'oxyde au dessus de 900K en faisant un matériau peu prometteur pour des applications thermoélectriques.

La structure de $CaZn_2Sb_2$ est la même que celle de Mg_3Sb_2 et le matériau s'oxyde aisément (le produit final contient ~90% de phase $CaZn_2Sb_2$).

* $Mg_2Si_{1-x}Sn_x$

Dès les années 1960, l'Institut Ioffe montre que les composés Mg_2X ($X=Si, Ge, Sn$) sont semiconducteurs avec des propriétés de la structure de bandes devant favoriser des propriétés thermoélectriques. Divers types de substitution (Si, Ge, Sn, Al, Ca, Sb ...) ont été testés, le meilleur résultat étant obtenu lorsque la différence de masse contribue à diminuer la conductivité thermique, c.à.d. avec Si-Sn. La meilleure valeur de $ZT \sim 1.1$ était obtenue en 2006 dans le même Institut [12].

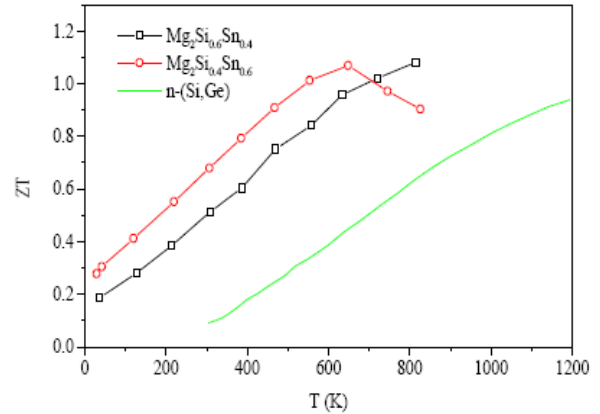


Figure 16 : ZT de $Mg_2Si_{1-x}Sn_x$ comparé au meilleur ZT de (Si,Ge) de type n

7.5. Oxydes

L'avantage principal attendu des oxydes réside dans leur stabilité chimique en atmosphère oxydante. Si de nombreux oxydes possèdent de grands coefficients Seebeck ($S > 100 \mu V/K$), de faibles conductivités thermiques ($\sim 1 W/K.m$) leurs performances sont actuellement limitées par des résistivités électriques beaucoup plus fortes que dans les matériaux TE précédemment décrits.

Parmi les oxydes de type p les plus prometteurs, les cobaltites à base de couches conductrices de CoO_2 (de type CdI_2) ont été le point de départ de l'intérêt pour les oxydes en thermoélectricité avec Na_xCoO_2 : un oxyde métallique avec un fort coefficient Seebeck [13].

Parmi ces cobaltites, le composé en couches $Ca_3Co_4O_9$ appartient en fait à la famille des oxydes lamellaires à structure désaccordée [14] ("misfit" en littérature anglo-saxonne) de formule générale: $[AO]_n[RS][CoO_2]_{b1/b2}$ comprenant des plans de CoO_2 (comme dans Na_xCoO_2) séparés par des couches AO de type NaCl (d'où la notation anglo saxonne RS Rock Salt) avec des valeurs possibles $n=2, 3$ et 4 .

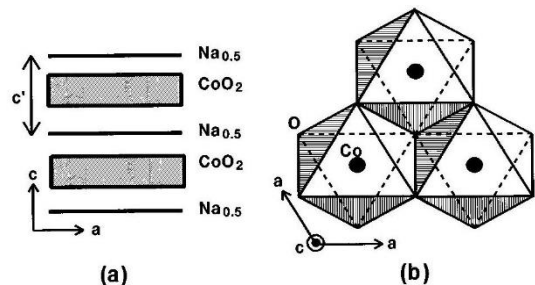


Figure 17 : Structure en couche (a) de Na_xCoO_2 et structure de la couche de CoO_2 (b)

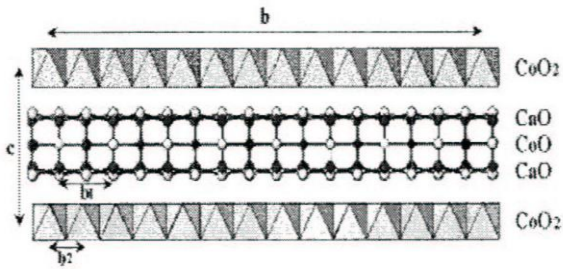


Figure 18 : Structure du composé à "misfit" $Ca_3Co_4O_9$ ($b \sim 8b_1 \sim 13b_2$)

La famille des oxydes lamellaires à structure désaccordée est particulièrement vaste (choix sur n et sur A, par exemple Ca, Bi, Sr... et remplacement de Co par Rh, ...) et de nombreux nouveaux matériaux sont envisageables, mais les valeurs de ZT restent faibles actuellement, principalement à cause de la trop forte résistivité électrique.

La plus forte valeur de ZT dans un oxyde a été obtenue sur un monocristal de Na_xCoO_2 (valeur estimée ~ 1.2 à 800K) de petite taille. L'impossibilité de faire croître des cristaux de grande taille en quantité suffisante pour des applications en génération de courant a amené de nombreuses études sur l'utilisation de procédés de texturation (avec cependant l'inconvénient que la conductivité électrique dans les plans CoO_2 diminue par rapport au monocristal).

D'autres familles d'oxydes ont également été étudiées pérovskites type $ACoO_3$, manganites $AMnO_3$, delafossite $CuFeO_2$, YBCO ($YBa_2Cu_3O_{6+y}$), ZnO, ruthénates $ARuO_3$ et A_2RuO_4 , In_2O_3 etc.. Les meilleures valeurs de ZT atteignent 0.4 en type p et 0.3 en type n dans les oxydes conventionnels et 0.56 dans les "misfits".

8. Nano-Matériaux Thermoélectriques

Les propriétés de transport dans les nano-structures et les macro-structures diffèrent notablement. La conductivité thermique des nano-structures telles que les super-réseaux (matériau alternant périodiquement des couches nanométriques de divers éléments ou substances) est plus faible que dans les matériaux massifs. Ceci constitue un aspect potentiellement positif pour la thermoélectricité. Cependant ces nano-structures, généralement obtenues par techniques de dépôts de films minces (épitaxie par jet moléculaire, cellules de Knudsen, laser pulsé, CVD) ne sont pas de taille à permettre des applications de grande taille, leurs faibles épaisseurs étant de plus peu compatibles avec l'établissement de gradients de température importants. Elles sont par contre adaptées au refroidissement en micro-électronique. Les propriétés de transport électronique sont aussi modifiées par les effets de dimensionalité sur la structure de bandes [15].

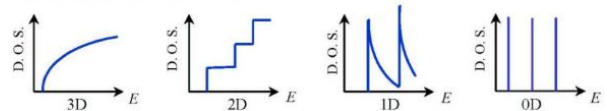


Figure 19 : Densité d'états pour un semiconducteur 3D, un puits quantique 2D, un nanofil ou nanotube 1D et un plot quantique 0D.

En résumé, alors que dans un matériau tridimensionnel, S , σ et λ étant reliés, il est difficile d'ajuster les trois quantités, dans les cas de plus basse dimensionalité, de nouvelles possibilités existent de les ajuster indépendamment. De plus, les nouvelles interfaces créées peuvent augmenter la diffusion des phonons plus que celle des porteurs de charges contribuant à l'accroissement de ZT.

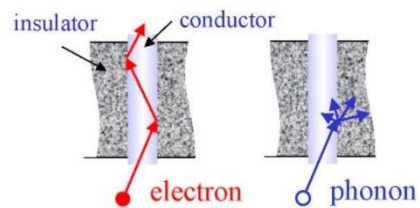


Figure 20 : Modèle proposé pour la diffusion des phonons et des porteurs de charge dans une structure 1D.

Il est assez remarquable que l'augmentation de ZT ait été prédite théoriquement avant d'avoir été observée expérimentalement.

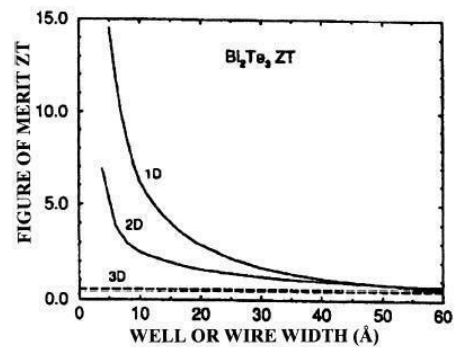


Fig. 21: Évolution de ZT calculée selon la dimensionalité.

Les preuves expérimentales des effets bénéfiques de diverses formes de nano-structures [16] concernent par exemple:

- des super-réseaux incluant de puits quantiques $PbTe-PbSeTe$ [17] dans lesquels des valeurs de ZT de 1,6 étaient calculées (au lieu de $\sim 0,4$ pour l'alliage massif)
- des super-réseaux de Bi_2Te_3/Sb_2Te_3 avec une valeur de ZT de 2,4 (au lieu de 1,0) [18]
- une diminution de la conductivité thermique d'une matrice de Ge avec des inclusions de nano-fils de Si fonction du rayon de ces nano-fils [19],

- une augmentation de la valeur de ZT de différentes compositions de Bi_2Te_3 par addition de nano-poudres de Bi_2Te_3 , [20]...

Ces deux derniers exemples, ainsi que le cas de $\text{AgPb}_m\text{SbTe}_{2+m}$ rapporté précédemment, montrent que l'étude de nano-composites pourrait permettre de bénéficier des performances thermoélectriques liées aux nano-tailles tout en pouvant disposer d'échantillons de tailles centimétriques, la mise en forme étant obtenue par pressage à chaud. Dans les études récentes cette mise en forme est généralement obtenue par Spark Plasma Sintering, une technique rapide évitant le grossissement des grains observés lors d'un pressage à chaud conventionnel.

Les prochaines années devraient être décisives pour la compréhension des mécanismes dans les nano-composites indispensable pour accroître les effets bénéfiques par rapport à ceux qui tendent à limiter les valeurs de ZT .

9. Applications thermoélectriques

9.1. Réalisation d'un "démonstrateur"

Tant en refroidissement qu'en génération d'électricité, le module TE schématique présenté en Fig. 2 doit être ré-examiné selon la Fig. 22. Il faut en effet établir des contacts électriques entre les matériaux p/n et le support du module, éviter la diffusion de ces contacts dans les matériaux (et le support), protéger les matériaux contre leur évaporation (s'ils travaillent sous vide: exemple spatial) ou leur oxydation, limiter les pertes de gradient par fuites thermiques, etc... Donc, là encore, des problèmes de matériaux (et de leur tenue en température) se posent qui ne seront pas les mêmes selon l'utilisation prévue.

En génération d'électricité la qualité des contacts électriques est absolument cruciale pour ne pas perdre le courant produit; C'est ainsi qu'un module commercial de Bi_2Te_3 prévu pour le refroidissement et soumis à un gradient de température produit peu de courant car ses contacts n'ont pas été optimisés à cet effet.

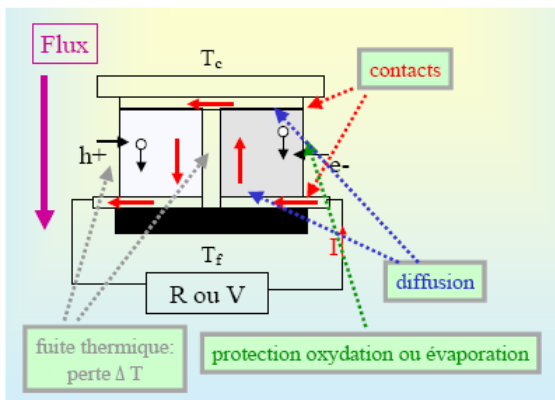


Figure 22: Quelques aspects de la réalisation d'un unicouple expérimental.

D'autre part, pour des applications en génération d'électricité, il est important de disposer de différents matériaux ayant de fortes valeurs de ZT dans différents domaines de température. En effet, ainsi que nous l'avons indiqué au début de ce texte, ZT (et donc l'efficacité) d'un matériau n'est pas constant dans un très grand domaine de température. Avec un matériau dans un gradient de température, on intègre donc tout un domaine où ZT est inférieure à sa valeur maximale (voir figure 23). Par contre si on superpose plusieurs matériaux chacun d'entre eux peut travailler dans un domaine de température plus restreint dans lequel la valeur de ZT reste forte. Cependant, cette technique pose de nouveaux problèmes car elle augmente les interfaces entre différents matériaux avec les risques d'inter-diffusion ou de réaction chimique. Il faut alors prévoir des barrières de diffusion avec des matériaux inertes et de très faibles résistances électriques.

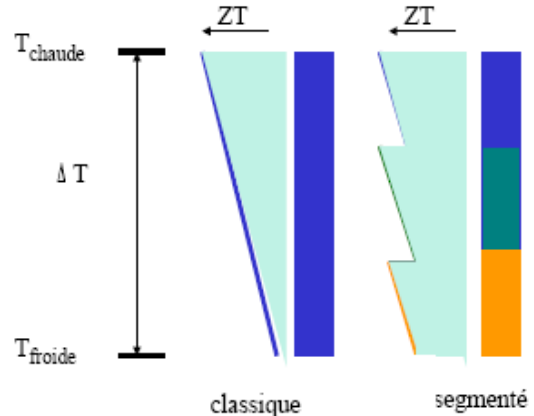


Figure 23 : répartition schématique de ZT le long d'une branche n ou p dans le cas classique à un matériau ou dans un système segmenté (ici 3 matériaux)

On imagine bien que tout ceci a un coût qui peut se justifier pour des applications spatiales par la fiabilité des systèmes thermoélectriques mais qui sera peu compatible avec des applications "grand public". Ceci fait que les applications commerciales actuellement développées concernent principalement le refroidissement. Cependant, les progrès des matériaux permettent maintenant d'envisager des dispositifs pour de la génération d'électricité dans divers domaines de températures, et de nombreux groupes industriels et laboratoires travaillent sur la réalisation de tels appareils (passer d'un bon ZT à un démonstrateur puis à un prototype prend du temps).

Dans les quelques exemples d'applications (non exhaustifs) notons que les puissances mises en jeu peuvent s'échelonner de quelques μW à des kW .

9.2. Quelques applications en refroidissement

Le marché le plus important concerne probablement les valises "pic-nic" refroidies par le courant continu des batteries des véhicules ou des petits frigo-bar de chambre en raison de l'absence de compresseur et donc de bruit.

Cette absence de bruit est également importante pour la climatisation des sous marins ...

Une société américaine a développé un refroidissement du siège des voitures à partir de TE (moins coûteux que de refroidir l'ensemble).

Une application intéressante concerne le couplage avec le photovoltaïque (PV) pour des valises médicales. Le courant est produit par PV et le froid par TE, ce qui est primordial pour conserver des vaccins dans des pays en voie de développement sans source d'électricité.

Le contrôle de la température de solutions ou pour le transport de greffons, en médecine fait aussi souvent appel à la TE.

Le refroidissement de chips d'ordinateurs a été l'objet d'études par INTEL et est actuellement utilisé par Apple. L'avantage est ici une forte puissance, très supérieure au ventilateur, qui peut être modulée localement (l'échauffement du chip n'est pas homogène) et dont la fiabilité est très supérieure à celle des ventilateurs.

Enfin, dans le domaine militaire, la climatisation des soldats (de -20°C à $+60^{\circ}\text{C}$) fait aussi appel à la thermoélectricité ainsi que le refroidissement des viseurs IR.

9.3. Quelques applications en génération d'électricité

Depuis la première lampe à pétrole russe (~1950) alimentant une radio, les applications bien qu'encore limitées se sont développées.

Dans ce domaine, les marchés existants sont aussi à base de Bi_2Te_3 autour de la température ambiante (thermalisation des bains, climatisation des soldats,), utilisation de la chaleur humaine pour l'alimentation de montres, (quid des pace-makers ?) mais sont des niches.

La surveillance utilise aussi la TE (alimentation des appareils de contrôle de l'activité de volcans). L'échauffement accidentel lors du stockage de produits chimiques, nucléaires pourrait aussi déclencher un courant dans une alarme.

Plusieurs sociétés travaillent à l'alimentation par TE de l'alimentation de fours (granulés de bois, ..).

Une application niche mais importante concerne l'alimentation en électricité des capsules spatiales par RTG (Radio-Thermo Generator) dans lesquelles la chaleur produite par désintégration nucléaire (PuO_2 généralement) est utilisée par un TE. Les avantages de ces systèmes sont multiples: non soumis aux vents particuliers comme les panneaux PV, fiabilité incomparable (certains fonctionnent depuis plus de 25 ans).

Plusieurs laboratoires travaillent sur le problème de la récupération d'électricité depuis la chaleur des pots d'échappement des voitures et camions (40% de l'énergie fournie par le gas-oil ou l'essence passe en chaleur). Les données actuelles indiquent que près de 300W ou de 1KW peuvent être récupérés, limitant d'autant l'usage de l'alternateur. Les profils de température des pots d'échappement montrent que les

matériaux fonctionnant entre 200 et 600°C sont les plus utiles car devant se placer après les pots catalytiques.

Les TE sont aussi utilisés pour produire de faibles courants contre la corrosion des jonctions de pipe-line ou pour l'alimentation de stations relais de télécommunication.

La TE sert également pour actualiser des alliages à mémoire de forme.

La liste des applications est appelée à s'allonger avec les performances des matériaux, mais aussi avec l'urgence de la demande en sources d'énergie durant le XXI^{ème} siècle. Il y a une demande croissante pour: a- la réfrigération, principalement le refroidissement local des équipements électroniques et, b- la production d'énergie électrique par utilisation de grands gradients thermiques, par exemple pour la construction de la voiture hybride, l'utilisation de la chaleur des gaz d'échappement ou de la combustion de déchets ménagers. L'amélioration récente des performances des matériaux a déjà permis d'atteindre une efficacité de 15% dans le domaine spatial (Jet Propulsion Lab. aux USA). Le renouveau des études sur la thermoélectricité (programmes DoE aux USA, NEDO au Japon, Chinois et Coréens) et notamment sur les aspects nano-structuraux devrait permettre de générer de telles efficacités à des coûts raisonnables. Notons en effet que **des puissances de l'ordre du W/cm^2 sont réalisables** par exemple avec des skutterudites n et p travaillant entre 400 et 50°C , mais aussi avec Bi_2Te_3 soit **quelques kW/m^2** .

Références :

- [1] Caillat T., Kisor A., Lara L., Jewell A., Sakamoto J. - *23rd International Conference on Thermoelectrics- Adelaide, Australia 25 – 29 July 2004*, (2004)
- [2] G. S. Nolas, J. Sharp and G. H. J., *Thermoelectrics, basic principles and new materials developments*, Springer 2001
- [3] Slack G.A. - *Thermoelectric Handbook – Ed. Rowe DM-Chemical Rubber*, Boca Raton FL, 407, 407 (1995)
- [4] Le lecteur intéressé pourra consulter: * Rowe D.M.- *Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano - : CRC Taylor & Francis*, p. (2005) - * Nolas G.S., Sharp J., Goldsmid H.J. - *Thermoelectrics: Basic principles and new materials developments - Springer series in Materials Science*, 45, (2001)
- [5] He T., Krajewski J.J., Subramanian M.A. - *US Patent - 20050229963 A1*, (2005)
- [6] Brown S.R., Kauzlarich S.M., Gascoin F., Snyder G.J. - *Chemistry of Materials*, 18, 1873 (2006)
- [7] Bérardan D., Godart C., Alleno E., Berger St., Bauer E. - *Journal of Alloys and Compounds*, 351, 18-23 (2003)



- [8] Chakoumakos B.C., Sales B.C., Mandrus D., Keppens V.- *Acta Crystallographica*, 55, 341 (1999)
- [9] Mudryk Ya., Rogl P., Paul Ch., Berger St., Bauer E., Hilscher G., Godart C., Noël H.- *Journal of Physics : Condensed Matter*, 14, 7991-8004 (2002)
- [10] la structure de ces phases a été étudiée par le groupe de Rennes: P. Gougeon, M. Potel et M. Sergent
- [11] Hsu K.F., Loo S.L., Guo F., Chen, W., Dyck J.S., Uher C., Hogan T., Polychroniadis E.K., Kanatzidis M.G. - *Science*, 303, 818 (2004)
- [12] Zaitsev V.K., Fedorov M.I., Gurieva E.A., Eremin I.S., Konstantinov P.P., Samunin A.Yu., Vedernikov M.V.- *Physical Review B*, 74, 045207 (2006)
- [13] Terasaki I., Sasago Y., Uchinokura K. - *Physical Review B*, 56, 12685 (1997)
- [14] découvertes par le groupe de Caen - *Physical Review B*, 62, 166 (2000)
- [15] Dresselhaus M.S., Dresselhaus G., Sun X., Zhang Z., Cronin S.B., Koga T. - *Physics of the Solid State*, 41, 5, 679 (1999)
- [16] Harman T.C. ; Taylor P.J. ; Walsh M.P. ; LaForge B.E.- *Science*, 297, 2229 (2002)
- [17] Hicks L.D.; Harman T.C.; Sun X.; Dresselhaus M.S. - *Physical Review B*, 53, 6, R10493 (1996)
- [18] Venkatasubramanian R.; Sivola E.; Colpitts T.; O'Quinn B. - *Nature*, 413, 597 (2001)
- [19] Yang R.; Chen G.; Dresselhaus M.S. - *Physical Review B*, 72, 125418 (2005)
- [20] Ni H.L.; Zhao X.B.; Zhu T.J.; Ji X.H.; Tu J.P. - *Journal of Alloys and Compounds*, 397, 317 (2005)

Redresseur à absorption de courants sinusoïdaux

Commande dans le repère triphasé

Jérôme FADAT

Enseignant Chercheur en Electrotechnique

ESIEE-Amiens, 14 Quai de la Somme – BP 10100 – 80 082 Amiens CEDEX 2

fadat@esiee-amiens.fr

YANNIS DORALI

Elève Ingénieur

Résumé : Cet article présente l'utilisation d'un convertisseur statique utilisé comme redresseur permettant de prélever un courant sinusoïdal sur le réseau tout en fournissant une tension continue. Ce redresseur est constitué d'interrupteurs semi-conducteurs commandés à l'amorçage et au blocage. Sa structure étant celle d'un onduleur de tension, c'est la commande qui va permettre d'assurer ces différentes fonctions. Le choix s'est porté sur une commande dans le repère triphasé (en opposition avec les commandes utilisant la transformation de Park) qui va être implantée dans un DSP.

1. Introduction

L'amélioration de la qualité de l'énergie sur les réseaux de distribution électrique, devient de nos jours, un enjeu important. En effet, les charges non linéaires dans les secteurs industriel et domestique, créant des courants non sinusoïdaux et/ou déphasés par rapport à la tension, engendrent des pollutions harmoniques, une augmentation de la valeur du courant efficace, une accélération du vieillissement de certains matériels. Ces charges non linéaires ou polluantes, sont principalement les redresseurs (à diodes ou thyristors), les gradateurs, le matériel informatique, les lampes fluorescentes, ...

Pour répondre à ce problème, différentes normes et recommandations ont été élaborées. Elles ont pour objectif de réduire cette pollution par l'utilisation de dispositifs de filtrage harmonique (passif et/ou actif) et de compensation de réactif [1]. De plus, l'utilisation de l'électronique de puissance associée à une commande appropriée, a permis de réaliser des convertisseurs moins polluants pour les conversions AC/DC et AC/AC. A titre d'exemple, la solution la plus répandue en monophasé, est l'utilisation de PFC (Power Factor Control) [2] qui associe un étage redresseur à diode (PD2) suivi d'un hacheur Boost (dans sa configuration la plus classique).

L'article propose d'étudier un redresseur triphasé qui agit sur la forme du courant prélevée sur le réseau tout en fournissant une tension continue en sortie. Le convertisseur retenu a la même structure qu'un onduleur

de tension (figure 1). Chaque interrupteur est constitué d'un IGBT (composant commandé à l'amorçage et au blocage) et d'une diode en anti-parallèle. Cet interrupteur est unidirectionnel en tension et bidirectionnel en courant. Ainsi, ce convertisseur, de part sa structure, est réversible.

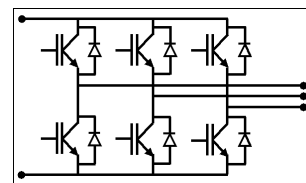


Figure 1 : Schéma de principe d'un onduleur de tension

La première application est dans le remplacement des redresseurs à diodes constituant l'étage d'entrée des variateurs de vitesse (figure 2). Ce montage, appelée dans la littérature anglo-saxonne "back to back converter", peut également être utilisé dans le domaine de la production d'énergie éolienne. Les deux cas les plus répandues sont :

- les machines asynchrones à double alimentation, où le système relie le rotor au réseau,
- les machines synchrones à aimants permanents, où le système est cette fois-ci relié au stator.

Il est possible d'imaginer d'autres applications, comme celle de contrôler la tension d'un bus continu où d'autres systèmes peuvent venir se connecter (figure 3).

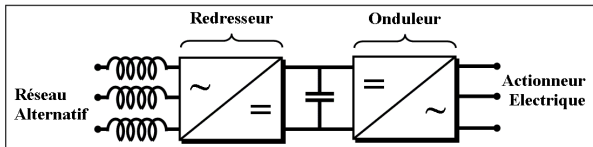


Figure 2 : 1^{ère} application : Chaîne de traction

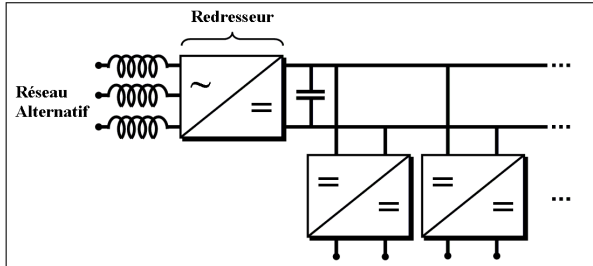


Figure 3 : 2^{ème} application : Contrôle du bus continu

Cet article propose dans un premier temps de décrire le fonctionnement du redresseur. Les deux parties suivantes exposent comment dimensionner les éléments passifs du circuit de puissance et comment calculer les paramètres des correcteurs utilisés pour contrôler la tension du bus continu et la forme des courants. Des simulations et une réalisation pratique permettent dans les deux dernières parties, de vérifier l'étude théorique.

2. Principe de fonctionnement

La structure étudiée est celle de l'onduleur de tension (figure 4) où le côté continu est une source de tension (condensateur en sortie). Afin de respecter les règles d'interconnexion des sources, l'entrée est une source de courant car ce convertisseur n'est constitué que d'interrupteurs semi-conducteurs. De plus, la présence de ces inductances est indispensable pour assurer le contrôle du courant absorbé par le redresseur. En effet, quelque soit la technique utilisée pour générer les ordres de commande (hystérésis, MLI, contrôle de l'amplitude du courant), le redresseur peut imposer, de manière indirecte, la forme du courant dans ces inductances en contrôlant les tensions $v_{ao}(t)$, $v_{bo}(t)$ et $v_{co}(t)$. En d'autres termes, le di/dt est imposé par la tension appliquée aux bornes des inductances qui est égale à la différence entre la tension réseau et celle en entrée du redresseur. La condition de bon fonctionnement est donc assurée s'il est possible de contrôler à tout instant, l'état des IGBT. Il faut alors que la tension de sortie, $v_{DC}(t)$ soit supérieure à la valeur de la tension composée maximale, $v_a(t) - v_b(t)$ par exemple, pour éviter d'avoir le fonctionnement d'un redresseur triphasé à diode.

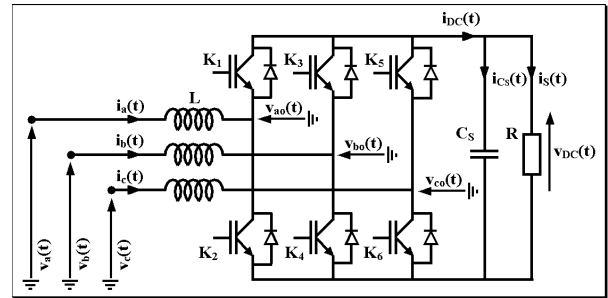


Figure 4 : Structure du redresseur étudié

Dans la suite, le contrôle de courant par MLI a été choisi pour la commande du redresseur. Cette technique permet de fonctionner à fréquence de découpage constante, mais nécessite le calcul de correcteurs. La figure 5 présente le schéma de principe où apparaît également la boucle de tension.

Le fonctionnement sera expliqué dans les paragraphes suivants. L'intérêt est de souligner que les courants de référence sont générés en multipliant $\sin(\theta)$ et $\sin(\theta - 2\pi/3)$ (calculés à partir des mesures des tensions simples du réseau) par la sortie de la boucle de tension, I_{max} .

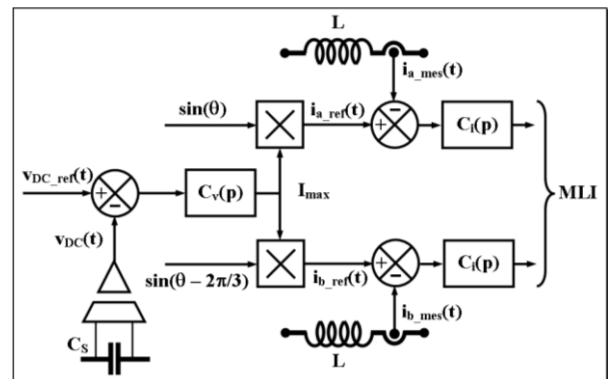


Figure 5 : Schéma de principe de la partie commande

Le fonctionnement à facteur de puissance unitaire ($Q = 0$ VAR) est obtenu en synchronisant les courants de référence par rapport aux tensions (déphasage, ϕ , nul). Ainsi, en mode redresseur, le courant, I_{max} , est positif et en mode onduleur, ce courant est négatif entraînant un déphasage de 180° par rapport au fonctionnement précédent.

Des commandes plus sophistiquées, sortant du cadre de cet article, utilisant par exemple la transformation de Park, permettent le contrôle de la puissance réactive. La commande contrôle ainsi l'amplitude et le déphasage du courant ($Q > 0$ ou < 0 VAR). Ce convertisseur peut ainsi gérer le transit de puissance tout en absorbant (ou fournissant) un courant sinusoïdal. Il devient alors évident que ce système peut avoir un impact important sur tout type de réseau (réseau de distribution ou réseaux embarqués).

De la figure 4, les grandeurs électriques s'écrivent :

$$v_a(t) = V_{\text{eff}} \sqrt{2} \sin(\omega t)$$

$$v_b(t) = V_{\text{eff}} \sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$v_c(t) = V_{\text{eff}} \sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

$$i_a(t) = I_{\text{eff}} \sqrt{2} \sin(\omega t - \phi) = I_{\text{max}} \sin(\omega t - \phi)$$

$$i_b(t) = I_{\text{eff}} \sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \phi\right)$$

$$i_c(t) = I_{\text{eff}} \sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3} - \phi\right)$$

Dans le cas de notre application, l'angle ϕ sera imposé à 0° .

Le fondamental des trois tensions en sortie de l'onduleur est représenté par :

$$v_{\text{ao fond}}(t) = \frac{1}{2} V_{\text{DC}} R_v \sin(\omega t)$$

$$v_{\text{bo fond}}(t) = \frac{1}{2} V_{\text{DC}} R_v \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$v_{\text{co fond}}(t) = \frac{1}{2} V_{\text{DC}} R_v \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

où R_v est le coefficient de réglage en tension (ou profondeur de modulation) qui définit le rapport entre les valeurs maximales des modulantes et de la porteuse.

Il est également possible de définir les signaux de commande (ou fonctions de modulation) [3], résultant de la comparaison entre la modulante et la porteuse :

$$f_{\text{ma}}(t) = \frac{1}{2} + \frac{R_v}{2} \sin(\omega t)$$

$$+ \sum_{h=1}^{\infty} \sum_{h'=0}^{\infty} A_{hh'} \left[\begin{array}{l} \sin\left[(h+h')\omega t + \phi_{1hh'}\right] \\ + \sin\left[(h-h')\omega t + \phi_{2hh'}\right] \end{array} \right]$$

$$f_{\text{mb}}(t) = \frac{1}{2} + \frac{R_v}{2} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$+ \sum_{h=1}^{\infty} \sum_{h'=0}^{\infty} A_{hh'} \left[\begin{array}{l} \sin\left[(h+h')\omega t + \phi_{1hh'} - \frac{2\pi}{3}\right] \\ + \sin\left[(h-h')\omega t + \phi_{2hh'} - \frac{2\pi}{3}\right] \end{array} \right]$$

Les modulantes ont l'allure suivante, dans le cas où la porteuse est comprise entre 0 et 1 (ce qui est le cas dans notre application) :

$$v_{\text{moda}}(t) = \frac{1}{2} + \frac{R_v}{2} \sin(\omega t)$$

$$v_{\text{modb}}(t) = \frac{1}{2} + \frac{R_v}{2} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$v_{\text{modc}}(t) = \frac{1}{2} + \frac{R_v}{2} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

Il est donc possible d'agir sur la tension en sortie de l'onduleur et indirectement sur le courant réseau, en modifiant l'amplitude de la modulante. Le tableau suivant représente tous les états possibles du convertisseur en fonction de $f_{\text{ma}}(t)$, $f_{\text{mb}}(t)$ et $f_{\text{mc}}(t)$:

N°	Fonctions de modulation			Tensions simples		
	f_{ma}	f_{mb}	f_{mc}	$v_{\text{ao}}(t)$	$v_{\text{bo}}(t)$	$v_{\text{co}}(t)$
0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	$2V_{\text{DC}}/3$	$-V_{\text{DC}}/3$	$-V_{\text{DC}}/3$
2	1	1	0	$V_{\text{DC}}/3$	$V_{\text{DC}}/3$	$-2V_{\text{DC}}/3$
3	0	1	0	$-V_{\text{DC}}/3$	$2V_{\text{DC}}/3$	$-V_{\text{DC}}/3$
4	0	1	1	$-2V_{\text{DC}}/3$	$V_{\text{DC}}/3$	$V_{\text{DC}}/3$
5	0	0	1	$-V_{\text{DC}}/3$	$-V_{\text{DC}}/3$	$2V_{\text{DC}}/3$
6	1	0	1	$V_{\text{DC}}/3$	$-2V_{\text{DC}}/3$	$V_{\text{DC}}/3$
7	1	1	1	0	0	0

$f_{\text{ma}}(t) = 1$ pour K_1 "ON" et K_2 "OFF",

$f_{\text{ma}}(t) = 0$ pour K_1 "OFF" et K_2 "ON",

$\Leftrightarrow v_{K_2}(t) = f_{\text{ma}}(t) V_{\text{DC}}$

Les paragraphes suivants vont donc décrire plus précisément le fonctionnement des différentes boucles. Des simulations permettront de vérifier le calcul des correcteurs et une réalisation pratique sera effectuée pour valider l'approche théorique.

3. Boucle de courant

Le contrôle du courant utilisant la technique de la MLI, impose le calcul de correcteurs. Il faut donc définir la fonction de transfert du système, puis les correcteurs de type PI. Ceux-ci seront calculés en s'imposant des critères de stabilité dans une étude en boucle ouverte. Ce paragraphe se terminera en donnant des informations sur le choix de l'inductance.

3.1. Fonction de transfert

La détermination de la fonction de transfert se calcule en écrivant la loi des mailles à l'entrée du redresseur et en faisant l'hypothèse du premier harmonique :

$$i_a(p) = \frac{v_a(p) - v_{\text{ao fond}}(p)}{L p}$$

La tension réseau se comporte comme une perturbation vis à vis de la boucle de courant. La commande développée dans cet article, consiste à compenser cet effet par une entrée supplémentaire notée, $v_{\text{comp}}(p)$. Le terme $1/(L p)$ sera noté $H(p)$.

La commande du convertisseur va agir sur le fondamental de $v_{\text{ao}}(t)$ et donc indirectement sur le courant traversant l'inductance. Il faut alors déterminer

la relation entre le signal de commande et la tension en sortie du redresseur, $v_{DC}(t)$.

A partir de l'expression du fondamental de $v_{ao}(t)$:

$$v_{ao\ fond}(t) = \frac{1}{2} V_{DC} R_V \sin(\omega t)$$

en supposant un signal de commande de la forme :

$$v_{cmde}(t) = V_{cmde_max} \sin(\omega t)$$

et en rappelant que R_V est le rapport entre V_{cmde_max} sur V_{pmax} (amplitude de la porteuse), il est possible de définir l'ensemble "onduleur + MLI", comme étant un simple gain noté G_0 et égal à $V_{DC}/2/V_{pmax}$. Un terme supplémentaire correspondant à un retard, peut être ajouté. Celui-ci montre que la modification du signal de commande ne peut pas être prise immédiatement en compte par la MLI.

Finalement, les différents blocs de la boucle de courant se trouvent rassemblés sur la figure suivante :

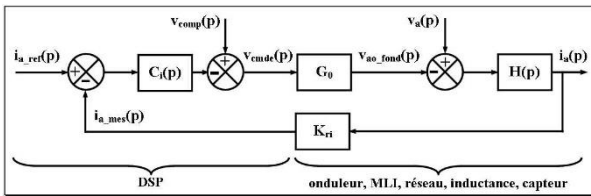


Figure 6 : Boucle de courant pour la phase "a"

où $C_i(p)$ représente le correcteur proportionnel intégral dont la forme est :

$$C_i(p) = K_{PI} + \frac{K_{II}}{p} = \frac{K_{II}}{p} \left(1 + \frac{K_{PI}}{K_{II}} p \right)$$

K_{ri} représente le gain du capteur de courant.

La première étape consiste à déterminer $v_{comp}(p)$ en écrivant la fonction de transfert en boucle fermée :

$$i_a(p) = [-v_{ao_fond}(p) + v_a(p)] H(p)$$

$$v_{ao_fond}(p) = (-\varepsilon(p) C_i(p) + v_{comp}(p)) G_0$$

$$\varepsilon(p) = (i_{a_ref}(p) - K_{ri} i_a(p))$$

Après calcul, il vient :

$$i_a(p) = \frac{G_0 C_i(p) H(p)}{1 + G_0 C_i(p) H(p) K_{ri}} i_{a_ref}(p) + \frac{(v_a(p) - G_0 v_{comp}(p)) H(p)}{1 + G_0 C_i(p) H(p) K_{ri}}$$

L'objectif étant que $i_a(p) = i_{a_ref}(p)$, il faut que la tension $v_{comp}(p)$ soit définie par :

$$v_{comp}(p) = \frac{v_a(p)}{G_0}$$

3.2. Calcul du correcteur

Ce calcul repose sur le schéma bloc de la figure 6 et en supposant que la compensation soit parfaite. L'étude

des éléments du correcteur, $C_i(p)$, va s'effectuer en boucle ouverte qui s'exprime par la relation :

$$T_{BO}(p) = G_0 C_i(p) H(p) K_{ri}$$

Il suffit maintenant de s'imposer les critères de stabilité pour s'assurer que le système soit stable en boucle fermée :

- le module de T_{BO} est égal à 1 pour $\omega = \omega_{ci}$:

$$|T_{BO}|_{\omega=\omega_{ci}} = G_0 \frac{K_{II}}{\omega_{ci}} \sqrt{1 + \left(\frac{K_{PI}}{K_{II}} \omega_{ci} \right)^2} \frac{1}{L \omega_{ci}} K_{ri}$$

$$K_{PI} \approx \frac{L \omega_{ci}}{G_0 K_{ri}}$$

- la marge de phase, M_ϕ , doit être inférieure à 0 pour $\omega = \omega_{ci}$ (la valeur habituelle est de -45°):

$$-180 = -90 - 90 + \text{Arctg} \left(\frac{K_{PI}}{K_{II}} \omega_{ci} \right) + M_\phi$$

$$K_{II} = \frac{K_{PI} \omega_{ci}}{\text{tg}(-M_\phi)}$$

Remarque : une forme classique pour représenter le correcteur de la boucle de courant est :

$$C_i(p) = K_i \left(\frac{1 + \tau_i p}{\tau_i p} \right)$$

La correspondance entre les éléments constituant les deux formes de correcteur est :

$$K_i = K_{PI} ; \tau_i = \frac{K_{PI}}{K_{II}}$$

3.3. Choix de l'inductance

Le calcul de l'inductance fait intervenir les paramètres classiques qui sont la fréquence, l'ondulation de courant la traversant et la tension appliquée à ses bornes. Il faut donc définir l'allure de cette tension, en se plaçant dans le cas le plus défavorable. Le tableau qui suit, montre l'état des fonctions de modulation et les valeurs des tensions simples sur une période de découpage. Ce point de fonctionnement est atteint lors du passage par zéro et par valeurs croissantes ($t = 0$ s, $t = T$, ...) de la tension simple $v_a(t)$, correspondant au cas le plus défavorable pour la phase "a".

N°	Fonctions de modulation			Tensions simples		
	f_{ma}	f_{mb}	f_{mc}	$v_{ao}(t)$	$v_{bo}(t)$	$v_{co}(t)$
7	1	1	1	0	0	0
6	1	0	1	$V_{DC}/3$	$-2V_{DC}/3$	$V_{DC}/3$
5	0	0	1	$-V_{DC}/3$	$-V_{DC}/3$	$2V_{DC}/3$
0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	1	$-V_{DC}/3$	$-V_{DC}/3$	$2V_{DC}/3$
6	1	0	1	$V_{DC}/3$	$-2V_{DC}/3$	$V_{DC}/3$
7	1	1	1	0	0	0

En émettant l'hypothèse que les trois modulantes soient considérées constantes lors d'une période de découpage et en supposant une porteuse symétrique, les formes d'onde peuvent se représenter comme sur la figure 7. La tension aux bornes de l'inductance n'est pas directement dessinée car elle est égale à $-v_{ao}(t)$ (hypothèse : $v_a(t) = 0 \text{ V} = \text{constante}$).

A partir des expressions des modulantes, il est possible de calculer les temps t_1 et t_2 , en posant $\omega t = 0 \text{ rad}$ pour les trois modulantes.

$$t_1 = T_d \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} + \frac{R_V}{2} \sin \left(\frac{-4\pi}{3} \right) \right) \right]$$

$$t_2 = T_d \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} + \frac{R_V}{2} \sin(0) \right) \right]$$

$$t_2 - t_1 = T_d \frac{\sqrt{3}}{8} R_V$$

Sachant que $\Delta V_L = V_{DC}/3$ et $\Delta t = t_2 - t_1$, l'ondulation de courant, $\Delta I_a = I_{a\max} - I_{a\min}$, peut maintenant être calculée par la formule suivante :

$$\Delta I_a = 2 \times \frac{V_{DC}}{3} \frac{\sqrt{3}}{8 f_d} R_V \frac{1}{L} \Leftrightarrow \Delta I_{a\max} = \frac{V_{DC}}{6,9 L f_d}$$

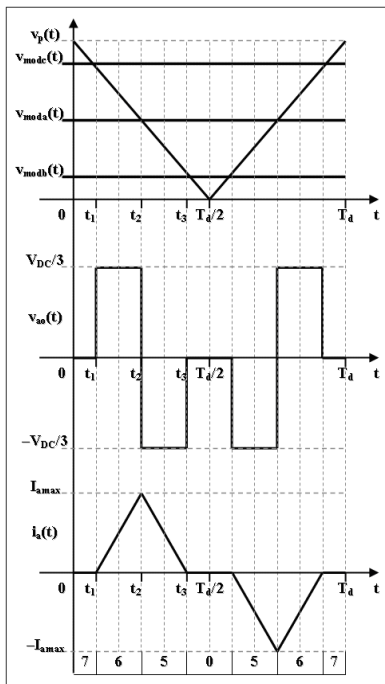


Figure 7 : Forme du courant pour la phase "a"

4. Boucle de tension

4.1. Fonction de transfert

En faisant l'hypothèse que la boucle de courant soit parfaitement réalisée, il est possible de remarquer que la puissance active à l'entrée ne dépend que de l'amplitude du courant ($\cos(\phi) = 1$). Le second objectif du montage

étant de garder la tension de sortie constante, une variation de charge R doit donc entraîner une variation de puissance. En conclusion et en supposant les pertes du convertisseur nulles, la sortie de la boucle de tension doit représenter la valeur maximale des courants $i_a(t)$ et $i_b(t)$ (figure 5).

La première étape est d'établir l'équation des puissances moyennes, sans tenir compte de la présence du convertisseur. La seconde est d'effectuer l'étude autour d'un point de fonctionnement afin de déterminer le correcteur par les outils de l'automatique linéaire. La dernière étape permettra, après identification, de déterminer l'influence d'une variation $\delta v_{dc}(t)$ sur $\delta i_{a\max}(t)$ (équivalent à la fonction de transfert recherchée).

L'expression des puissances moyennes est donc :

$$3 \frac{V_{\max} I_{\max}}{2} = V_{DC} \left(C_S \frac{d V_{DC}}{d t} + \frac{V_{DC}}{R} \right) = \frac{C_S}{2} \frac{d V_{DC}^2}{d t} + \frac{V_{DC}^2}{R}$$

La variation autour d'un point de fonctionnement s'écrit par :

$$\begin{cases} V_{DC} = V_{DC0} + \delta v_{DC}(t) \\ I_{\max} = I_{\max0} + \delta i_{\max}(t) \end{cases} \quad \begin{array}{l} X_0 : \text{régime permanent} \\ \delta x(t) : \text{petite variation} \\ \text{autour du point de} \\ \text{fonctionnement} \end{array}$$

Remarque : pour simplifier les calculs, le carré de la tension continue peut être représentée par :

$$V_{DC}^2 \approx V_{DC0}^2 + 2 V_{DC0} \delta v_{DC}(t) \quad (\delta^2 v_{DC}(t) \approx 0)$$

En injectant les variations de courant et de tension, il vient :

$$\begin{aligned} & \frac{3}{2} V_{\max} (I_{\max0} + \delta i_{\max}(t)) \\ &= \frac{C_S}{2} \frac{d (V_{DC0}^2 + 2 V_{DC0} \delta v_{DC}(t))}{d t} \\ & \quad + \frac{(V_{DC0}^2 + 2 V_{DC0} \delta v_{DC}(t))}{R} \end{aligned}$$

après identification :

$$\frac{3}{2} V_{\max} I_{\max0} = \frac{V_{DC0}^2}{R}$$

$$\frac{3}{2} V_{\max} \delta i_{\max}(t) =$$

$$\frac{C_S}{2} \frac{d (2 V_{DC0} \delta v_{DC}(t))}{d t} + \frac{2 V_{DC0} \delta v_{DC}(t)}{R}$$

en utilisant la transformée de Laplace, la fonction de transfert est :

$$\frac{3}{2} V_{\max} \delta i_{\max}(p) = 2 V_{DC0} \delta v_{DC}(p) \left(\frac{1}{R} + \frac{C_S}{2 p} \right)$$

$$G(p) = \frac{\delta v_{DC}(p)}{\delta i_{max}(p)} = \frac{3}{4} \frac{V_{max}}{V_{DC0}} \frac{R}{1 + \frac{R C_S}{2} p}$$

où le gain s'écrit : $K_G = \frac{3}{4} \frac{V_{max}}{V_{DC0}} R$

et la constante de temps : $\tau_G = \frac{R C_S}{2}$

La figure 8 représente la boucle de régulation de $v_{dc}(t)$ où la boucle de courant n'a pas été représentée car elle est supposée instantanée. Celle-ci se trouverait entre le correcteur, $C_v(p)$, et $G(p)$.

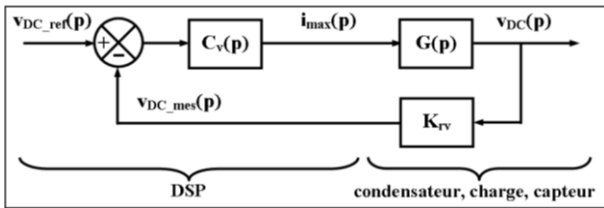


Figure 8 : Boucle de tension

$C_v(p)$ représente le correcteur proportionnel intégral dont la forme est :

$$C_v(p) = K_v \left(\frac{1 + \tau_v p}{\tau_v p} \right)$$

K_{rv} représente le gain du capteur de tension.

Remarque : il est envisageable de réguler le carré de $v_{DC}(t)$ pour faire apparaître une fonction de transfert linéaire. Néanmoins, il faut utiliser, dans la chaîne de mesure, une fonction "multiplication".

4.2. Calcul du correcteur

$G(p)$ étant un système du premier ordre, l'étude du correcteur $C_v(p)$ est effectué en boucle fermée en utilisant la méthode de compensation du pôle dominant. Cette méthode n'est valable que pour une charge fixe. Le point de fonctionnement choisi est celui de la charge nominale, présentant les plus fortes contraintes.

$$\tau_v = \tau_G = \frac{R C_S}{2}$$

La fonction de transfert en BF est donnée par :

$$T_{BF}(p) = \frac{C_v(p) G(p)}{1 + C_i(p) G(p) K_{rv}} = \frac{1}{K_{rv}} \frac{1}{1 + \frac{\tau_v}{K_v K_G K_{rv}} p}$$

$$\tau_{BF} = \frac{1}{\omega_c} = \frac{1}{2 \pi f_c} = \frac{\tau_v}{K_v K_G K_{rv}}$$

$$K_v = \frac{2 \pi f_{cv} \tau_v}{K_G K_{rv}}$$

La fréquence de coupure, f_{cv} , doit être inférieure à 300 Hz de manière à éviter de modifier cette ondulation qui est liée à la contrainte de forme du courant prélevé sur le réseau. De plus, les constantes de temps des boucles mises en cascade doivent être très différentes (la boucle interne, ici de courant, doit être beaucoup plus rapide que celle de tension).

4.3. Choix du condensateur

La taille du condensateur doit permettre de limiter les variations de tension pendant les échelons de charge. Sachant que le correcteur de tension agit sur ces variations et que la puissance fluctuante est nulle en triphasé, le choix de la valeur de la capacité doit faire intervenir les éléments de $C_v(p)$. En d'autres termes, la méthode proposée consiste à faire apparaître le courant $i_s(p)$ comme une perturbation. A partir de la figure 4, la loi des nœuds au niveau du bus continu, s'écrit :

$$i_{DC}(p) = i_{Cs}(p) + i_s(p)$$

A partir du bilan de puissance, le courant en sortie du redresseur peut s'exprimer en fonction du courant d'entrée, par la relation :

$$i_{DC}(p) \cong \frac{3}{2} \frac{V_{max} i_{max}(p)}{V_{DC0}} = \frac{2 K_G}{R} i_{max}(p)$$

Le courant circulant dans le condensateur de sortie, est égal à : $i_{Cs}(p) = p C_S v_{DC}(p)$.

Le schéma bloc de la figure 8 devient donc :

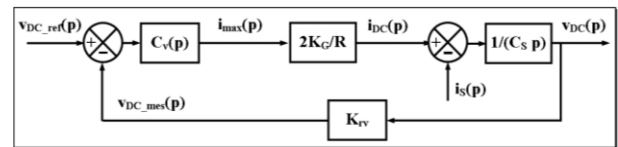


Figure 9 : Boucle de tension modifiée pour le choix de C_S

En considérant $v_{DC_ref}(p)$ nul, $i_{DC}(p)$ peut s'exprimer en fonction de la tension de sortie, par :

$$i_{DC}(p) = -K_{rv} \frac{2 K_G}{R} C_v(p) v_{DC}(p)$$

En injectant les résultats intermédiaires dans la relation suivante : $i_{Cs}(p) = i_{DC}(p) - i_s(p)$.

Il est possible d'exprimer l'impact des variations du courant de charge, $i_s(p)$, sur la tension $v_{DC}(p)$:

$$p C_S v_{DC}(p) = -K_{rv} \frac{2 K_G}{R} C_v(p) v_{DC}(p) - i_s(p)$$

$$\frac{v_{DC}(p)}{i_s(p)} = \frac{-1}{p C_S + K_{rv} \frac{2 K_G}{R} C_v(p)}$$

$$\frac{v_{DC}(p)}{i_s(p)} = \frac{-\frac{R}{4 \pi f_{cv}} p}{p^2 \frac{R C_S}{4 \pi f_{cv}} + p \tau_v + 1}$$

Il est maintenant possible d'estimer comment une variation de $i_s(p)$ va agir sur celle de $v_{DC}(p)$.

5. Simulations

Les deux derniers paragraphes donnent toutes les expressions permettant de choisir les composants passifs et les éléments des correcteurs. Ce paragraphe décrit donc des simulations effectuées avec le logiciel PSIM [4] pour valider l'approche théorique.

5.1. Le filtre d'entrée

La principale différence avec la présentation qui précède est l'utilisation d'un filtre LCL en entrée du redresseur (figure 10). Ce filtre du troisième ordre permet d'obtenir une bonne dynamique du courant pour une inductance faible, mais aussi, d'empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique (action du condensateur).

La réalisation pratique de ce filtre fait intervenir une résistance d'amortissement en série avec chaque condensateur. La fonction de transfert de ce filtre est :

$$i_a(p) = H_1(p) v_a(p) - H_2(p) v_{ao}(p)$$

$$H_1(p) = \frac{C_F L_1 p^2 + R_D C_F p + 1}{L_1 L_G C_F p^3 + R_D C_F (L_1 + L_G) p^2 + (L_1 + L_G) p}$$

$$H_2(p) = \frac{R_D C_F p + 1}{L_1 L_G C_F p^3 + R_D C_F (L_1 + L_G) p^2 + (L_1 + L_G) p}$$

Si R_D est négligée, la fréquence de résonance, f_{cp} , est donnée par :

$$f_{cp} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_G}{L_1 L_G C_F}}$$

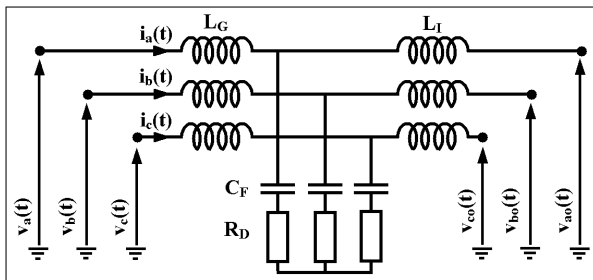


Figure 10 : Filtre LCL

Le calcul du correcteur de la boucle de courant s'effectue de la même façon que pour une inductance seule ($L = L_G + L_1$). En effet, les fonctions de transfert de ces deux filtres donnent des résultats identiques pour une fréquence inférieure à f_{cp} .

5.2. Application numérique

5.2.1. Filtre LCL

Le filtre a été réalisé par des inductances existantes. Celles-ci ont pour valeur 5 mH/5 A max et elles sont constituées d'un matériau capable de supporter des fréquences élevées. Dans la réalité, seules les

inductances L_1 devraient avoir cette propriété. Les seuls degrés de liberté étaient le choix de C_F et R_D . La contrainte était de respecter l'inégalité suivante :

$$f < f_{ci} < f_{cp} < f_d$$

⇔ $f_d = 8$ kHz : fréquence de découpage

⇔ $f_{ci} = 500$ Hz : fréquence de coupure de la boucle

de courant choisie suffisamment grande par rapport au 50 Hz pour permettre de suivre, avec une précision suffisante, le courant de référence. Les valeurs numériques définissant le filtre, sont donc :

- $L_1 = 5$ mH, $L_G = 2,5$ mH et $L = L_1 + L_G = 7,5$ mH,

- $C_F = 2$ μF, $R_D = 4,7$ Ω,

- $f_{cp} = 2756$ Hz.

5.2.2. Caractéristiques de l'entrée et de la sortie

Avant de calculer les éléments du correcteur, il faut choisir les grandeurs électriques en entrée et en sortie du redresseur en respectant les contraintes suivantes :

- $I_{a_max} = 5$ A (courant traversant les inductances),

- valeur possible de la résistance de sortie (en Ω) :

490	245	163,3	122,5	98	81,7	70
-----	-----	-------	-------	----	------	----

L'objectif est de définir l'amplitude des tensions V_a et V_{DC} , pour montrer les performances des boucles de régulation lors des variations de R. Le tableau suivant regroupe les informations pour effectuer ces choix. Les hypothèses pour les calculs sont :

- le courant d'entrée, I_{a_max} , est égal à 5 A,

- U_{ab_max} est la valeur maximale de la tension composée côté réseau,

- P est calculée pour un déphasage nul entre la tension et le courant côté réseau,

- la tension de sortie a été prise égale à $U_{ab_max} + 20\%$,

- la dernière colonne représente la valeur de R donnant P_{max} .

Tableau mettant en relation les grandeurs électriques de l'entrée et de la sortie avec $I_{a_max} = 5$ A :

V_a eff (V)	U_{ab} max (V)	P_{max} (W)	V_{DC} (V)	R (Ω)
100	244,9	1061	294	81,5
120	293,9	1273	353	97,8
140	342,9	1485	412	114
160	391,9	1697	470	130,3
180	440,9	1909	529	146,6
200	489,9	2121	588	162,9
220	538,9	2333	647	179,2
240	587,9	2546	705	195,5

$V_{a_eff} = 140$ V et $V_{DC} = 400$ V ont été choisies. Le point nominal est atteint pour $R = 122,5$ Ω, donnant une puissance de 1306 W, des courants de 4,4 A et 3,27 A, respectivement pour I_{a_max} et I_s .



5.2.3. Boucle de courant

La fréquence de coupure de la boucle de courant, f_{ci} , a été prise égale à 500 Hz. Afin d'obtenir une constante de temps, τ_i , de l'ordre de 1 ms (pour des raisons pratiques), la marge de phase, M_ϕ , a été choisi égale à -72° (l'ordre de grandeur habituel est de -65°).

Le calcul a donné les résultats suivants :

- $K_{PI} = 0,118$ et $K_{II} = 120$,
- ou dans la seconde forme :
- $K_i = 0,118$ et $\tau_i = 0,98$ ms.

Avec $L = 7,5$ mH, $f_d = 8$ kHz et $V_{DC} = 400$ V, l'ondulation de courant maximale est égale à 0,966 A.

5.2.4. Boucle de tension

La valeur usuelle de la fréquence de coupure, f_{cv} , de la boucle de tension est de 20 Hz. Cette valeur permet de ne pas modifier la contrainte de forme imposée par les boucles de courant. De plus, cela permet un fonctionnement correct des boucles mises en cascade.

Le convertisseur utilisé est l'onduleur didactique de la société Semikron, où le condensateur de sortie, C_S , est égal à 1,1 mF. En prenant la valeur nominale de la résistance de sortie, 122,5 Ω , les éléments du correcteurs sont égaux à :

- $K_v = 0,186$ et $\tau_v = 0,0674$ s.

Avec $C_S = 1,1$ mF, $V_{a,eff} = 140$ V et $V_{DC} = 400$ V, les paramètres de la fonction de transfert de la boucle de tension sont :

- $K_G = 45,48$ et $\tau_G = 0,0674$ s.

Avec toutes les valeurs numériques précédentes, la fonction de transfert permettant de tenir compte des variations du courant de sortie est :

$$\frac{v_{DC}(p)}{i_s(p)} = \frac{-0,4874 p}{0,0004874 p^2 + 0,06125 p + 1}$$

La réponse à un échelon ($\Delta I_s = 1$ A) est :

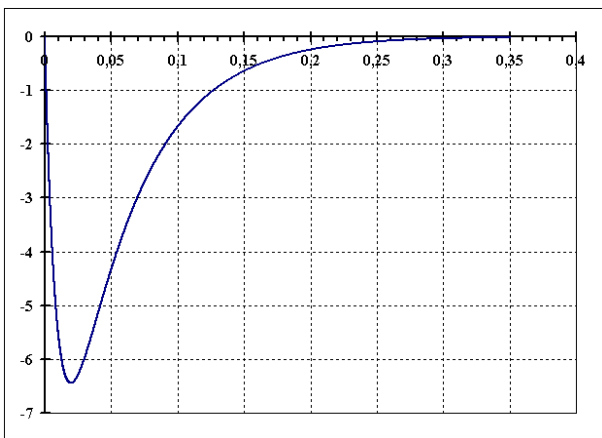


Figure 11 : Variation de V_{DC} pour $\Delta I_s(p) = 1$ A

La tension $v_{DC}(t)$ varie de $-6,4$ V pour un échelon du courant de sortie de 1 A et revient à 95 % de sa valeur nominale en 0,186 s (99 % en 0,269 s).

5.2.5. Présentation du montage simulé

La figure 12 représente la partie puissance.

Il est possible de voir, de gauche à droite, les éléments suivants :

- le réseau triphasé,
- la mesure des courants et des tensions,
- le filtre LCL,
- le redresseur,
- le condensateur et deux résistances en sortie,
- la mesure de la tension de sortie.

Dans la pratique, le redresseur sera commandé par un DSP (carte dSPACE et programmation sous Matlab-Simulink). Afin de tenir compte de la fréquence d'échantillonnage de celui-ci (20 kHz), des blocs ZOH (Zero Order Hold) ont été insérés entre la partie puissance et la partie commande.

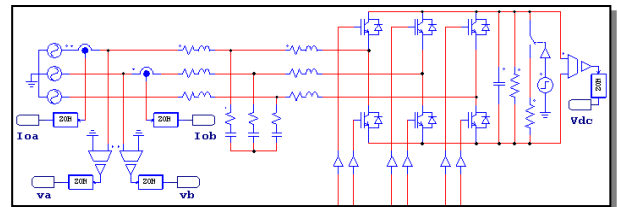


Figure 12 : Partie puissance

Dans les simulations les gains des capteurs sont pris égal à 1 car en pratique ces gains sont "compensés" par un coefficient dans le programme Simulink (travail sur les grandeurs réelles).

La figure 13 représente la commande rapprochée incluant la MLI ($f_d = 8$ kHz) et la gestion des temps morts, de l'ordre de 3 μ s, imposée par l'onduleur didactique. En pratique, la porteuse est comprise entre 0 et 1 ($V_{pmax} = 1$), d'où la partie "mise en forme" sur la figure.

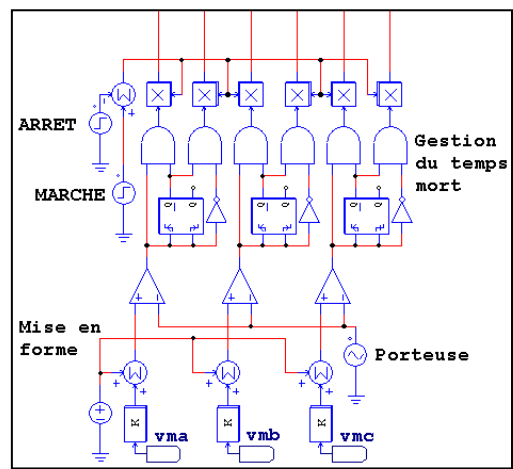


Figure 13 : MLI et temps morts

La figure 14 représente la boucle de tension :

- en entrée : mesure de la tension V_{DC} ,
- en sortie : amplitude du courant de référence, I_{max} ($= I_{a_max} = I_{b_max}$), pour les boucles de courant.

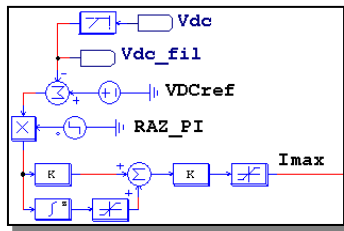


Figure 14 : Boucle de tension

La figure 15 représente les boucles de courant. Les courants de référence sont calculés en multipliant I_{max} par $\sin(\omega t)$ ou par $\sin(\omega t - 2\pi/3)$. Ces deux sinus ont été appelés Phase-Locked Loop (PLL). Enfin, il apparaît des compensations qui sont calculées à partir des tensions simples du réseau et de $v_{DC}(t)$ (§ 3.1).

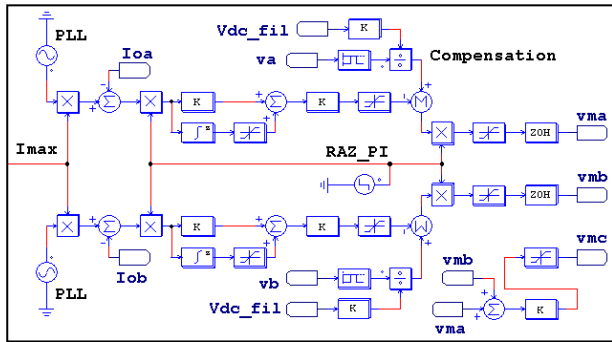


Figure 15 : Boucles de courant

Remarque : pour se rapprocher le plus possible de la pratique, tous les capteurs de tension sont en série avec un bloc permettant de filtrer le signal. De plus, la forme des correcteurs PI est un peu particulière mais elle permet de pouvoir donner une valeur unique au limiteur en série avec le bloc intégral, indépendamment des paramètres du correcteur. Enfin, un dispositif a été ajouté permettant de réinitialiser les correcteurs à zéro à chaque démarrage du redresseur (RAZ_PI).

5.2.6. Identification pour la boucle de tension

Cette première simulation utilise les boucles de courant seules (calcul de $C_i(p)$ au § 5.2.3). L'objectif est de modifier la valeur de l'amplitude du courant de référence pour observer la variation de $v_{DC}(t)$.

La figure 16 représente en gras la tension (échelle de gauche) et le courant de référence (échelle de droite). A $t = 1$ s le courant maximum passe de 4,4 à 5,4 A. La tension varie alors de 396,46 V à 439,66 V.

Après calcul et lecture sur la courbe, il vient :

- $K_G = 43,2$ et $\tau_G = 0,065$ s.

Les résultats sont semblables à la théorie, les éléments du correcteur de la boucle de tension seront donc ceux du § 5.2.4.

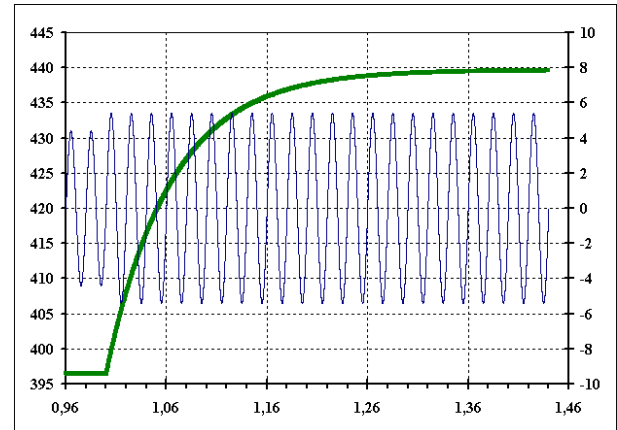


Figure 16 : Variation de $v_{dc}(t)$ lors de l'identification

5.2.7. Impact de charge sur le système complet

Lors de cette simulation, les boucles de tension et de courant sont mises en cascade. A $t = 0,58$ s, la résistance de sortie passe de 245 à 122,5 Ω . Les figures 17 et 18 montrent le courant prélevé au réseau et $v_{DC}(t)$.

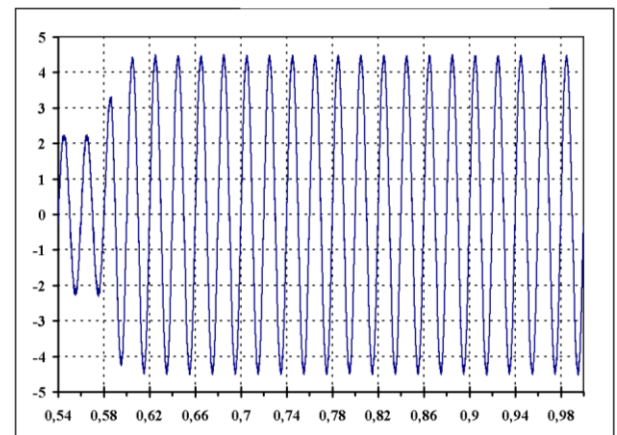


Figure 17 : Courant prélevé au réseau

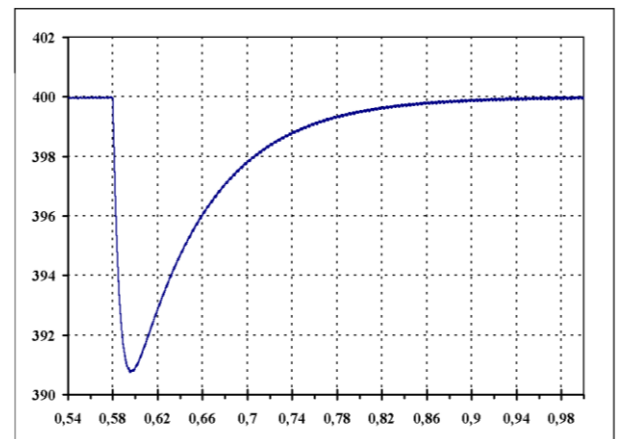


Figure 18 : Tension $v_{dc}(t)$ lors de l'impact de charge

La tension $v_{DC}(t)$ est bien égale à 400 V avant et après l'impact de charge. Le courant de sortie (traversant R) prend pour valeur successive 1,63 et 3,27 A, soit un ΔI_s de 1,64 A. Ce résultat correspond à un ΔV_{DC} théorique de -10,5 V (§ 5.2.4). La simulation donne un ΔV_{DC} de -9,3 V avec un temps de réponse (95 ou 99%) 17% plus grand que la théorie. La différence s'explique par le fait que, théoriquement, seule l'entrée $i_s(p)$ a été considérée ($v_{DC_ref}(p) = 0$ pour la détermination de ΔV_{DC}).

5.2.8. Forme du courant au point nominal

Les trois courbes suivantes montrent les courants de la phase "a" du côté réseau, dans le condensateur, C_F , composant le filtre et entrant dans le redresseur, pour le point nominal ($R = 122,5 \Omega$).

Le courant de la phase "a" prélevé sur le réseau, est bien sinusoïdal et en phase avec la tension ($\phi = 0^\circ$).

$$v_a(t) = V_{eff} \sqrt{2} \sin(\omega t)$$

$$i_a(t) = I_{eff} \sqrt{2} \sin(\omega t - \phi)$$

Le filtre LCL élimine les harmoniques dus au découpage. Les inductances qui le constituent, permettent le contrôle indirect des courants.

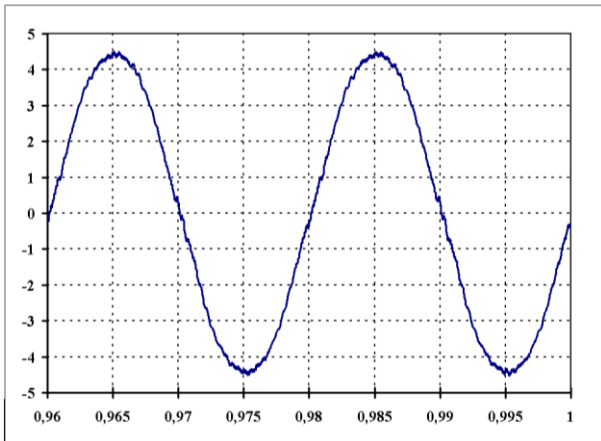


Figure 19 : Courant prélevé au réseau

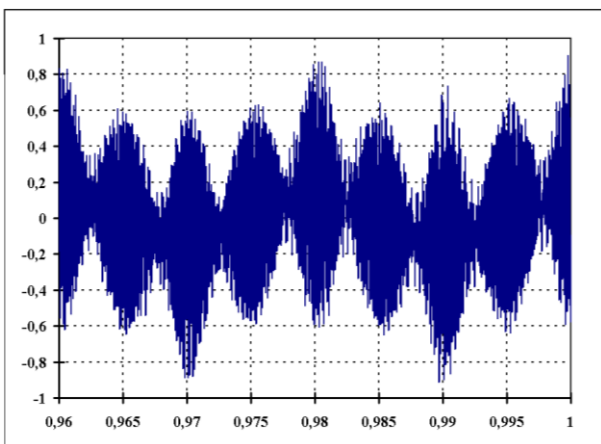


Figure 20 : Courant circulant dans le filtre LCL

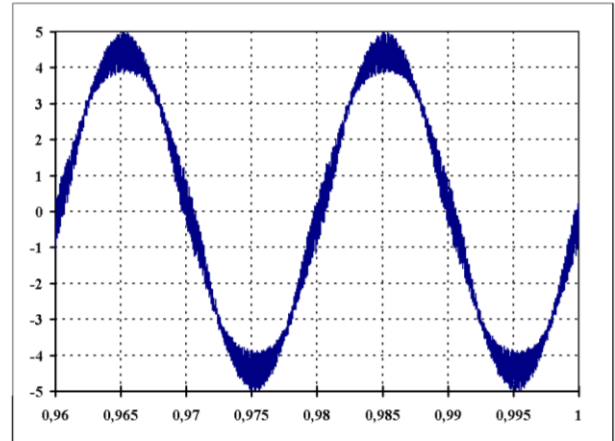


Figure 21 : Courant absorbé par le redresseur

La figure 22 montre un zoom du courant de la phase "a" au moment où la tension $v_a(t)$ est nulle. Ici le ΔI_{a_max} vaut 1,5 A au lieu de 0,97 A d'après le § 3.3. La raison de cette différence est due à la présence du filtre. En effet, la tension aux bornes de C_F et R_D est quasi-sinusoïdale (présence d'harmoniques de faible amplitude aux fréquences f_{cp} et f_d) d'amplitude très proche de $v_a(t)$, mais très légèrement déphasée par rapport à celle-ci à cause de l'inductance L_G . En conclusion, seule la tension appliquée aux bornes de L_1 correspond à l'allure de la figure 7 ($= -v_{ao}(t)$). La démarche du § 3.3 peut s'appliquer en remplaçant dans la formule de l'ondulation du courant L par L_1 . Le résultat théorique devient alors égal à 1,45 A.

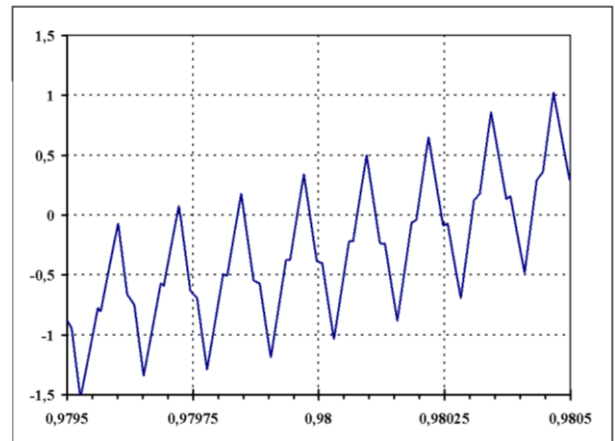


Figure 22 : Zoom sur le courant absorbé par le redresseur

6. Résultats expérimentaux

6.1. Présentation du montage expérimental

L'onduleur didactique de la société Semikron a été utilisé comme redresseur MLI (voir annexe). Les ordres de commande sont générés à partir des logiciels Matlab-Simulink, Control-Desk et de la carte temps réel dSPACE (DS1104).

Les schémas de commande ont donc été réécrits sous Simulink. La seule différence est dans la réalisation des blocs de la figure 15, appelés PLL. La figure 23 montre la méthode qui a été adoptée. Le fait que la tension réseau ait une fréquence constante, facilite la réalisation de cette fonction.

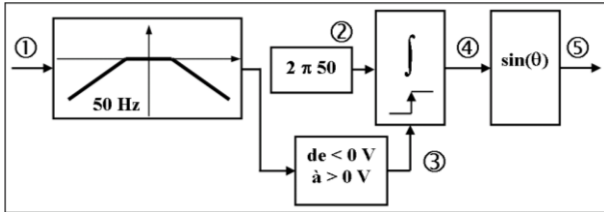


Figure 23 : Réalisation du bloc

Légende :

- ① : tension simple mesurée. Elle est ensuite filtrée par un filtre passe-bande centré sur 50 Hz
- ② : $2\pi 50$ représente la pulsation du réseau. L'intégration de cette constante permet d'obtenir θ ,
- ③ : impulsion mettant à zéro l'intégrateur 1 fois par période. A chaque passage par zéro par valeurs croissantes de la tension mesurée, θ est imposé à 0 rad,
- ④ : valeur de θ synchronisée par rapport à la tension simple mesurée,
- ⑤ : résultat de la PLL = $\sin(\theta)$

6.2. Formes d'onde

Les figures 24 et 25 montrent les résultats obtenus pour le point de fonctionnement nominal.

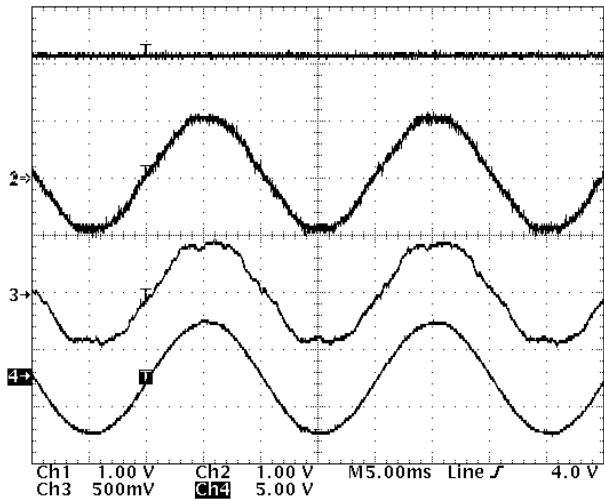


Figure 24 : $v_{DC}(t)$, $v_a(t)$, $i_a(t)$, $i_{a,ref}(t)$ (1 carreau = 5 ms ; 1 carreau = 200 V ou 5 A)

Légende : de haut en bas :

- 1 : tension réseau, $v_a(t)$,
- 2 : tension continue, $v_{DC}(t)$,
- 3 : courant prélevé au réseau, $i_a(t)$,
- 4 : courant de référence généré par le DSP.

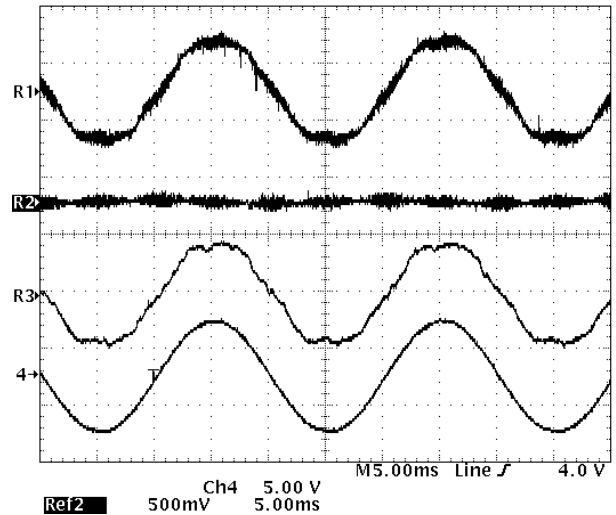


Figure 25 : Courants mesurés au point nominal (1 carreau = 5 ms ; 1 carreau = 5 A)

Légende : de haut en bas :

- R1 : courant absorbé par le redresseur, $i_{a_o}(t)$,
- R2 : courant traversant C_F ,
- R3 : courant prélevé au réseau, $i_a(t)$,
- 4 : courant de référence généré par le DSP.

Le courant de la phase "a" suit bien sa référence et est en phase avec la tension $v_a(t)$. Les courants mesurés à divers endroits du montage, sont eux aussi conformes à l'étude théorique. La mesure de l'ondulation du courant traversant L_I , a donné 1,4 A, pour $v_a(t)$ nulle.

Les figures 26 et 27 montrent la décomposition en série de Fourier de la tension et du courant sur le réseau. Ces résultats ont été obtenus par traitement avec Simulink à partir des courbes relevées à l'oscilloscope (période d'échantillonnage = 10 μ s). Les principaux résultats sont donnés dans le tableau ci-dessous :

	THD	Valeur maximale du fondamental
$v_a(t)$	6,34 %	199,7 V
$i_a(t)$	6,49 %	4,58 A

$$THD = \frac{I_H}{I_{RMS}} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}{I_{RMS}}$$

THD : taux total de distorsion harmonique

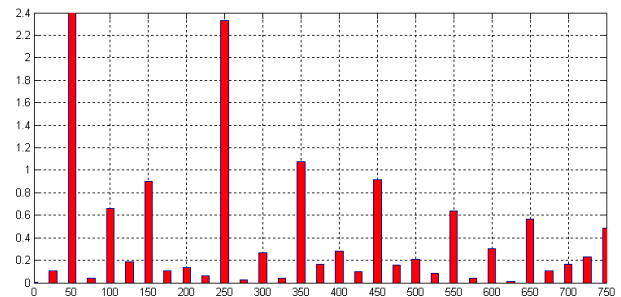


Figure 26 : Décomposition en série de Fourier de la tension réseau (% du fondamental en fonction de la fréquence)

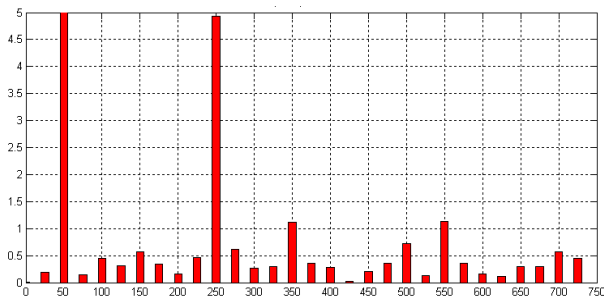


Figure 27 : Décomposition en série de Fourier du courant $i_a(t)$ (% du fondamental en fonction de la fréquence)

Sur les deux dernières figures, l'harmonique de rang 5 ($I_{H5 \max}$, $V_{H5 \max}$) reste le plus important. Celui-ci est dû au temps mort qui introduit une perturbation au niveau de la tension du redresseur. Dans [5], cette perturbation peut être considérée comme une onde carrée en phase avec le courant réseau, dont le fondamental est à la fréquence 50 Hz. En considérant que cette perturbation est indépendante du courant de charge, il est possible de la représenter dans le schéma bloc de la figure 6, comme une entrée supplémentaire au bloc H(p). Il devient alors possible, connaissant L_I , f_d , G_0 et la durée du temps mort, d'estimer l'amplitude de $i_{H5}(t)$ en fonction des paramètres du correcteur.

Dans le but de comparer ces résultats, un essai supplémentaire a été réalisé avec un pont de diode triphasé (PD3). Seules les inductances ont été laissées et placées entre le redresseur et le réseau ($L = 7,5$ mH par phase). La présence de ces inductances permet d'augmenter la durée de conduction des diodes et de respecter les règles d'interconnexion des sources (réseau et C_S sont des sources de tension).

Le résultat est donné sur la figure 28 où apparaît la tension du bus continu, la tension simple du réseau et le courant prélevé sur ce dernier.

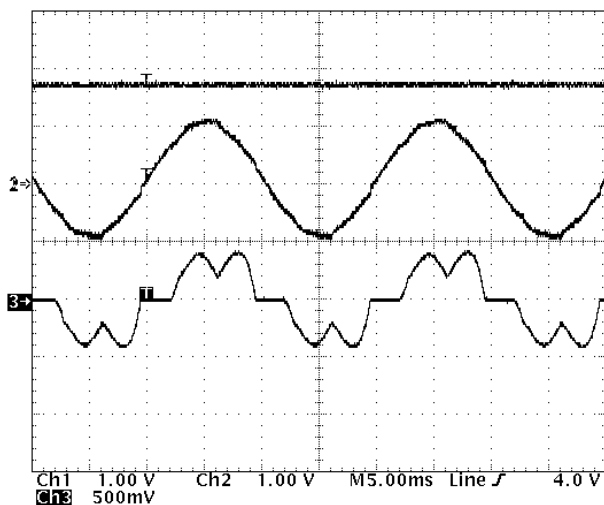


Figure 28 : $v_{DC}(t)$, $v_a(t)$, $i_a(t)$ avec le montage PD3 (1 carreau = 5 ms ; 1 carreau = 200 V ou 5 A)

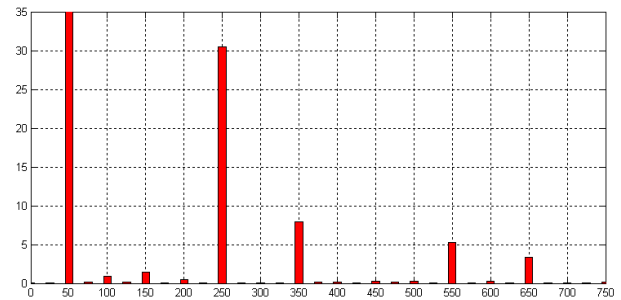


Figure 29 : Décomposition en série de Fourier de $i_a(t)$ avec le PD3 (% du fondamental en fonction de la fréquence)

La courbe 29 présente la décomposition en série de Fourier du courant prélevé sur le réseau. Les harmoniques présents sont ceux de rang impair et non multiple de 3. La comparaison avec le redresseur MLI ne peut pas être totale car la puissance qui transite n'est pas la même (limitation du courant d'entrée à 5 A max). La valeur du THD pour le courant est de 32,23 %, la valeur maximale de son fondamental est de 3,54 A.

6.3. Impact de charge

Cet essai reprend la simulation du § 5.2.7, où la résistance de sortie passe de 225 à 122,5 Ω . La figure 30 représente l'évolution (position "AC") de la tension $v_{DC}(t)$. La courbe de la tension montre que le système est du second ordre avec un dépassement "positif". L'ondulation totale est de 8,8 V et la durée pour revenir à 400 V (ici 0 V) est d'environ 0,16 s. Ce résultat suppose que la valeur du condensateur est supposée suffisamment grande pour garder constante la tension redressée en régime permanent.

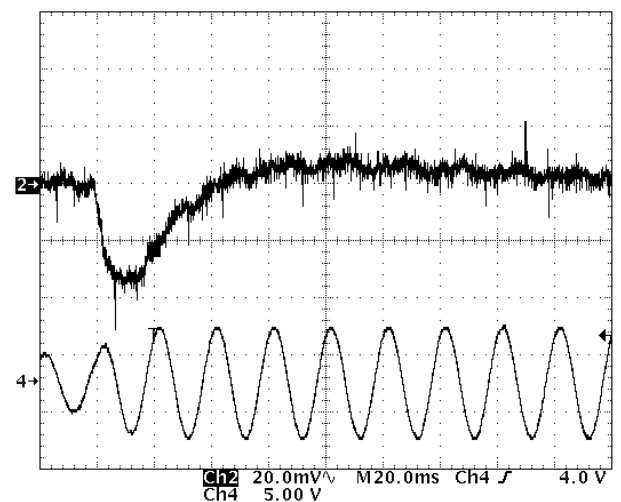


Figure 30 : $v_{DC}(t)$ en position "AC" et $i_{a_ref}(t)$ (1 carreau = 20 ms ; 1 carreau = 4 V ou 5 A)

L'ordre de grandeur est respecté par rapport à la théorie, néanmoins, une étude plus poussée pourrait être effectuée dans le but de diminuer la valeur de la capacité de sortie et/ou d'améliorer la réponse de la boucle de tension (exemple : réalisation d'une "pré-alimentation" de la boucle de tension, dans [5]).

7. Conclusion

Cet article présente la mise en œuvre d'un onduleur de tension triphasé utilisé en redresseur et ayant pour objectif de limiter le contenu harmonique du courant prélevé au réseau. Celui-ci utilise une commande dans le repère triphasé contrôlant les valeurs réelles des courants et des tensions.

Ces systèmes se rencontrent surtout dans le domaine de la production d'énergie car ils peuvent contrôler le transit de puissance en un point du réseau (injection de puissance réactive). Ils peuvent aussi remplacer l'étage redresseur (pont de diodes) des variateurs de vitesse et ont l'intérêt d'être réversibles.

La généralisation de ce type de redresseur est étroitement liée aux normes électriques de plus en plus contraignantes. La norme CEI 61000 définit ainsi les niveaux maxi des divers rangs harmoniques. A titre d'exemple, la CEI 61000-2-4 régit les niveaux des harmoniques de tension et la CEI 61000-3-2 ceux des courants dans une installation basse tension. Les mesures pratiques effectuées sur les courants et les

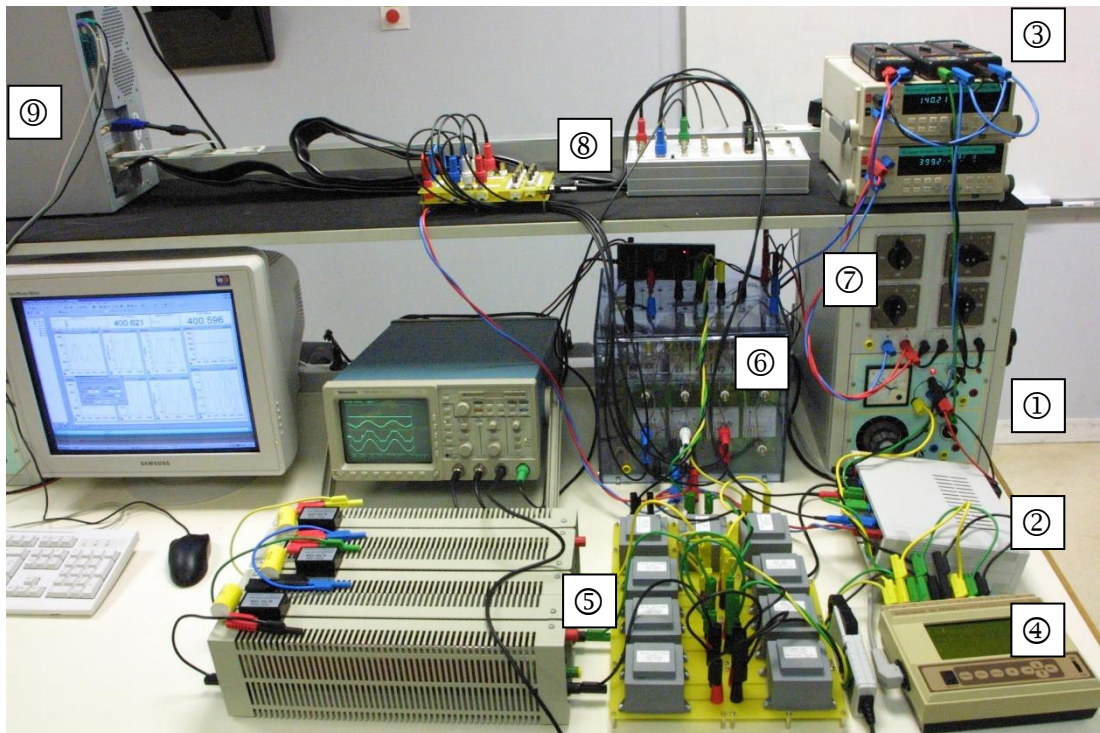
tensions (Classe 2 : réseaux publics et industriels), respectent ces deux normes.

Enfin, la possibilité d'améliorer le système consiste à utiliser une commande plus sophistiquée. La littérature montre des commandes du type "vectoriel" utilisant les transformées de Park ou de Concordia. Une analogie est alors faite entre les commandes du redresseur et celles des machines à courant alternatif.

Références bibliographiques

- [1] : E. Bettega, J. N. Fiorina, "Harmoniques : convertisseurs propres et compensateurs actifs", Cahier technique n° 183 (groupe Schneider), 36 pages.
- [2] : J. FADAT, "Conception de convertisseurs statiques", EN PHASE - Le Magazine du Réseau de l'AA-ESIEE, N°269, mai 2004, ISSN 0984-9858, pp. 21-p27.
- [3] : J. FADAT, "Onduleurs de tension monophasé et triphasé", Revue 3EI N°38, 09/2004, pp. 25-35.
- [4] : <http://www.powersys.fr> ; logiciel PSIM.
- [5] : L. MARROYO, "Contribution à l'étude des redresseurs triphasés à absorption de courants sinusoïdaux", Thèse, LEEI, 1999.

Annexe : Montage expérimental



- ① : Réseau triphasé réglable
- ② : Capteurs de courant à effet Hall ($i_a(t)$ et $i_b(t)$)
- ③ : Sondes différentielles pour les tensions $v_a(t)$, $v_b(t)$ et $v_{DC}(t)$
- ④ : Analyseur de réseau (valeurs efficaces, analyse harmonique des tensions et des courants)
- ⑤ : Filtre LCL ($L_G = 2,5$ mH ; $L_I = 5$ mH ; $C_F = 2$ μ F ; $R_D = 4,7$ Ω)
- ⑥ : Redresseur MLI (Semikron)
- ⑦ : Banc de charge résistif
- ⑧ : Interfaces : mesures/DSP et DSP/Driver
- ⑨ : PC + DSP 1104

Etude didactique des systèmes photovoltaïques

optimisation thermique et électrique

Cédric JAOUEN ② , Erik LACOMBE ② , Olivier BÉTHOUX ① , Jean-Paul KLEIDER ①

① Laboratoire de Génie Électrique de Paris, CNRS UMR8507; SUPELEC ; Univ Paris-Sud ; UPMC Univ. Paris 06 ; 11 rue Joliot-Curie, Plateau de Moulon, F-91192 Gif-sur-Yvette Cedex, France

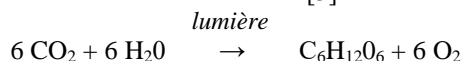
② Ecole Normale Supérieure de Cachan, département E.E.A.

cedric.jaouen@ens-cachan.fr ; erik.lacombe@ens-cachan.fr ;
olivier.bethoux@lgep.supelec.fr ; jean-paul.kleider@lgep.supelec.fr

Résumé : Les travaux de synthèse des experts internationaux du G.I.E.C. ont validé la thèse d'une influence prépondérante de l'homme sur l'évolution rapide du climat ainsi que la diminution importante de la biodiversité et ceci depuis l'ère industrielle (1850 à nos jours). Ces constats et l'esquisse de scénarios d'évitement de crise ont été largement repris et médiatisés par l'ancien vice président américain Al Gore (Co-prix Nobel de la paix 2007 avec le groupe d'experts du GIEC). Il s'ensuit un intérêt croissant du public pour les moyens de développement les moins agressifs pour notre environnement. Nos étudiants, comme la plupart des jeunes adultes, sont particulièrement motivés pour participer à cette mutation et souhaitent pouvoir contribuer à l'essor des énergies renouvelables [1]. Dans cet article, nous nous centrons sur la compréhension et l'optimisation d'une conversion noble (en termes d'entropie) : le passage de l'énergie lumineuse à l'énergie électrique. Cet article souhaite apporter une proposition d'enseignement adaptée à des étudiants de Génie Electrique (I.U.T. et Ecoles d'Ingénieurs). Il s'agit d'aborder les phénomènes physiques mis en jeu dans les convertisseurs photoélectriques. Cette présentation vise à éclairer les développements futurs. Dans un premier temps, elle sera validée expérimentalement sur deux technologies courantes de panneaux grâce à des mesures simples et reproductibles réalisées en laboratoire. De cette description physique et de ce constat expérimental découleront deux approches systèmes complémentaires. L'une nous conduira à envisager la cogénération et à en quantifier les avantages. L'autre portera sur le choix argumenté des paramètres d'un système d'adaptation du panneau à sa charge électrique alimentée.

1 Le soleil dans le « panel énergétique » : une ardente nécessité ?

Les sources d'énergie nous paraissent nombreuses mais à l'échelle humaine peu d'entre elles sont renouvelables. Un bilan énergétique terrestre nous rappelle que le soleil est responsable de 99,97 % de l'apport en énergie de notre planète, le reste provenant de la fusion du noyau terrestre ainsi que de l'interaction gravitationnelle Terre - Lune - Soleil [2]. Bien évidemment, à la surface de notre écorce terrestre, cette énergie solaire est utilisée sous des formes très variées. Parmi celles-ci, citons la photosynthèse qui permet aux plantes de se construire en captant le dioxyde de carbone (CO₂) contenu dans l'air pour le transformer en sucres [3].



Outre la biomasse si fondamentale pour les autres formes de vie, citons également les vents, les courants marins, le cycle de l'eau, ... qui sont issus des déséquilibres thermiques de la répartition de la chaleur apportée par le soleil. Notons également que la terre a connu depuis ses origines (4,5 milliards d'années) de grandes variations climatiques et atmosphériques.

Certaines périodes ont en particulier été particulièrement propices à l'enfouissement rapide d'importantes masses végétales. Il y a 320 millions d'années (Carbonifère), le rapide enfouissement des grandes forêts de cette ère a conduit à la formation d'importants stocks de charbon. Plus près de nous (Crétacé supérieur – il y a environ 80 millions d'années), une importante activité volcanique a produit un important réchauffement climatique ; l'élévation du niveau marin (200 à 300 mètres) qui engendra un rapide enfouissement organique dans les sédiments marins. Cette séquestration du carbone s'est opérée dans des conditions favorables à la création d'importantes nappes de pétrole et de gaz, que nous exploitons depuis un siècle. Insistons sur le fait que ces périodes de séquestrations du carbone sont particulièrement importantes car elles ont modifié la composition de l'atmosphère terrestre sur des échelles de temps géologiques (centaines de milliers d'années) en réduisant la concentration en dioxyde de carbone et en créant les conditions de vie actuelles [4]. L'un de ces paramètres (corrélé à tant d'autres) est la température moyenne du globe terrestre (environ 15 °C depuis des centaines de milliers d'années). L'utilisation à grande échelle des ressources en hydrocarbures (charbon,

pétroles conventionnels ou non, gaz naturel (méthane)) pose bien sûr le problème de l'épuisement de la ressource mais à l'échelle au moins d'un siècle car les réserves prouvées en charbon sont encore abondantes et les ressources pétrolières difficiles d'accès sont encore peu exploitées mais importantes [5]. Or, bien avant cette perspective lointaine de changement d'approvisionnement en énergie, se pose la délicate mais urgente question de l'interaction de ce mode de consommation avec le climat ; le dioxyde de carbone, puissant gaz à effet de serre, est en effet un acteur majeur du système thermique terrestre [6]. Il paraît donc intéressant, voire vital pour les générations à venir, de ne pas épuiser en quelques siècles le stock d'hydrocarbures qui a mis plusieurs centaines de millions d'années à se constituer. Dans cette perspective, il convient de réorienter les approvisionnements d'énergie vers des technologies peu émettrices de gaz à effet de serre comme la bio-masse, l'éolien, l'hydraulique, l'énergie de la houle et bien entendu les convertisseurs directs de l'énergie solaire. Cette dernière solution (valorisation directe de l'énergie solaire) est très séduisante. En effet, la surface de toiture, voire de mur est d'ores et déjà très importante. Elle pourrait donc être mise à profit sans nouvelle emprise au sol et en assurant une production localisée. Ceci limiterait les pertes de transport et responsabiliserait le consommateur devenu producteur.

Ces perspectives paraissent a priori prometteuses. Il va néanmoins être très difficile de convaincre une humanité nombreuse (6,7 milliards en janvier 2008 et une prévision d'environ 9 milliards pour l'année 2050 [7]) et énergivore (11 435 millions de tonnes-équivalent-pétrole d'énergie primaire en 2005 sachant qu'une T.E.P. correspond à 41,6 GJ [8]) de ne pas utiliser une ressource (les hydrocarbures) encore très abondante et très facile d'emploi pour se tourner vers une source d'énergie diffuse et intermittente (conditions météorologiques et cycles journalier et saisonnier). Cette moyenne d'environ 1,7 T.E.P. par habitant ne doit pas cacher d'énormes disparités régionales. Rappelons que si nous généralisons à l'humanité la consommation moyenne d'un européen (chose qu'espèrent tout à la fois américains du nord et chinois ou indiens pour des raisons diamétralement opposées), nous aurions une consommation mondiale environ doublée !

Un seul chiffre comparatif permet d'illustrer ce nouveau défi énergétique. Un litre d'essence (soit 0,83 kg) a un pouvoir calorifique de 34,8 MJ. A titre de comparaison, les stations réparties sur le territoire français pour la mesure de l'éclairement solaire global permettent d'annoncer un ordre de grandeur de 1500 kWh par m² de surface horizontale et par an. En moyenne, et sans tenir compte du rendement énergétique de conversion, un m² de territoire hexagonal produira potentiellement en un an 5400 MJ soit l'équivalent de 155 litres d'essence. Et en prenant en compte, un rendement énergétique du panneau de 15 %, on obtient in fine 23,25 litres d'essence. On voit donc que c'est l'ensemble de la filière énergétique qui est à restructurer et que la pénétration des énergies renouvelables est

fortement couplée à l'existence d'appareils à hautes performances énergétiques.

Nous voyons également, et c'est l'objet de cette étude, que la filière solaire doit optimiser ses performances dans le double but de s'implanter sur les meilleures surfaces bâties et d'obtenir une bonne acceptation sociale. C'est dans cette optique de rationalisation des espaces et de perspectives nouvelles et encourageantes que nous présentons les convertisseurs directs de l'énergie solaire en insistant sur leur éventuelle association harmonieuse.

Le second élément primordial pour un essor significatif des énergies renouvelables est bien entendu l'association à des moyens de stockage performants car si le litre d'essence précité résout intrinsèquement les deux termes de l'équation énergétique (énergie stockée et puissance disponible), ni le solaire, ni l'éolien ne peuvent prétendre à une continuité de service sans organe de stockage auxiliaire [9] [10].

Le présent article se focalisera sur la conversion photovoltaïque.

Une première partie détaille les principes physiques de cette conversion afin d'éclairer les paramètres d'optimisation de la structure de conversion s'appuyant sur cette source primaire.

La deuxième partie est donc consacrée à la caractérisation du panneau afin de montrer l'influence de la température, ce qui conduira tout naturellement à envisager l'idée de cogénération. Des données expérimentales seront analysées.

La troisième partie de l'exposé traite des paramètres à prendre en compte lors de la réalisation de l'adaptation du panneau à sa charge électrique. La réalisation expérimentale sera détaillée.

Une conclusion reprendra ces différents éléments en insistant sur leur portée pédagogique. Des perspectives d'enrichissement de cette pratique didactique seront également dessinées.

2 Caractérisation expérimentale d'un panneau photovoltaïque.

2.1 But de cette caractérisation :

L'expérience de caractérisation (figure 1) que nous proposons aux étudiants a deux buts. Le premier consiste à introduire la nécessité de placer, en aval du panneau, un dispositif d'adaptation d'impédance permettant de placer le panneau à son point de rendement maximal. Pour cela, on relève expérimentalement la caractéristique $I = I(V)$ en maintenant la température la plus constante possible. Le second objectif est de quantifier l'influence de la température sur le rendement des panneaux solaires. Pour cela, nous allons, pour un flux incident connu, faire varier uniquement la température du panneau. Cette mesure débouchera sur une discussion sur la cogénération.

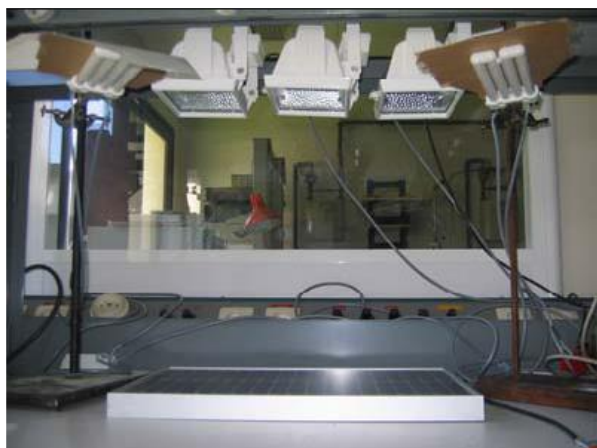


Figure 1 : Dispositif envisagé

2.2 Choix de la technologie du panneau :

Les panneaux photovoltaïques d'utilisation courante sont en silicium et réalisés en technologie cristalline (c : Si) ou amorphe (a : Si) (dépôt en couches minces) [11].

Les technologies cristallines sont issues du savoir-faire de l'industrie des composants électroniques. Ce sont donc des technologies assez matures. Elles sont basées sur la fonte à haute température de silicium pur puis sur son refroidissement lent permettant d'obtenir soit un monocristal (refroidissement très lent) soit un polycristal constitué de cristaux plus petits. L'énergie requise pour créer les premiers est plus importante mais conduit à des cellules à meilleur rendement : le ratio énergie électrique produite sur énergie solaire incidente dépend des conditions d'utilisation et ne dépasse guère 20 % dans un cas et 15 % dans l'autre.

Les technologies amorphes, plus récentes, sont quant à elles en phase de maturation. Elles sont basées sur le dépôt sur un verre transparent (substrat) de trois couches de silicium (couche P, couche intrinsèque et couche N). L'épaisseur typique des zones dopées est de 10 nm, celle de la zone intrinsèque est d'environ 300 nm. Cette technologie présente des rendements plus faibles (7 à 10%) mais nécessite, pour le procédé de fabrication, un apport énergétique moindre et un nombre réduit d'étapes dans le processus de réalisation.

Quelle que soit la technologie, le retour énergétique d'un panneau placé sous nos latitudes est estimé de 2 à 4 années. Du point de vue de l'utilisateur, le critère de choix d'une technologie sera donc plus lié à la surface disponible pour générer la puissance électrique voulue. Pour notre part, nous disposons de deux types de panneaux. Le premier (fabriqué par Hélios Technology) est un panneau photovoltaïque en silicium monocristallin reconnaissable par son reflet uniforme et à dominante bleu-gris (figure 2). Sur la photo, on distingue les cellules : 38 fines tranches découpées dans le lingot de silicium ; elles sont disposées sur un cadre en aluminium et électriquement connectées en série par les fils apparents. La caractéristique électrique du panneau (tension à vide = 20,50 V) prouve que toutes les cellules sont placées en série : $20,50 \text{ V} / 38 = 0,54 \text{ V}$ est bien la tension à vide que l'on peut espérer aux bornes d'une cellule unique en silicium cristallin.



Longueur	524 mm
Largeur	325 mm
Surface	0,17 m ²
Conditions de caractérisation T = 25 °C Flux lumineux : 1000 W / m ² et AM 1,5	
V _{circuit ouvert}	20,50 V
I _{court-circuit}	1,36 A
P _{max}	20 W
V _{Pmax}	16,50 V
I _{Pmax}	1,27 A
I _{12,5 volts}	1,21 A

Figure 2 : panneau monocristallin

Le second panneau, de la société Solems, est de technologie amorphe reconnaissable à son reflet marron. Cette fois-ci, le processus de fabrication crée initialement une cellule unique sur un substrat en verre qui sert d'interface avec le flux lumineux incident. Pour créer une tension plus élevée, adaptée aux applications usuelles de charge batterie, on crée par rayures des cellules plus petites que l'on connecte en série. Sur la photo (figure 3), on les distingue nettement.



Longueur	674 mm
Largeur	312 mm
Surface	0,210 m ²
Conditions de caractérisation T = 25 °C Flux lumineux : 1000 W / m ² et AM 1,5	
V _{circuit ouvert}	23,00 V
I _{court-circuit}	0,74 A
P _{max}	10 W
V _{Pmax}	17,50 V
I _{Pmax}	0,58 A
I _{12,5 volts}	NC

Figure 3 : panneau amorphe

Ces deux photos permettent de percevoir l'intérêt porté à la technologie couches minces depuis la découverte de leurs propriétés photovoltaïques (USA, 1975). En effet, s'appuyant sur le savoir-faire développé pour la réalisation des écrans plats, les industriels des couches minces sont capables de réaliser des cellules plus minces (d'un facteur 1000) et de surface très large en comparaison avec les techniques cristallines : en 2008, certaines installations industrielles créent en série des cellules de l'ordre du m². Sur la photo, on discerne bien que notre panneau amorphe est uniquement constitué de deux cellules-plan initiales (95 875 mm²). Un travail important et toujours d'actualité consiste à en améliorer les performances en termes de rendement électrique. A contrario, le panneau cristallin est constitué de petites cellules (3 240 mm²) obtenues par sciage du lingot initial et engendrant donc des pertes de matière à la fabrication. Par ailleurs, on distingue bien que l'assemblage contribue à une importante perte de surface active (silicium) par rapport à la surface nécessaire à l'installation (cadre).

2.3 Choix de la technologie de l'éclairage

Les panneaux photovoltaïques sont conçus pour être utilisés à l'extérieur. Néanmoins, leur caractérisation est difficile dans ces conditions qui peuvent être très changeantes. Par ailleurs, il est alors également difficile de décorrélérer température du panneau et éclairage. C'est la raison pour laquelle nous avons opté pour une source d'éclairage artificiel dont le spectre utile ne s'éloigne pas trop de celui du soleil. Rappelons que le panneau monocristallin a une zone de sensibilité de 0 à 1100 nm (proche IR) alors que le panneau amorphe a une sienne de 0 à 750 nm (fin du visible et début de l'IR).

Aussi, avons-nous relevé le spectre de rayonnement du soleil en région parisienne ainsi que le spectre de lampes halogènes d'une part et fluo-compactes d'autre part. L'appareil de mesure est un spectroscope (Ulice Spid - HR) analysant la lumière dans la bande [350 nm ; 850 nm] centrée autour du visible [380 nm ; 720 nm]. Cette analyse se fait au moyen de diodes photosensibles spécialisées dans une bande étroite de longueurs d'onde. Avant d'atteindre ces multiples capteurs, le rayon lumineux incident est donc diffracté au moyen d'un réseau miroir.

Cette mesure (faite au milieu d'une journée d'avril et par temps clair) nous donne un spectre solaire bien étalé et centré autour de 550 nm qui est la zone de plus haute sensibilité de l'oeil humain (figure 5). On retrouve là l'influence de l'atmosphère sur le spectre solaire initial qui étale le maximum de puissance sur une plus grande plage de longueur d'onde et le décale un peu vers les infrarouges. Notons dès à présent que cette mesure est relative et que nous devons faire intervenir un autre moyen de mesure pour réaliser nos bilans énergétiques.

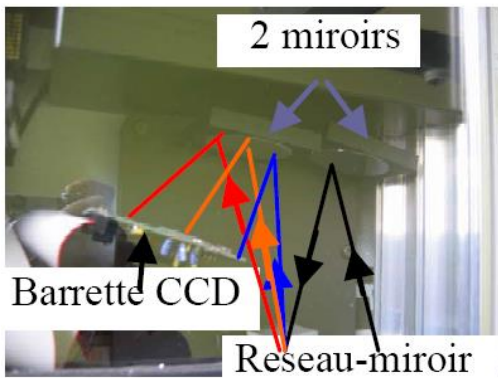


Figure 4 : Spectromètre – principe de la mesure

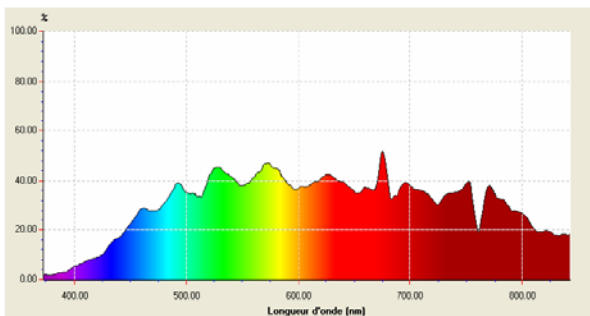


Figure 5 : Spectre solaire à mi-journée et par temps clair en région parisienne (avril 2007)

La lampe halogène est une ampoule comportant un filament de tungstène parcouru par un courant ainsi que des gaz halogènes. L'effet Joule porte le filament à température élevée ; il émet donc un rayonnement électromagnétique. La température d'une lampe halogène est de l'ordre de 3000 K ce qui correspond à un pic d'émission dans le proche infrarouge ($\lambda_{pic} = 965$ nm par la loi de déplacement de Wien [12]). C'est bien ce phénomène que le spectroscope utilisé révèle lors de l'analyse du flux lumineux émis par la lampe (figure 6-a). Le pic d'irradiance se situe néanmoins à une longueur d'onde inférieure à celle prévue ($\lambda_{pic} = 770$ nm)

Cette grande quantité d'ondes infrarouges, sources d'échauffements importants, nous a amené à explorer l'éclairage par lampe à décharge. La lampe fluorescente est d'emploi courant et voit un courant électrique circuler dans un gaz ionisé (vapeur de mercure) : ceci produit une émission dans l'ultraviolet qui est absorbée par des poudres fluorescentes puis restituée par elles sous forme de lumière visible. Hélas, comme nous le constatons sur le relevé expérimental (figure 6-b), les bandes de réémissions sont très étroites ; on en remarque ici trois principales : 430 nm, 540 nm et 610 nm. Ce spectre discontinu est, bien plus que le précédent, éloigné d'un simulateur solaire et nous ne l'exploiterons pas.

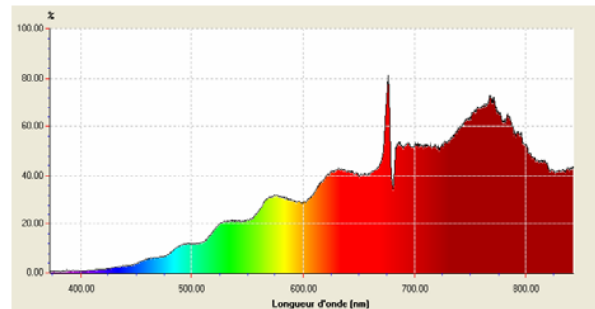


Figure 6-a : lampe halogène

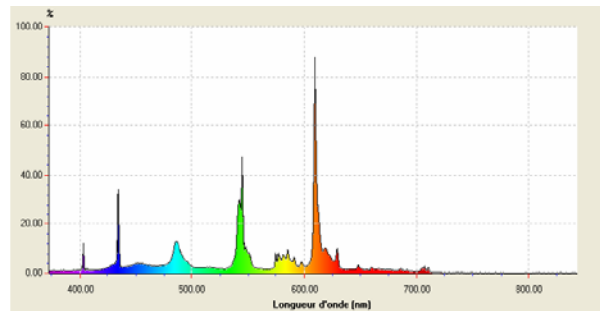


Figure 6-b : lampe fluo-compacte

Figure 6 : Analyse des lumières artificielles utilisables

Nous allons donc devoir nous contenter des lampes halogènes tout en améliorant leur connaissance en prolongeant la première mesure (centrée autour du domaine du visible) par une mesure dans les infrarouges. En effet, le spectre de sensibilité des cellules solaires en silicium cristallin se prolonge jusqu'aux environs de 1100 nm. D'autre part, les lampes à incandescence ont un spectre important dans l'infrarouge source non négligeable d'énergie, convertible en électricité

($\lambda < 1100$ nm) ou bien en chaleur ($\lambda > 1100$ nm). Pour cela, nous utilisons un appareil disponible à l'I.E.F. (laboratoire de recherche de l'Université Paris Sud) et destiné à l'étude des lasers ; il permet une analyse des rayons lumineux dans la gamme, 750 – 1800 nm. Cet appareil (Ando AQ6317), comme le précédent, donne une courbe relative. Les deux appareils ayant une zone de recouvrement dans le proche infrarouge, nous l'avons mise à profit pour raccorder les deux mesures afin d'obtenir une courbe d'émission spectrale s'étalant de 350 nm à 1750 nm et couvrant donc bien la zone principale d'émission de la source adoptée (lampe à incandescence).

La dernière étape consiste à transformer ce spectre relatif en émittance énergétique monochromatique ($W.m^{-2}.\mu m^{-1}$). Il va donc falloir quantifier un point de la courbe précédente puis obtenir les autres par une règle de proportionnalité. Pour cela, nous avons utilisé un filtre optique très sélectif ($\Delta\lambda = 10$ nm) centré autour de la longueur d'onde ($\lambda_0 = 710$ nm) avec une atténuation de $G_{BP} = 55$ % dans la bande passante. Nous l'avons associé à une photodiode (S1336), de surface active connue ($1,2$ mm²) et de réponse spectrale parfaitement étalonnée. Dans la bande passante du filtre, la photosensibilité de la photodiode est de $G_{PD}(\lambda_0) = 0,38$ A/W. En mesurant son courant de court-circuit sous lumière incidente filtrée ($I_{CC} = 1$ μ A), nous en déduisons donc la puissance incidente : $p(\lambda_0, \Delta\lambda) = 4,8$ μ W pour $1,2$ mm² et 10 nm. Ce qui signifie qu'à la longueur d'onde λ_0 , l'émittance énergétique spectrale est :

$$E(\lambda_0) = 363 W.m^{-2}.\mu m^{-1}.$$

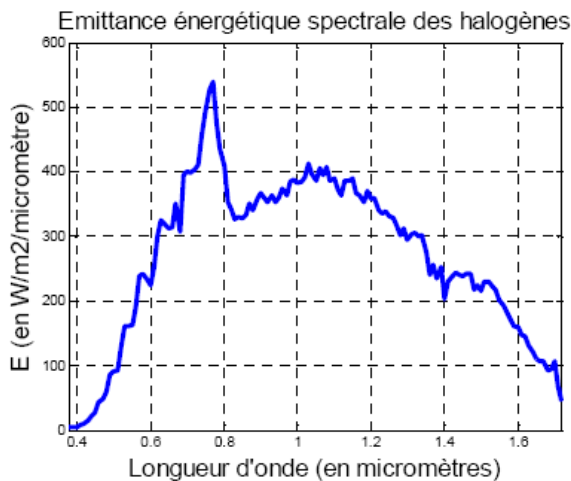


Figure 7 : Spectre prolongé [350 - 1750 nm] (halogène)

Nous venons de présenter les deux acteurs (source et récepteur) de notre caractérisation des cellules photovoltaïques. Nous allons donc maintenant décrire le dispositif expérimental les mettant en jeu et analyser les résultats obtenus.

2.4 Caractérisation du panneau et validation du modèle

2.4.1. Protocole expérimental adopté :

Nous proposons de placer chaque panneau sous une rampe d'éclairage à lampes halogènes dont on contrôle le flux lumineux par un autotransformateur. Le panneau alimente un rhéostat dont on mesure les grandeurs électriques tension (V_P) et courant (I_P). Par ailleurs, nous instrumentons le panneau avec un thermocouple indiquant la température au plus près du silicium (T_{Si}). Cette série de mesures nous permet de tracer des réseaux $I = I(V)$ à température constante et d'en déduire les réseaux $P = P(V)$ à T_{Si} donnée. Compte-tenu du fort échauffement procuré par les halogènes (puissance spectrale importante dans l'infrarouge), cette mesure doit être réalisée par éclairage intermittent ; la durée d'exposition aux halogènes conditionne la température. Nous avons ainsi réalisé, pour chaque panneau, quatre séries de mesures allant d'une température (T_{Si})_{min} = 28°C proche de la température ambiante de la salle à (T_{Si})_{max} = 60°C totalement crédible pour un panneau exposé au soleil. La valeur typique de la température de fonctionnement réel va de 50 °C à 100 °C en fonction des conditions climatiques et d'installation ; cette température est en particulier fortement liée à la ventilation du site [11]. Les températures intermédiaires de caractérisation sont (T_{Si})_{int1} = 38°C et (T_{Si})_{int2} = 48°C.

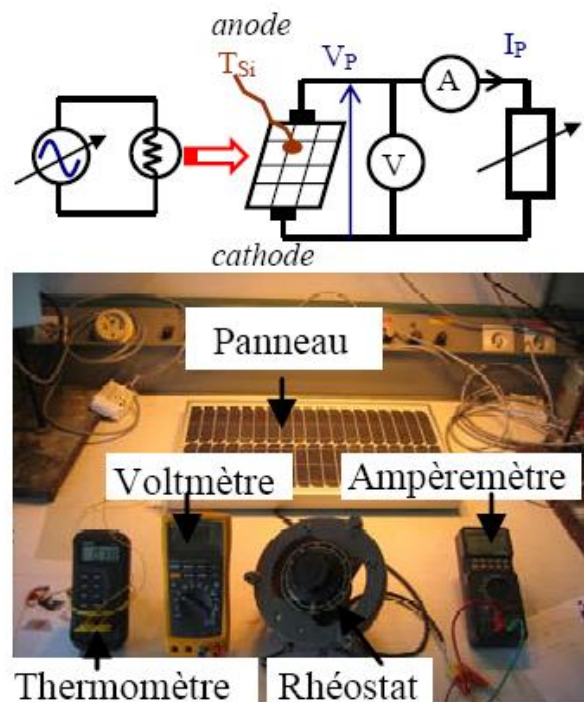


Figure 8 : Dispositif expérimental de caractérisation des deux panneaux solaires

2.4.2. Panneau en silicium monocristallin :

La figure 9 synthétise la caractéristique électrique du panneau monocristallin pour un éclairement donné. Les différentes courbes correspondent à quatre températures contrôlées différentes.

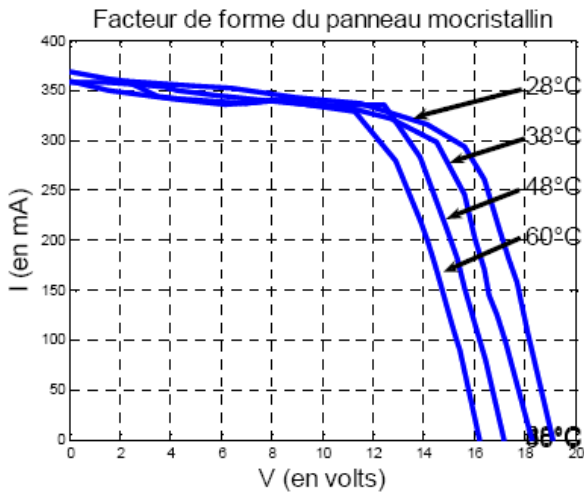


Figure 9 : Réseaux $I = I(V)$ paramétrés par T_{Si}

A température T_{Si} donnée, la caractéristique $I = I(V)$ fait bien apparaître deux zones. A faible tension, on observe une zone à courant sensiblement constant. Il s'agit du photo-courant I_{ph} créé par la dissociation de paires électron / trou sous le double effet de l'interaction avec le photon incident ($\lambda < \lambda_{coupure}$) et de la barrière de potentiel qui favorise la collecte par les électrodes avant recombinaison. Pour ces faibles tensions (ici $V_P < 10$ V), le courant I_D de diffusion des majoritaires reste négligeable car la barrière de potentiel est encore suffisante. En revanche, passé ce seuil de tension, nous observons une chute brutale du courant $I_P = I_{ph} - I_D$ délivré par le panneau (jusqu'à son annulation) lié à l'évolution exponentielle I_D sous l'effet d'une différence de potentielle V_P appliquée, par la charge, aux électrodes. Rappelons que la théorie des semi-conducteurs donne pour le courant d'un panneau la relation [13] :

$$I_P = I_{ph} - I_s(T_{Si}) \cdot \left\{ \exp \left(\frac{q \cdot V_P}{k \cdot T_{Si}} \right) - 1 \right\} \quad (1)$$

Où

- n est le nombre de cellules mises en série (ici $n = 38$)
- $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K est la constante de Boltzman ;
- $q = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C est la charge de l'électron.

On remarque (tableau 1) que le photo-courant $I_{ph} \approx I(V=0) = (I_P)_{CC}$ est, en première approximation, insensible à la variation de température T_{Si} .

En revanche, comme le montre l'expression (1), la tension de seuil est fortement dépendante de la température T_{Si} . La tension à vide V_{P0} ($V_{P0} \Leftrightarrow I_P = 0$) est donc elle aussi fortement corrélée à la température. Elle diminue rapidement avec elle (tableau 1) : on constate une diminution de 2,8 V pour une température passant

de 28°C à 60°C ; soit -90 mV/°C. En effet, pour $V_P = V_{P0}$, on peut négliger 1 devant le terme exponentiel et, on a, en tenant compte du courant de saturation [14] :

$$I_{ph} = C \cdot T_{Si}^3 \cdot \exp \left(-\frac{E_g}{k \cdot T_{Si}} \right) \cdot \exp \left(\frac{q \cdot V_{P0}}{k \cdot T_{Si}} \right) = C \cdot T_{Si}^3 \cdot \exp \left(\frac{q \cdot V_{P0} - E_g}{k \cdot T_{Si}} \right)$$

Où E_g est l'énergie de bande interdite du semi-conducteur. Dans le cas du silicium cristallin elle est de l'ordre de $E_g \approx 1,1$ eV (1,17 eV à 0 K et 1,12 eV à 300 K). Quant à (V_{P0}/n) , il est de l'ordre de 0,55 V pour ce panneau. Le courant I_{ph} étant quasi insensible à la température et le terme exponentiel étant prépondérant, une augmentation de la température entraîne donc une diminution de (V_{P0}/n) pour qu'en valeur absolue, le terme $((V_{P0}/n) - E_g)$ augmente. Par dérivation de $\ln(I_{ph})$ par rapport à la température, on a :

$$0 = \frac{3}{T_{Si}} - \frac{q \cdot V_{P0} - E_g}{k \cdot T_{Si}^2} + \frac{\frac{\partial q \cdot V_{P0}}{\partial T_{Si}}}{n} - \frac{\partial E_g}{\partial T_{Si} \cdot k \cdot T_{Si}}$$

Comme le terme (kT_{Si}/q) est de l'ordre de 26 mV à 25°C, le premier terme de l'expression est négligeable devant le deuxième. Ce qui conduit à :

$$\frac{\partial q \cdot V_{P0}}{\partial T_{Si}} - \frac{\partial E_g}{\partial T_{Si}} = \frac{q \cdot V_{P0} - E_g}{T_{Si}}$$

Or, la barrière de potentiel (E_g/q) dépend peu de la température. Elle varie typiquement de $-0,2$ mV / °C. On a donc :

$$\frac{\partial \frac{V_{P0}}{n}}{\partial T_{Si}} = \frac{V_{P0} - \frac{E_g}{q}}{T_{Si}} \approx \frac{-0,55V}{320K} = -1,72 \text{ mV/°C}$$

Ce qui, ramené à 38 cellules en série, donne -65 mV/°C ce qui est du même ordre de grandeur que notre résultat pratique (-90 mV/°C).

Par ailleurs, notons qu'à éclairement donné, les seules connaissances du courant de court-circuit, de la tension à vide et de la température permettent d'établir le modèle statique du panneau. Comme le propose [15], ce dernier est facilement implantable dans l'environnement MATLAB/SIMULINK. Ceci peut permettre de conduire des simulations avant implantation d'une commande MPPT. Pour notre part, la courbe produite à partir des seules informations précédentes correspond assez précisément aux mesures effectuées sur toute la plage de fonctionnement.

	$T_{Si} = 28 \text{ °C}$	$T_{Si} = 38 \text{ °C}$	$T_{Si} = 48 \text{ °C}$	$T_{Si} = 60 \text{ °C}$
$(I_P)_{CC}$	360 mA	360 mA	358 mA	365 mA
$(V_P)_0$	19,1 V	18,26 V	17,16 V	16,22 V
P_{max}	4,6 W	4,3 W	4,15 W	3,7 W
$(V_P)_{Pmax}$	15,6 V	14,5 V	12,4 V	11,25 V
$(V_P)_{Pmax} / (V_P)_0$	81,7 %	79,4 %	72,3 %	69,4 %

Tableau 1 : quelques mesures du panneau monocristallin sous halogène

Du point de vue de l'utilisateur, un élément important est la puissance qu'il peut prélever avec une charge donnée et sous un éclairement et une température fixée. Pour cela, des caractéristiques du panneau, on déduit le transfert de puissance vers la charge (figure 10). Il s'agit de l'aire décrite par le point de fonctionnement (I_P , V_P). Cette puissance est nulle pour ($V_P = 0$) et pour ($V_{P0} \Leftrightarrow I_P = 0$). Elle passe par un maximum P_{max} qui, pour cet essai, se situe autour de 75 % de la tension à vide V_{P0} (tableau 1). Bien évidemment, la tension V_{Pmax} diminuant avec l'augmentation de température, on observe, une réduction significative de la puissance maximale disponible en sortie de panneau : -19,5 % lors du passage de la température ambiante (28 °C) à la température de 60°C, soit -0,61 % par °C. Cette diminution de la puissance crête est conforme aux ordres de grandeurs évoqués dans la littérature : - 0,4 % par °C [11]. L'écart peut venir d'une imprécision de la mesure de température par suite d'un positionnement de la sonde de température pas optimal par rapport au silicium.

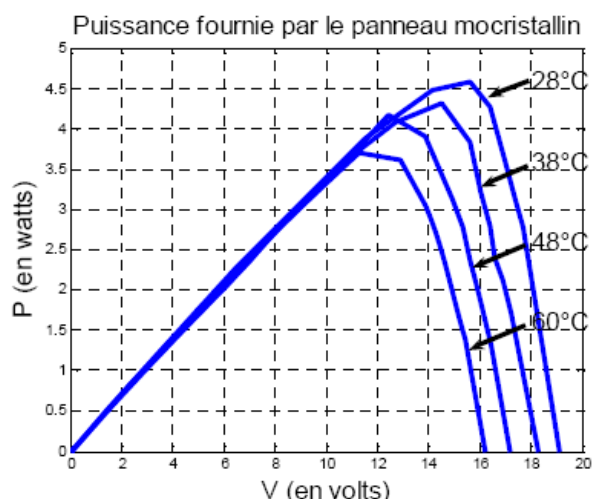


Figure 10 : réseaux $P = P(V)$ paramétrés par T_{Si}

Le dernier point à explorer est le rendement électrique, c'est-à-dire le rapport entre la puissance électrique maximale disponible et la puissance lumineuse incidente. Dans notre cas, il faut être très prudent car l'éclairage procuré par la rampe d'halogènes ne s'avère pas du tout homogène. En plaçant la diode calibrée à différents points d'un maillage du panneau (figure 11), nous constatons une puissance incidente fortement variable autour d'une valeur moyenne de $P_{moy} = 360 \text{ W/m}^2$. Nous avons vu précédemment que le panneau possédant 38 cellules élémentaires et présentant une tension à vide d'environ $20 \text{ V} \approx 38 \cdot (0,53) \text{ V}$ a donc une connexion exclusivement série de ses cellules. Nous en déduisons que le courant en sortie de panneau I_P est imposé par la cellule la moins éclairée (valeur minimale de $P_{mini} = 250 \text{ W/m}^2$). Si nous souhaitons comparer ce rendement à celui proposé par le constructeur avec un éclairage solaire uniforme de 1000 W/m^2 , il nous faut donc adopter comme puissance incidente de référence la puissance surfacique minimum ; ici, il s'agit de 250 W/m^2 . Ce qui donne une puissance incidente de

$(0,170 \text{ m}^2) \cdot (250 \text{ W/m}^2) = 42,5 \text{ W}$. D'où le rendement électrique constaté à $T_{Si} = 28 \text{ °C}$:

$$\eta_{\text{constaté}} = \frac{(P_{\text{elec}})_{\text{max}}}{P_{\text{lumineuse}}} \approx \frac{(P_{\text{elec}})}{(P_{\text{lumineuse}})_{\text{min}}} = \frac{4,6\text{W}}{42,5\text{W}} = 10,8\%$$

Alors que le rendement constructeur à 25 °C et sous « un soleil » (AM 1,5) est de :

$$\eta_{\text{constructeur}} = \frac{(P_{\text{elec}})_{\text{max}}}{P_{\text{lumineuse}}} = \frac{20\text{W}}{170\text{W}} = 11,8\%$$

Ce rendement constructeur peut paraître faible par rapport au rendement couramment admis pour une cellule monocristalline (15 % à 20 %). Mais nous devons remarquer que sur le panneau, une grande partie (72 %) de la surface n'est pas couverte de silicium. ($0,123 \text{ m}^2$ de silicium pour $0,170 \text{ m}^2$). Ce point expérimental est important car il permet de mettre l'accent sur les difficultés d'implantation des panneaux solaires. Les zones d'ombres sont bien entendu à éviter. Mais si elles existent à certaines saisons et heures du jour, ou si elles apparaissent suite à une modification du site, leur impact sur l'installation ne sera pas le même sur les performances globales selon que les panneaux seront associés en série ou en parallèle. En parallèle, il faut simplement éviter par une diode anti-retour d'alimenter le panneau le moins éclairé par le panneau qui l'est le plus. En série, en revanche, il faut prévoir des diodes de contournement d'un ensemble de cellules si on ne veut pas perdre toute la puissance dans le cas où une cellule se trouvant à l'ombre imposerait un courant quasi-nul à l'ensemble en série. Cette technique permet d'éviter une puissance nulle en sortie de l'ensemble mais ne peut rien, dans notre cas par exemple, contre la pénalisation de puissance due à un alignement des courants sur la cellule la moins éclairée.

Par ailleurs, concernant la différence entre le rendement constaté sous halogènes et celui donné sous AM 1,5, nous la justifions par la différence des spectres incidents. En effet, la lumière issue des halogènes génère un flux de photons très important dans l'infrarouge et cela bien au-delà de la sélectivité du filtre constitué par le panneau en silicium. (cf § 3 et figure 14)

Le taux de photons dont l'énergie est convertible sous forme électrique est ainsi plus important avec la lumière solaire naturelle qu'avec la lumière artificielle adoptée. Cet élément de compréhension est important pour comprendre que le couple soleil / terre est fortement lié à la couche atmosphérique. Le spectre incident dépend non seulement de la couverture nuageuse mais encore de l'épaisseur de couche atmosphérique que doivent traverser les rayons solaires. On souligne ici l'influence de la latitude, de l'heure et de la saison [16]. Selon les raies filtrées (et la technologie de panneau par sa zone de sensibilité spectrale), le rendement électrique du panneau sera plus ou moins bon.

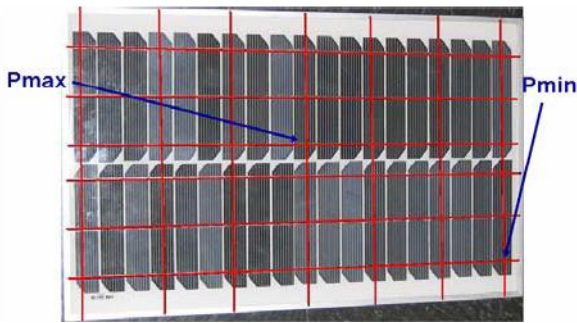


Figure 11 : hétérogénéité de l'intensité de l'éclairage reçu par le panneau

2.4.3. Panneau en silicium amorphe :

Pour le panneau en technologie amorphe, la caractéristique $I = I(V)$ paramétrée par la température T_{Si} fait également apparaître deux zones.

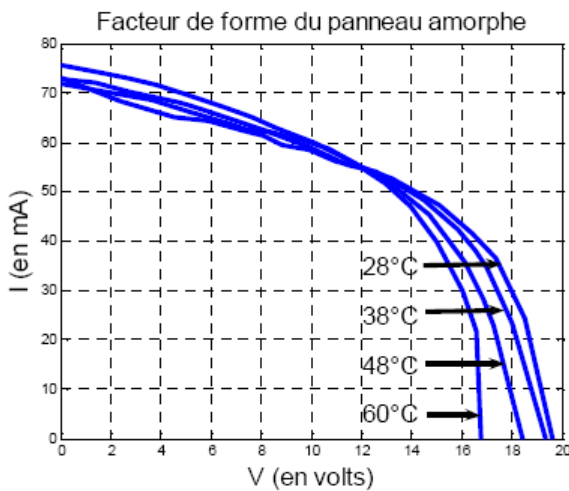


Figure 12 : réseaux $I = I(V)$ paramétrés par T_{Si}

A tension nulle (court-circuit), le courant I_P qui correspond au photocourant I_{ph} est sensiblement indépendant de la température. A faible tension, on observe ($T_{Si} = Cste$) une zone à diminution linéaire du courant I_P en fonction de la tension V_P appliquée au panneau par la charge. Cette zone peut donc être représentée par une résistance R_p qui, dans notre cas, serait d'environ 670Ω . Elle s'expliquerait par deux effets, le premier intrinsèque à la cellule, le second lié à la fabrication du panneau. En effet, comme précédemment, on considère toujours le modèle :

$$I_P = I_{ph} - I_D$$

Du point de vue de I_{ph} , il est lié à la qualité du matériau et dépend de la tension V_P , car les porteurs sont créés préférentiellement dans une zone de champ électrique. Du point de vue de I_D , on doit déplorer la présence d'une composante ohmique due à la présence d'impuretés aux bords de chaque cellule. En effet, dans cette technologie (couches minces), la réalisation des cellules élémentaires s'opère en striant la cellule initiale avec un rayon laser. Malgré les précautions, de la matière sublimée se redépense sur les cellules mitoyennes à l'issue de cette opération et un traitement par lavage ne peut en venir entièrement à bout.

Enfin, au-delà d'une tension de seuil, nous observons une chute brutale du courant jusqu'à son annulation. Ce phénomène est dû à la diode PIN créée pour réaliser la photopile. Ajoutons que si cette diode, caractérisée par une structure non-cristalline, obéit aux mêmes lois de variation qu'en (1), alors, on a (largeur de bande interdite $E_g = 1,74 \text{ eV}$) :

$$\frac{\partial \frac{V_{P0}}{n}}{\partial T_{Si}} = \frac{V_{P0}}{n} \frac{1}{T_{Si}} - \frac{E_g}{q} \frac{1}{T_{Si}^2} \approx \frac{0,7V - 1,74V}{320K} = \frac{-1,04}{320K} = -3,2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$$

Or (tableau 2), nous constatons bien une plus forte sensibilité de la tension V_{P0} du panneau amorphe aux variations de température T_{Si} : $- 62 \text{ mV} / ^\circ\text{C}$ pour le panneau entre 28°C et 48°C . Ramené à une cellule, on observe : $- 2,2 \text{ mV} / ^\circ\text{C}$.

	$T_{Si} = 28^\circ\text{C}$	$T_{Si} = 38^\circ\text{C}$	$T_{Si} = 48^\circ\text{C}$	$T_{Si} = 60^\circ\text{C}$
$(I_P)_{CC}$	73 mA	71 mA	73 mA	75,5 mA
$(V_P)_0$	19,63 V	19,31 V	18,39 V	16,75 V
P_{max}	713 mW	702 mW	679 mW	669 mW
$(V_P)_{Pmax}$	15,1 V	14,5 V	13,0 V	12,1 V
$(V_P)_{Pmax} / (V_P)_0$	76,9 %	75,1 %	70,7 %	72,2 %

Tableau 2 : quelques mesures du panneau amorphe sous halogène

Des caractéristiques du panneau, on déduit, le transfert de puissance vers la charge électrique. Cette puissance passe par un maximum P_{max} qui, pour cet essai, se situe autour de 75 % de la tension à vide V_{P0} . Pour ce panneau amorphe, suite à une augmentation de température, on observe une réduction beaucoup moins significative de la puissance maximale disponible en sortie de panneau : $- 6,2 \%$ lors du passage de la température ambiante (28°C) à la température de 60°C soit $- 0,19 \%$ par $^\circ\text{C}$. Ceci est dû au fait que lors du déplacement du point P_{max} , la réduction de la tension $(V_P)_{opt}$ s'accompagne d'une augmentation du courant $(I_P)_{opt}$. Cette diminution de la puissance crête est très proche des ordres de grandeurs évoqués dans la littérature : $- 0,15 \%$ par $^\circ\text{C}$ [11]. Comme précédemment, l'écart peut venir d'une imprécision de la mesure de température par suite d'un positionnement non optimal de la sonde de température.

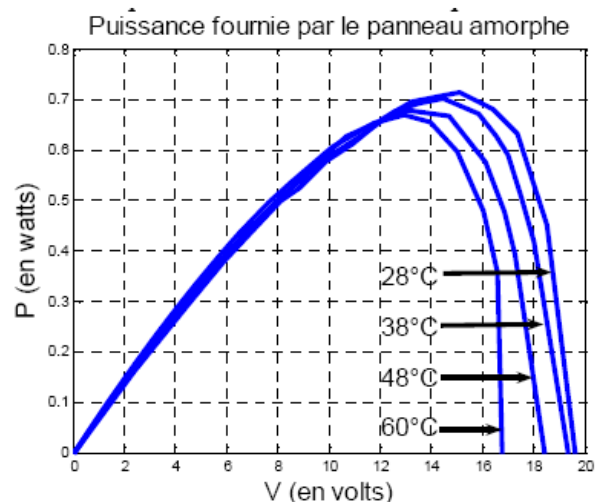


Figure 13 : réseaux $P = P(V)$ paramétrés par T_{Si}

Nous terminons cette analyse par l'étude des performances énergétiques globales du panneau. En conformité avec notre explication précédente, nous allons tenir compte de la zone pour laquelle l'intensité de l'éclairage est la plus faible. Le panneau ayant une surface active de 0,185 m² et le flux lumineux incident minimal ayant une puissance surfacique de 250 W/m², on a donc à T_{Si} = 28 °C :

$$\eta = \frac{(P_{\text{élec}})_{\text{max}}}{P_{\text{lumineuse}}} \approx \frac{(P_{\text{élec}})}{(P_{\text{lumineuse}})_{\text{min}}} = \frac{0,713\text{W}}{46,25\text{W}} = 1,5\%$$

Alors que le constructeur annonce, à 25 °C et sous « un soleil » (AM 1,5) un rendement maximum de :

$$\eta = \frac{(P_{\text{élec}})_{\text{max}}}{P_{\text{lumineuse}}} = \frac{10\text{W}}{185\text{W}} = 5,4\%$$

On voit que le rendement mesuré sur ce panneau est très inférieur à celui donné par le constructeur. Comme précédemment, nous l'expliquons par la différence entre le spectre de la lumière naturelle très riche en longueurs dans le visible alors que la lumière artificielle adoptée possède la majeure partie de son spectre dans l'infrarouge qui est inutile en termes de génération de paires électrons-trous pour une couche de silicium amorphe (cf figure 15). En effet, le panneau a : Si présente une longueur d'onde de coupure de l'ordre de $\lambda_{\text{coupure}} \approx 760 \text{ nm}$ (limite supérieure du visible) et donc ne peut pas transformer en puissance électrique une grande partie de la puissance lumineuse émise par la lampe ($\lambda_{\text{pic}} \approx 800 \text{ nm}$ et un spectre centré encore plus haut dans l'infrarouge) ce qui est nettement moins le cas pour la puissance lumineuse solaire dont le spectre après filtrage par l'atmosphère est justement centré dans le milieu du visible.

3 Cogénération thermique – électrique

Même si la lumière adoptée est imparfaite, nous venons de montrer que la conversion photo-électrique possède des rendements faibles. Ceci est dû au principe même de cette conversion. Plusieurs phénomènes viennent minorer le rendement de cette conversion : réflexion partielle de la lumière, absorption optique, recombinaison des porteurs avant de rejoindre les électrodes, etc.

Du point de vue de l'absorption optique, cette conversion est forcément partielle car seuls pourront interagir avec les électrons de valence, les photons suffisamment énergétiques. Tous les photons en dehors de la bande de sélectivité du matériau ($\lambda > \lambda_c$), n'auront qu'un effet thermique. Par ailleurs, les photons suffisamment énergétiques ($\lambda < \lambda_c$) ne pourront générer qu'une seule paire d'électrons-trous ; le reste de leur

énergie $h \left(\frac{c}{\lambda} - \frac{c}{\lambda_c} \right)$ sera convertie sous forme de chaleur. On voit donc que le rendement théorique de conversion passe de 100 % pour une lumière monochromatique ($\lambda = \lambda_c$) à 0 % pour une lumière monochromatique ($\lambda \ll \lambda_c$).

$$\text{Filtre énergétique}_{\text{photons} > \text{électrons}}(\lambda) = \frac{E_{\text{gap}}}{h \frac{c}{\lambda}} = \frac{\lambda}{\lambda_{\text{coupure}}}$$

Par intégration sur toutes les longueurs d'ondes, on peut déduire la part maximale d'énergie lumineuse convertible sous forme électrique.

A titre indicatif, le rendement d'un panneau solaire, située à la limite de l'atmosphère, ne pourra pas dépasser la valeur indiquée dans le tableau 3. Pour cela, on a pris pour base le rayonnement AM 0 en limite supérieure d'atmosphère (spectre solaire proche de celui d'un corps noir porté à 5770 K).

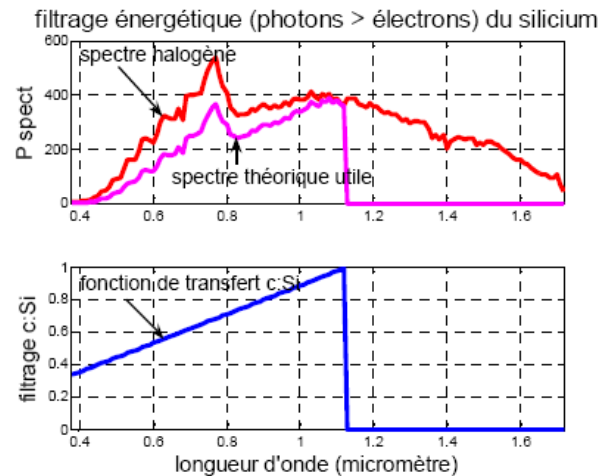


Figure 14 a : Puissance spectrale potentiellement convertible en énergie électrique par du silicium cristallin sous un rayonnement AM 0)

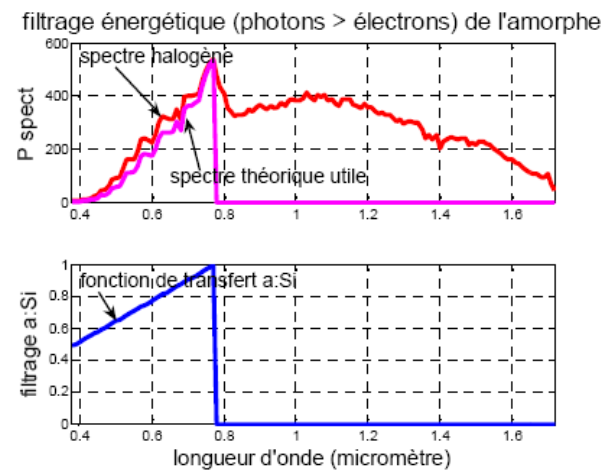


Figure 14 b : Puissance spectrale potentiellement convertible en énergie électrique par du silicium amorphe sous un rayonnement AM 0)

Matériau	$\eta_{\text{MAX théo}}$ en %
germanium	38
silicium cristallin	44
arséniure de gallium	42
silicium amorphe	38
sulfure de cadmium	20

Tableau 3 : Potentiel de conversion photo-électrique des semi-conducteurs courants (sous AM 0)

Par ailleurs, nous avons expérimenté l'importante diminution du rendement de cette conversion photo-électrique avec la montée en température du matériau, surtout dans le cas du matériau semi-conducteur massif. Ces deux constatations, rôle prédominant du thermique sur l'électrique et diminution du rendement photovoltaïque avec l'accroissement de la température, nous ont conduit à expérimenter la possibilité de coupler ces deux formes de convertisseurs d'énergie. Cette cogénération chaleur à basse température d'une part et électricité de l'autre pourrait revêtir deux avantages. Le premier d'optimiser les meilleures surfaces de toitures, le second d'éviter la dégradation du rendement électrique par fort ensoleillement grâce à une évacuation des calories vers le réservoir de chaleur du dispositif thermique. Le surcoût de l'installation photovoltaïque initiale ne devrait pas être très important car c'est bien le procédé de fabrication des photopiles qui est de loin le plus coûteux.

Nous avons donc cherché à quantifier la part d'énergie thermique que nous pourrions retirer d'un panneau photovoltaïque en lui associant un dispositif de récupération de calories par fluide caloporteur. Nous avons réalisé notre dispositif en détournant l'armature de nos panneaux individuels ; en effet, celle-ci-ci crée une zone creuse à l'arrière du panneau. Nous y avons donc versé une quantité connue d'eau dont nous avons mesuré l'échauffement en termes d'élévation de température et de durée de cette élévation. L'énergie thermique se calcule à partir de l'expression suivante :

$$E_{\text{therm}} = C.m.\Delta T_{\text{eau}}$$

Où

- C représente la capacité calorifique de l'eau et vaut $4,18.10^3 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$;
- m la masse d'eau ;
- ΔT_{eau} l'élévation de température.

Le volume d'eau disposé à l'arrière du panneau est de 500 ml et se trouve pris entre la cloison et une plaque de polystyrène limitant les échanges thermiques avec l'air ambiant. Par ailleurs, la charge électrique est une résistance adaptée pour tirer le maximum de la puissance électrique du panneau.

Pour la puissance thermique, nous avons pris comme référence la valeur moyenne de la puissance reçue par le panneau, soit $P_{\text{moy}} = 360 \text{ W/m}^2 \cdot 0,170 \text{ m}^2 = 61,2 \text{ W}$. Alors que pour la puissance électrique, nous avons comme précédemment pris comme référence la puissance reçue par la cellule la moins éclairée, soit pour le panneau : $P_{\text{min}} = 250 \text{ W/m}^2 \cdot 0,170 \text{ m}^2 = 42,5 \text{ W}$.

Cette mesure a duré $\delta t = 447 \text{ s}$ et a donné les résultats suivants.

Pour l'aspect thermique, on constate une élévation de température de $\Delta T_{\text{eau}} = 11,4 \text{ }^\circ\text{C}$, soit une énergie thermique récupérée sur la face arrière de $E_{\text{therm}} = C.m.\Delta T_{\text{eau}} = 23826 \text{ J}$ alors que le flux total incident était de $(E_{\text{th}})_{\text{réf}} = P_{\text{moy}} \cdot \delta t = 27356 \text{ J}$. Ce qui entraîne un coefficient de récupération de 87 %. Bien entendu, cette mesure est réalisée sans prendre en compte la capacité thermique du panneau lui-même. Une étude à

température quasi constante donnerait des résultats plus réalistes et sans doute meilleurs.

Pour l'aspect électrique, la puissance est sensiblement constante et égale à 4,6 W ce qui sur la durée de l'expérience donne une énergie de $E_{\text{élec}} = P_{\text{élec}} \cdot \delta t = 2056 \text{ J}$. Cette dernière doit être comparée à l'énergie incidente $(E_{\text{élec}})_{\text{réf}} = P_{\text{min}} \cdot \delta t = 19\,000 \text{ J}$. De ce point de vue, on peut revendiquer un coefficient de récupération de 10,8 %.

Ces mesures sont bien entendu imparfaites mais elles ont le mérite de montrer que dans le cadre de l'optimisation des systèmes, la cogénération solaire ouvre des perspectives importantes car, dans le bâtiment, nombreuses sont les utilisations de chaleur à basses températures ce qui est parfaitement compatible avec l'optimum de la conversion photo-électrique. Nous souhaiterions poursuivre cette étude dans le cadre d'un système réel avec fluide circulant à l'arrière du panneau pour reprendre de telles mesures en régime thermique quasi-permanent.

4 Adaptation d'impédance du panneau à la charge : réalisation et expérimentation du « MPPT »

4.1 Problématique

Comme nous l'avons évoqué, l'énergie solaire est cyclique et diffuse. De plus, la conversion photo-électrique est caractérisée par un rendement médiocre : au mieux 20% dans les applications industrielles courantes. Ceci fait que plus que pour toute autre système, il est important d'adapter la source à la charge. Ceci se réalise lors de l'investissement initial lorsque l'on choisit le courant de court-circuit et la tension à vide du générateur photovoltaïque par des mises en série / parallèle judicieuses de cellules élémentaires. Mais charge et ensoleillement fluctuent au cours d'une journée et il faut insérer une interface de puissance adaptant en permanence la photopile à sa charge. Dans la plupart des applications (couplage au réseau électrique ou recharge de batteries tampon), il va s'agir de tirer le maximum de puissance des panneaux quelles que soient les conditions d'utilisation (éclairage, charge électrique et température).

Nous nous plaçons dans le cas courant d'une utilisation à tension plus élevée que celle délivrée par notre photopile et nous choisissons donc un hacheur élévateur comme étage d'adaptation. Ce dernier fonctionne à la fréquence fixe de $F_D = 100 \text{ kHz}$ et est réglé par action sur son rapport cyclique α . Cette variable de réglage provient d'un micro-contrôleur dans lequel est implanté un algorithme « Perturb & Observ » [15] prélevant ses informations des grandeurs électriques V_P et I_P mesurées en sortie de panneau. Pour réaliser ce système de recherche automatique de puissance nous avons adopté un microcontrôleur de la famille PSoC développé par la société Cypress [17]. En effet, outre les classiques périphériques d'entrée - sortie (CAN et CNA) et l'unité centrale (CPU), ce composant propose des blocs fonctionnels paramétrables tant de type numérique que de type analogique. Compte-tenu du bruit de découpage, ce dernier aspect est utile pour supprimer les ondulations à F_D avant numérisation. Ainsi, deux composants sont

nécessaires pour piloter l'étage de puissance : le « PSoc » et le « driver » de transistor MOSFET.

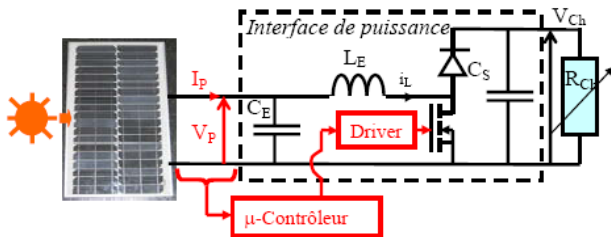


Figure 15 : synoptique du montage d'adaptation automatique d'impédance

4.2 Choix des paramètres

Comme nous ne mesurons ni l'éclairement incident ni la température du panneau, le point de maximum de puissance est a priori inconnu. Mais comme l'ont montré les courbes $P = P(V, T_{si})$, quand la charge électrique varie, on ne détecte qu'un maximum. Le principe de la commande « Perturb & Observ » est très simple (figure 16). Il consiste à solliciter le système en modifiant légèrement le rapport cyclique d'un incrément $\delta\alpha$. Lorsque le système s'est stabilisé autour de son nouveau point d'équilibre, on décide du nouvel incrément à appliquer en fonction de l'écart δP entre la puissance actuelle et la puissance précédente. Si δP est positif, on conserve le sens d'évolution de α en appliquant le même incrément $+\delta\alpha$; s'il est négatif, on applique l'incrément $-\delta\alpha$ afin de modifier le sens d'évolution de la commande. En régime permanent, le panneau oscille donc autour du maximum de puissance qu'il peut délivrer.

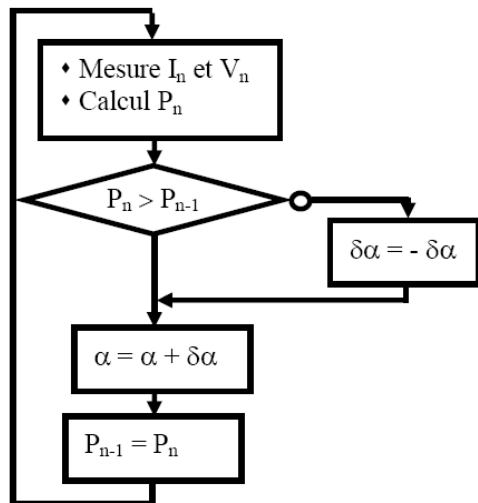


Figure 16 : algorithme « Perturb & observ » implanté

Nous voyons également qu'il faut tenir compte de la dynamique du hacheur afin de mesurer $P = V_P \cdot I_P$ à des instants pertinents. C'est cette dynamique qui va conditionner le choix de la période d'échantillonnage $T_{éch}$. Pour la déterminer en fonction de L_E et C_S , nous établissons un modèle moyen pour une conduction continue, ce qui est pertinent car la commande α évolue par petits incréments.

En amont du hacheur, on peut écrire :

$$L_E \frac{di_L}{dt} = V_P - (1 - \alpha) v_{Ch}$$

En aval du hacheur, on peut écrire :

$$C_S \frac{dv_{Ch}}{dt} = (1 - \alpha) \cdot i_L - \frac{v_{Ch}}{R_{Ch}}$$

Cette mise en équation fait apparaître des termes non-linéaires, résultats du produit de la commande par l'état. Et en notant : $\alpha = \alpha_0 + d\alpha$, $i_L = i_{L0} + di_L$ et $v_{Ch} = v_{Ch0} + dv_{Ch}$, et en négligeant les termes du second ordre, les deux expressions précédentes décrivent un système linéaire :

$$L_E \frac{d}{dt}(di_L) = [V_P - (1 - \alpha_0) \cdot v_{Ch0}] - (1 - \alpha_0) \cdot dv_{Ch} + v_{Ch0} \cdot d\alpha$$

$$C_S \frac{d}{dt}(dv_{Ch}) = \left[(1 - \alpha_0) \cdot i_{L0} - \frac{v_{Ch0}}{R_{Ch}} \right] + (1 - \alpha_0) \cdot di_L - i_{L0} \cdot d\alpha - \frac{dv_{Ch}}{R_{Ch}}$$

En utilisant la transformation de Laplace, on obtient donc :

$$L_E \cdot s \cdot di_L(s) = - (1 - \alpha_0) \cdot dv_{Ch}(s) + v_{Ch0} \cdot d\alpha(s)$$

$$C_S \cdot s \cdot dv_{Ch}(s) = + (1 - \alpha_0) \cdot di_L(s) - i_{L0} \cdot d\alpha(s) - \frac{dv_{Ch}}{R_{Ch}}$$

D'où l'on peut tirer les fonctions de transfert de $di_L(s)$ et de $dv_{Ch}(s)$ en fonction de la commande $d\alpha(s)$. Elles ont toutes les deux les mêmes pôles. A titre d'exemple, on a :

$$H_v(s) = \frac{dv_{Ch}(s)}{d\alpha(s)} = H_0 \frac{1 - \tau s}{1 + \frac{2m}{\omega_0} s + \frac{1}{\omega_0^2} s^2}$$

$$\text{avec } \omega_0 = \frac{(1 - \alpha_0)}{\sqrt{L_E \cdot C_S}} \quad m = \frac{1}{2(1 - \alpha_0) \cdot R_{Ch}} \cdot \sqrt{\frac{L_E}{C_S}}$$

$$\text{et } H_0 = \frac{v_{Ch0}}{(1 - \alpha_0)} \quad \tau = \frac{L_E \cdot i_{L0}}{(1 - \alpha_0) \cdot v_{Ch0}}$$

Ce qui avec les valeurs adoptées pour le filtrage $L_E = 800 \mu H$ et $C_S = 10 \mu F$ donne un coefficient d'amortissement très faible. Par exemple, pour un rapport cyclique d'1/2 et une résistance de charge de 90Ω , on calcule un coefficient amortissement $m \approx 0,1$ et une pseudo-période $T'_0 \approx 1,1$ ms. La simulation de ce convertisseur sous MATLAB/SIMULINK confirme ces calculs, comme le montre la figure 17.

On choisit donc une période d'échantillonnage de $T_{éch} = 50$ ms avec deux convertisseurs analogique-numérique de 10 bits. Et pour supprimer les inévitables ondulations de découpage présentes sur les variables mesurées i_P et v_P , nous plaçons en amont des convertisseurs des filtres analogiques passe-bas du second ordre à $F_D / 100$.

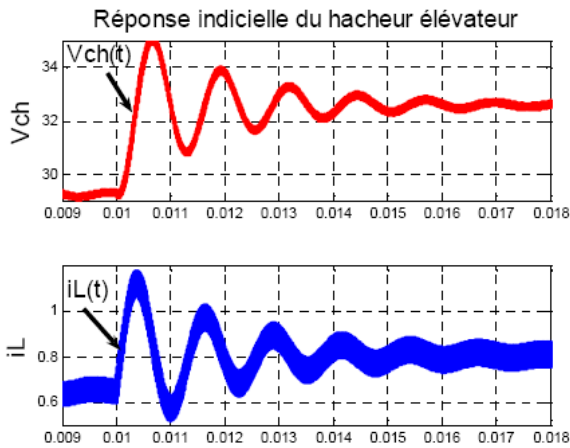


Figure 17 : simulation d'un échelon de commande de 0,05 autour de $\alpha = 1/2$. Réponse de $v_{ch}(t)$ et de $i_L(t)$

Le choix de la valeur de l'incrément/décément $\Delta\alpha$ de la commande α va résulter d'un compromis entre rapidité et précision. Plus celui-ci est petit, meilleure sera la précision de l'accrochage en régime permanent sur le maximum de puissance : rappelons que celui-ci est détecté par oscillation autour de sa position. En revanche plus la valeur $\Delta\alpha$ est faible plus la convergence de l'algorithme à la suite d'un élément perturbateur est lente. Il nous a semblé que les variations de l'environnement ne dépassant pas la seconde, il était surtout essentiel de privilégier la précision. Pour cela nous avons réalisé un essai en boucle ouverte pendant lequel le rapport cyclique balayait la plage [0 ; 1]. Ceci nous a permis de localiser le maximum de puissance pour un cas de figure précis ce qui permettra dans un deuxième temps de valider que l'algorithme implanté converge bien vers le maximum de puissance. Ceci nous a également permis d'observer qu'une résolution supérieure à 8 bits était inutile compte-tenu de la précision de nos mesures. Nous avons adopté la valeur de $\Delta\alpha = 0,0078 = 1/128$ ce qui nous amène à parcourir toute la plage de commande en environ 6 s. Lors des variations d'éclairement, nous verrons que cela nous a permis de garantir des temps de réaction de l'ordre de la seconde.

4.3 Résultats expérimentaux



Figure 18 : montage d'adaptation automatique d'impédance (parties puissance et commande)

Ne disposant de dispositif de mesure de l'éclairement solaire, nous avons réalisé des expériences sous lumière artificielle.

La première expérience (figure 19), peu réaliste, correspond à un éclairement soudain du panneau après une phase d'obscurité. Connaissant tous les paramètres de cette expérience nous validons ainsi le bon accrochage de l'algorithme d'adaptation automatique d'impédance.

La deuxième expérience (figure 20) consiste en une variation par échelon de la charge électrique alors que l'éclairement reste identique. Directement après chaque variation soudaine de la charge, la puissance prélevée au panneau diminue. Mais l'algorithme réagit en faisant varier la commande et à chaque fois directement dans le bon sens. Le transitoire ne dure pas plus d'une seconde. Comme souhaité, le point de convergence défini par l'algorithme est à chaque fois le même en termes de puissance ; en effet, l'éclairement et la température étant fixes, le potentiel du panneau est inchangé tout au long de l'essai. En négligeant les pertes du convertisseur d'adaptation, on a :

$$P = \frac{(v_{ch})^2}{R_{ch}} = \frac{\left(\frac{V_p}{(1-\alpha)}\right)^2}{R_{ch}} = \frac{(V_p)^2}{R_p}$$

la résistance apparente R_p vue par le panneau est :

$$R_p = (1 - \alpha)^2 \cdot R_{ch}$$

Donc toute diminution de la résistance de charge R_{une} entraîne une diminution du rapport cyclique permettant l'adaptation d'impédance. C'est bien ce qui est observé. La dernière expérience (figure 21) induit elle aussi une désadaptation transitoire de la charge R_p vue par le panneau. Il s'agit cette fois-ci d'une variation brutale d'éclairement. Cette dernière induit une modification de la caractéristique $I_p = I(V_p)$ du panneau. La nouvelle caractéristique ne rencontre plus la droite de charge $I_p = V_p/R_p$ au point optimal ; il faut pour cela que la commande α évolue. Directement après chaque variation soudaine de la charge, la puissance prélevée au panneau diminue. Mais l'algorithme réagit en faisant varier la commande et à chaque fois directement dans le bon sens. Le transitoire ne dure environ que deux secondes, et on peut mesurer par l'aire située entre la courbe de puissance et le segment de droite horizontale l'énergie perdue par rapport à une réaction instantanée de l'algorithme. Pour connaître l'importance de ces pertes sur une journée, il faudrait avoir des relevés précis d'un éclairement réel typique et ainsi mesurer la fréquence des changements et leurs rapidités. Si nous constatons des changements brutaux et fréquents, il faudrait revoir notre stratégie de MPPT pour conserver sa précision tout en la rendant plus rapide.

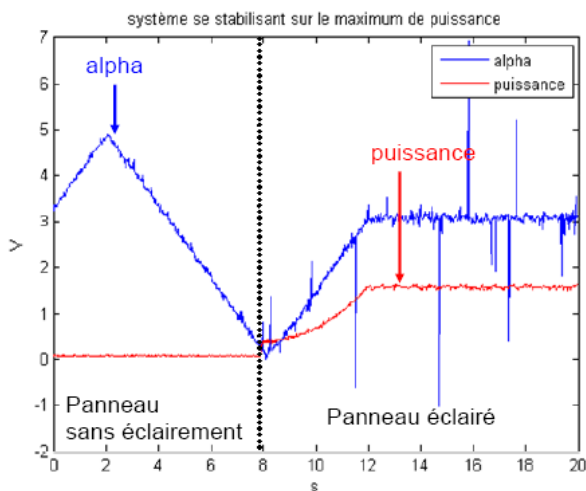


Figure 19 : éclaircissement brutal du panneau

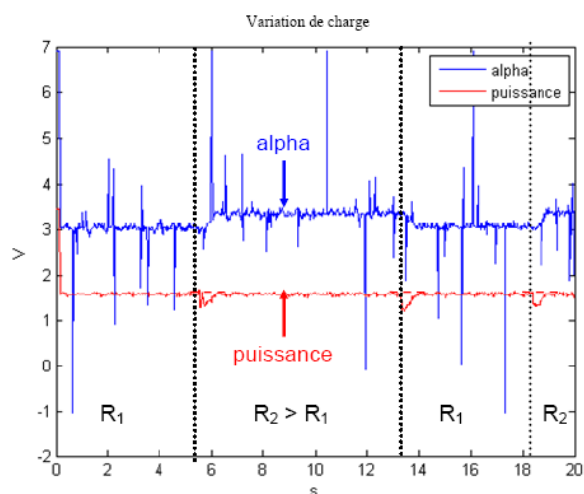


Figure 20 : variations brutales de la charge

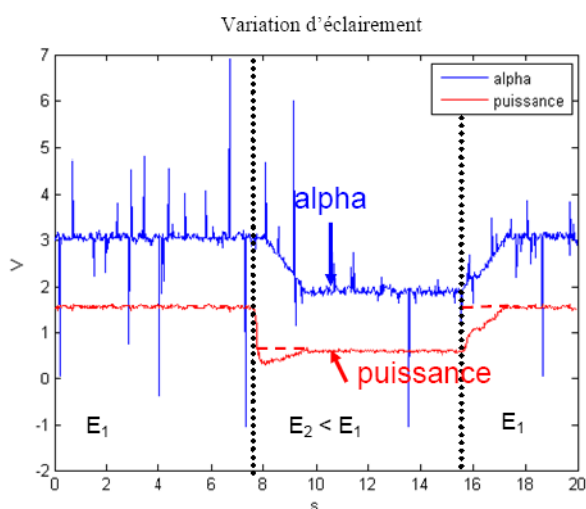


Figure 21 : variations brutales d'éclaircissement

5 Conclusion et perspectives

Comme nous l'avons évoqué en préambule, la diminution drastique des émissions de gaz à effet de serre va être un enjeu majeur de ce XXI^{ème} siècle. Or, le secteur du bâtiment est gros consommateur d'énergie, particulièrement dans nos pays développés. A titre indicatif, le secteur des logements et des bureaux français, avec 70,6 millions de tonnes équivalent pétrole, représente 44 % de la consommation d'énergie française [18]. Parmi l'ensemble des solutions qui peuvent être déployées, les toitures solaires permettent une production localisée d'électricité sans nouvelle emprise au sol.

L'idée qui sous tend notre contribution est de donner à des étudiants du Génie Electrique des explications scientifiques et objectives sur les mérites et les limitations de la filière photovoltaïque. Par des expériences simples, nous avons pu mettre en évidence l'interaction entre spectre lumineux et rendement du panneau solaire et cela pour les deux technologies les plus courantes : le silicium massif (c :Si) ou en couches minces (a :Si). Nous avons également pu insister sur le second paramètre prépondérant qui est la température du panneau. Cet échauffement néfaste du panneau pour la conversion photoélectrique, nous a ainsi amené à développer une expérience élémentaire de cogénération. Par ailleurs, nous avons également exploré le troisième aspect du générateur photovoltaïque. Dans le but d'une optimisation système, il s'agit bien évidemment d'adapter la source (ici non maîtrisée) à sa charge (également inconnue). Pour cela nous avons développé un ensemble expérimental complet autour d'un hacheur piloté par un micro-contrôleur PSoC très adapté à du prototypage rapide comme cela peut avoir lieu en salle de travaux pratiques. Ce dernier sujet couvre bien tous les aspects abordés par les étudiants de Génie Electrique : capteurs, filtrage, micro-contrôleur, programmation temps réel en langage C et électronique de puissance. Pour parfaire cette série de TP., il faudrait mettre en place un dispositif de mesure de l'éclaircissement solaire qui permettrait d'évaluer la rapidité des changements réels de luminosité. Il serait également intéressant d'envisager un dispositif d'acquisition et d'intégration qui ferait le bilan entre l'énergie convertible et l'énergie effectivement convertie sous forme électrique. Ce rendement sur cycle réel serait le meilleur indicateur de la performance des différents outils de recherche du maximum de puissance (MPPT).

Remerciements :

Nous remercions notre collègue de Paris Sud Delphine Marris-Morini travaillant à l'Institut d'Electronique Fondamentale (I.E.F.) pour les mesures de spectres lumineux qu'elle nous a aidé à réaliser.

Pour la mise en œuvre du micro-contrôleur PSoC, nous souhaitons remercier nos collègues de l'IUT de Cachan Yves Guinand et Jean-Yves Lechenadec pour avoir guidé notre prise en main de ce composant.

6 Bibliographie

- [1] H. Descamps, G. Galasso, F. Leman, R. Mouyal, Enjeux, défis et activités pédagogiques au lycée César Baggio de Lille
La Revue 3EI, n° 50, septembre 2007
- [2] Bernard Multon, Julien Seigneurbieux, Marie Ruelan, Hamid Ben Ahmed
Energie et développement durable
Bulletin des anciens élèves de l'ENSET / ENS de Cachan, n°228, février 2006
- [3] Jean-Claude Sabonnadière et al
Nouvelles technologies de l'énergie, tome3, géothermie et énergie de la biomasse
Hermes
- [4] Adolphe Nicolas
2050, rendez-vous à risques
Belin – Pour la science
- [5] Dominique Kopp
Convoitises sur les ressources stratégiques de l'Arctique – Début de guerre froide
Le Monde Diplomatique, septembre 2007, pages 4 - 5
- [6] Assemblée Nationale N° 3021
Rapport fait au nom de la mission d'information sur l'effet de serre présidée par Jean-Yves Le Déaut
- [7] www.populationmondiale.com
- [8] International Energy Agency
Key World Energy Statistics – 2007
- [9] Michel Amiet
La théorie des 3 E
La Revue 3EI, n° 46, septembre 2006
- [10] Bernard Multon, Jacques Ruer
Stocker l'énergie : oui, c'est indispensable et c'est possible. ! Pourquoi ? Où ? Comment ?
Publication du club ECRIN : www.ecrin.asso.fr
- [11] Alain Ricaud
Modules photovoltaïques, filières technologiques
Traité de Génie Electrique des Techniques de l'Ingénieur, D 3 940
- [12] Simone Mattei
Rayonnement thermique des matériaux opaques
Traité de Génie Electrique des Techniques de l'Ingénieur, BE 8 210
- [13] Lang Tran Tien
Circuits Fondamentaux de l'électronique analogique
Lavoisier, Tec&Doc, 1996
- [14] Ludovic Protin et Stephan Astier
Convertisseurs photovoltaïques
Traité de Génie Electrique des Techniques de l'Ingénieur, D 3 360
- [15] Jérôme Fadat
Chaîne de conversion photovoltaïque, commande MPPT
La Revue 3EI, n° 43, décembre 2005
- [16] V. Léger, D. Gatel, K. Pellion, Y. Vincent, J. Escasut, T. Vignal, B. Lequilleuc, J. Pichon
Chaîne de conversion solaire-photovoltaïque
La Revue 3EI, n° 46, septembre 2006
- [17] <http://www.cypress.com>
- [18] Observatoire de l'énergie

Les systèmes de génération d'énergie électrique à partir des courants de marées

S.E. BEN ELGHALI, L. DROUEN, M.E.H. BENBOUZID, J.F. CHARPENTIER, J. A. ASTOLFI, F. HAUVILLE

Résumé : Le potentiel mondial de génération d'énergie électrique par la récupération des courants de marée est très important. L'Europe occidentale et la France en particulier possèdent près de leurs côtes de nombreux sites exploitables. Ce type d'énergie renouvelable est donc amené à se développer fortement dans la prochaine décennie. Cette ressource est caractérisée par un fort potentiel énergétique lié à la forte densité de l'eau et à la vitesse des courants, par une grande prédictibilité liée à l'origine astronomique du phénomène de marée et par de faibles impacts environnementaux. Ceci rend cette énergie renouvelable particulièrement attractive dans le contexte actuel du développement de la production d'énergie électrique renouvelable. Ces dernières années un certain nombre de projets pour montrer la faisabilité de solutions technologiques pour exploiter cette ressource ont été mis en place. Cet article présente un état de l'art des concepts proposés par les principaux projets à travers le monde. La présentation s'intéresse en particulier aux technologies de capteurs et à leurs implications sur les systèmes de conversion électromécanique ainsi qu'aux technologies émergentes inspirées des développements récents dans le domaine de la propulsion navale.

1. Introduction

Les océans couvrent plus de 70% de la surface de la planète et mettent en jeu des énergies considérables qui constituent un important potentiel de production d'énergie. Il est par exemple possible de récupérer de l'énergie grâce aux différences de températures entre le fond de l'océan et la surface dans certaines zones tropicales ou grâce aux différences de salinité entre différentes masses d'eau. Il est également possible de récupérer une partie de l'énergie cinétique liée aux mouvements des masses océaniques à différentes échelles (courants marins et vagues). La biomasse océanique présente également un fort potentiel énergétique à exploiter. Un certain nombre de concepts pour exploiter ces différentes ressources ont été proposés au cours des dernières années et un certain nombre de démonstrateurs ont ainsi vu le jour.

Ainsi, il est possible d'extraire l'énergie thermique des océans dans les zones tropicales qui présentent d'importantes différences de température entre différents points de la masse d'eau. Les solutions technologiques proposées reposent sur l'utilisation de machines thermiques exploitant des cycles thermodynamiques. Les gradients de salinité peuvent, également être exploités par le biais de processus osmotiques. Cependant, les développements de l'exploitation de ces deux dernières ressources sont pour l'instant limités par des considérations de rentabilité économique liées à des limitations technologiques [1-3].

La culture de la biomasse marine peut quant à elle conduire à la production de carburants d'origine végétale susceptibles d'alimenter par exemple des piles à combustible pour produire de l'énergie électrique.

Mettre au point un système efficace pour récupérer l'énergie des vagues est toujours à l'heure actuelle un défi technique et un certain nombre de concepts originaux ont été proposés pour exploiter cette ressource.

Les éoliennes offshore dont la technologie est actuellement mure sont en cours de développement à grande échelle.

Il semble évident que seule une faible part du potentiel global des énergies renouvelables marines peut être exploité dans des conditions de rentabilité économique. Cette exploitation réaliste correspond, en fait, à un certain nombre de sites particuliers où il est possible d'extraire une quantité significative d'énergie et de l'acheminer vers un réseau de transport d'énergie en utilisant les technologies disponibles relativement bon marché. Malgré ces restrictions liées à des critères de rentabilité économique, la contribution potentielle des énergies renouvelables marines à la production d'énergie électrique pour certaines régions du monde reste tout de même considérable.

Parmi ces énergies marines, l'énergie cinétique présente dans les courants marins qu'ils soient liés au phénomène des marées ou au grand mouvement de circulation océanique comme le gulf-stream, représente un potentiel important. Cette énergie peut être extraite

en utilisant des turbines relativement « conventionnelles ». C'est la raison pour laquelle la recherche et le développement de concepts efficaces pour récupérer ces énergies représentent un enjeu majeur pour un grand nombre de chercheurs et d'industriel à travers le monde [4,5]. Les côtes de l'Europe occidentale présentent par exemple de nombreux sites où l'intensité des phénomènes liés aux courants marins ainsi que la proximité d'un réseau de transport d'énergie rendent possible une production rentable d'électricité. La ressource potentielle relative aux courants de marée est considérable. Elle est estimée à 24 TWh/an pour l'Europe occidentale dont 48 % en Grande Bretagne, 42 % en France et 8 % en Irlande [6].

Il y a deux possibilités pour exploiter les déplacements de masses d'eau créés par les marées. La première consiste à installer un barrage sur une baie ou un estuaire où le marnage est considérable (usine marémotrice). La seconde consiste à récupérer directement l'énergie cinétique des courants générés par le phénomène de marée (hydrolienne).

Le principe d'une usine marémotrice est très proche de celui d'une installation hydroélectrique classique. Les particularités les plus notables sont que le flux d'eau se produit au cours d'un cycle de marée consécutivement dans les deux directions et que les turbines et les générateurs doivent donc être conçus pour pouvoir assurer un fonctionnement dans les deux sens. D'autres contraintes spécifiques sont liées à l'immersion de la turbine dans un milieu salin plus agressif que l'eau douce des cours d'eau. De manière simplifiée on installe un barrage à travers une baie ou un estuaire. Lors du flot la mer monte à un niveau supérieur à celui de l'eau située dans le bassin en amont du barrage. Il est alors possible de turbiner l'eau de mer en remplissant le bassin. Lors du jusant, la mer se retire et la surface de la mer descend alors en dessous du niveau de l'eau stockée dans le bassin ce qui rend possible de turbiner l'eau de mer lors de la vidange du bassin (Fig.1).

La plus importante installation marémotrice au monde est l'usine qui barre l'estuaire de la Rance en France (Fig. 2) avec une puissance installée de 240 MW. La partie close de l'estuaire à une surface de 22 km². Le marnage sur ce site exceptionnel peut atteindre plus de 13 m lors des marées d'équinoxe. L'installation comprend 24 groupes turbines générateurs de type bulbe de 10 MW chacun qui peuvent fonctionner selon les deux directions de flux [7,8]. L'usine installée sur la rivière Annapolis au Canada à quant à elle une puissance de 20 MW. Les turbines utilisées dans ce système présentent la particularité d'intégrer le générateur électrique à la circonférence des aubes (ou pales) de la turbine [6].

Ce type d'installation présente des désavantages majeurs. Tout d'abord seuls un très petit nombre de sites dans le monde possèdent des marnages suffisants pour être économiquement intéressants. D'autre part, l'installation de barrages de grande ampleur à travers des baies ou des estuaires a des conséquences significatives sur l'écosystème et génère des conflits d'usage avec les usagers de la mer. Pour ces raisons dans la dernière décennie les efforts des chercheurs et des ingénieurs se sont portés sur des systèmes permettant de prélever directement l'énergie cinétique des courants de marées. Ces systèmes basés sur des turbines en eau libre peuvent être implantés dans plus de sites. La ressource a donc un très fort potentiel énergétique [1], [9-15]. Ce type de système a de plus beaucoup moins d'impact sur l'écosystème et les autres usagers de la mer [5].

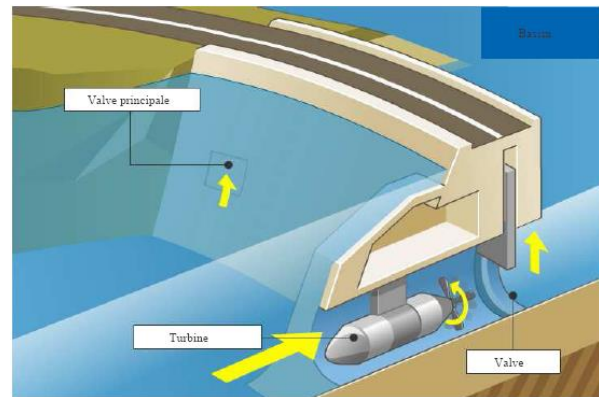


Figure 1 : Système marémoteur utilisant un groupe bulbe

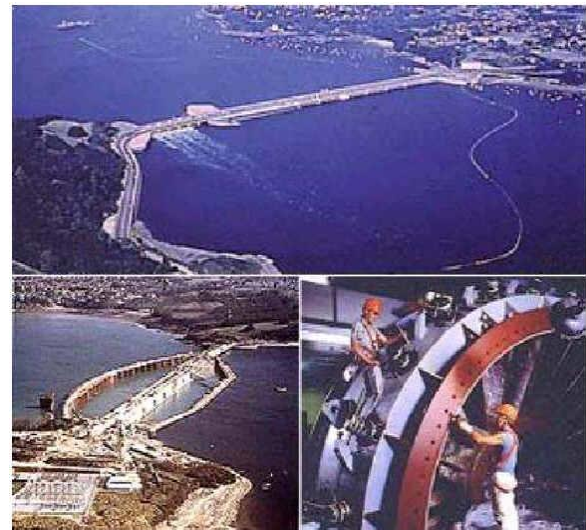


Figure 2 : Vue générale de l'usine marémotrice de la Rance [6]

Beaucoup de zones côtières dans le monde sont le siège de très forts courants de marées. La figure 3 montre 3 exemples de ce type de site en France. Le raz Blanchard en Normandie, le chenal du Fromveur ainsi que le raz de Sein à l'ouest de la Bretagne sont des sites où les courants peuvent atteindre plus de 8 nœuds et ont donc un très fort potentiel. Cet article a pour but de faire le point sur les concepts fondamentaux concernant l'extraction de cette énergie et d'établir un état de l'art des différentes technologies associées aux principaux projets à travers le monde. Nous analyserons également les caractéristiques des principaux systèmes de conversions électromécaniques pouvant être utilisés pour ce type d'application et nous discuterons des possibilités ouvertes par l'apparition de nouvelles technologies dérivées des systèmes éoliens ou des systèmes de propulsion navale.

2 Généralités et contexte

Les espoirs que font naître les projets sur l'énergie renouvelable des courants de marées sont à la hauteur des avantages que l'on peut prêter à cette ressource : Le milieu contient en effet une forte densité d'énergie car l'eau est environ 800 fois plus dense que l'air, la nature du phénomène est astronomique et est donc prédictible et peu influencée par les phénomènes météorologiques. La vitesse du courant et donc l'énergie disponible sur un site peuvent être calculées heures par heures et minutes par minutes plusieurs années en avance. Les phénomènes tels que le vent ou la houle n'occasionnent que des fluctuations de second ordre si la hauteur d'eau sur l'hydrolienne est conséquente. Le courant de marée est donc globalement indépendant des phénomènes comme le vent, le brouillard ou les nuages dont dépendent les autres sources d'énergie renouvelables. Ce caractère prédictible représente un avantage décisif pour une intégration réussie dans un réseau de transport d'énergie [9].

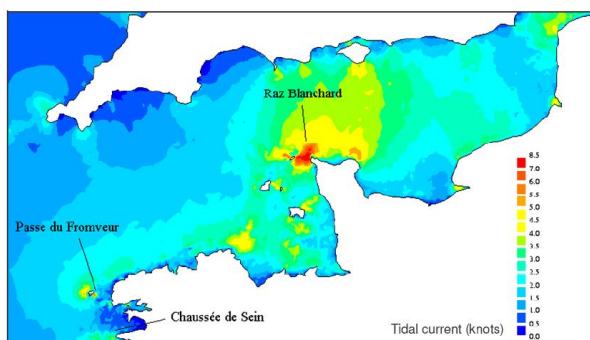


Figure 3 : Sites potentiels sur la côte occidentale française : le raz Blanchard, Le raz de Sein, et la passe du Fromveur.

A. Caractéristiques de la ressource énergétique

Les courants marins exploitables sont principalement créés par le phénomène des marées et à une moindre échelle par des phénomènes liés à des différences de densité ou de température au sein des masses d'eau. La marée provoque le mouvement de grande quantité d'eau vers le large (jusant) ou vers les côtes (flot) avec une périodicité principale d'une demi journée (cycle semi-diurne de 12 heures et 24 minutes) ou d'une journée (cycle diurne de 24 heures et 48 minutes) selon les sites. Dans la plupart des sites le phénomène est une combinaison de ces 2 cycles majeurs. L'amplitude des marées et des courants qu'elles génèrent dépendent de la position de la lune et du soleil par rapport à la terre. L'influence en termes de force d'attraction de la lune est d'environ 68 % contre 32 % pour le soleil. Dans les endroits où le cycle semi-diurne est prépondérant les maxima d'amplitudes de courants correspondent à la nouvelle et à la pleine lune (Lors de ces marées dites de « vives eaux », le soleil et la lune sont alors pratiquement alignés à la terre et conjuguent leurs effets). Les minima d'amplitudes se produisent lors du 1^{er} et du 3^{ème} quartier (marées dites de « mortes eaux » où les effets du soleil et de la lune se compensent partiellement). A des endroits où le cycle principal est un cycle diurne, l'amplitude des marées dépend de la déclinaison de la lune (hauteur de l'astre par rapport à l'équateur), les plus fortes marées correspondent alors à des grandes déclinaisons et les plus faibles à des déclinaisons nulles. Ces variations en termes d'amplitude correspondent à des périodicités de 2 semaines, un an, et à des périodes plus longues. Ces amplitudes sont entièrement prédictibles plusieurs mois voire plusieurs années à l'avance [6], [16].

Les caractéristiques de la ressource sont généralement calculées à partir de bases de données océanographiques avec un maillage géographique de résolution donnée. Pour chacune des mailles d'espace, il est possible de disposer des principales données suivantes : vitesse en fonction de l'heure pour les marées de vives eaux, profondeur, houle centennale et moyenne, distance de la côte. Les 2 premières données permettent de reconstituer facilement la vitesse probable du courant en fonction de la date et de l'heure. Les autres données donnent des indications précieuses sur les contraintes liées à l'exploitation du site et sur les caractéristiques des perturbations possibles [12], [17-18]. Pour illustrer l'exploitation de ce type de données, l'évolution théorique de la valeur des courants de marées dans le Raz de Sein pour l'année 2007 et pour mars 2007 est donnée à la figure 4.

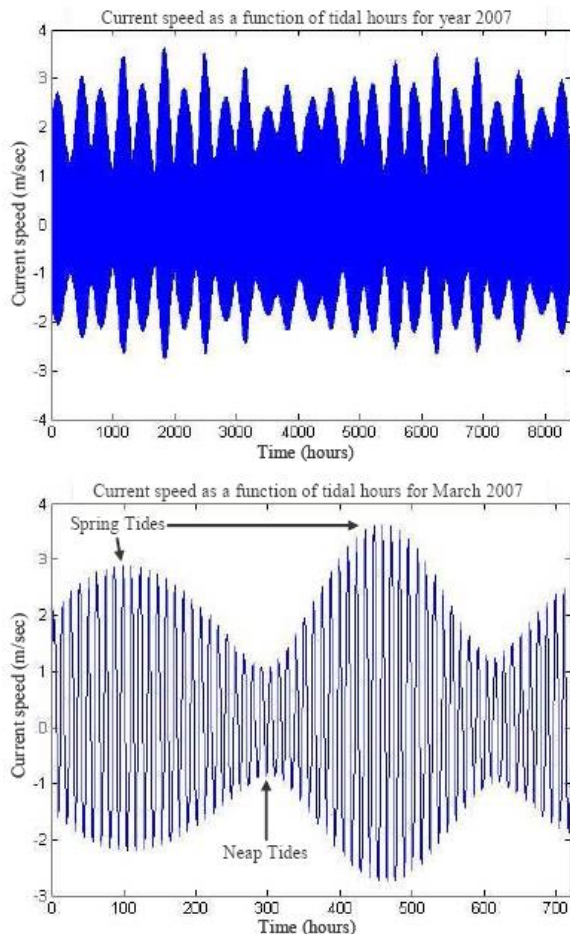


Figure 4 : Évolution théorique de la valeur des courants de marées dans le Raz de Sein (France) pour l'année 2007 et pour mars 2007.

B. Considérations sur l'extraction de l'énergie cinétique des courants

L'expression de la puissance théoriquement disponible sur une turbine marine est similaire à celle obtenue pour une éolienne et est donnée par l'équation suivante [6], [19-20].

$$P = \frac{1}{2} \rho . A . v^3 \quad (1)$$

où ρ est la densité du fluide, A est la section de la turbine et v la vitesse du fluide. Comme dans le cas de l'éolien, seule une fraction de cette puissance théorique disponible peut être réellement extraite par le système de conversion. De ce fait on introduit dans l'équation (1) un coefficient C_p (coefficient de puissance) inférieur à 1 qui représente le pourcentage de puissance pouvant être extrait par la turbine (ce coefficient de puissance prend en compte les limitations du capteur, les pertes dans la chaîne de conversion (transmission, générateur, électronique...))

$$P = \frac{1}{2} \rho . C_p . A . v^3 \quad (2)$$

Pour les aérogénérateurs, les valeurs typiques de C_p sont comprises entre 0,25 et 0,3 pour les points de fonctionnement nominaux. Pour les turbines marines il est possible d'espérer des C_p compris entre 0,35 et 0,5 [21].

Un élément important pour une comparaison entre l'éolien et les systèmes de récupération des courants marin est la taille des machines à utiliser. En effet, si l'on calcule, avec l'équation (2) la section, A , nécessaire pour récupérer une même puissance en utilisant des valeurs typiques de vitesse de courants et en tenant compte de la densité de l'eau qui est environ 800 fois plus dense que l'air, il apparaît que les hydroliennes seront significativement plus compactes que des éoliennes de même puissance. Ce point est particulièrement important car il signifie pour des machines de grande puissance une diminution significative des coûts de fabrication et d'installation. La figure 5 illustre ce résultat par une comparaison de 2 turbines de 1 MW. Le diamètre de la turbine éolienne est alors d'environ 55 m contre environ 18 m pour la turbine marine.

De manière générale, les machines utilisées pour récupérer l'énergie des courants de marées seront, d'une part, beaucoup plus compactes que les aérogénérateurs et seront, d'autre part, capables de produire une puissance pouvant être prévue à l'avance et donc plus facilement exploitable au sein d'un réseau de transport d'énergie [20], [22].

3 Technologies et concepts de turbines

Récupérer l'énergie des courants marins suppose de convertir l'énergie cinétique d'un fluide en mouvement pour la transformer en un mouvement mécanique susceptible, par exemple, d'entraîner un générateur électrique. Ceci explique que de nombreux concepts parmi ceux qui sont proposés à l'heure actuels sont très proches des technologies éoliennes qui correspondent au même type de conversion électromécanique. De manière générale la plupart des systèmes proposés correspondent à 3 types principaux [23]. Ces 3 grandes familles de systèmes sont décrites à la figure 6 :

- Les systèmes de turbines à rotor à axe horizontal comme ceux installés dans le chenal de Bristol entre le pays de Galles et l'Angleterre ou près d'Hammerfest en Norvège [24,25] Dans ces systèmes l'axe de la turbine est dans le sens du courant.

- Les systèmes de turbines à rotor à axe perpendiculaire au courant (technologies proches des turbines Darrieus) comme le dispositif qui a été implanté expérimentalement dans le détroit de Messine entre l'Italie et la Sicile [26].
- Des systèmes basés sur des profils oscillant (turbines à battement caudal) dans le sens du courant tels que ceux installés dans le nord de l'Écosse [27].

Dans la suite de l'article nous nous attacherons à présenter une vue d'ensemble des projets majeurs utilisant un de ces 3 concepts fondamentaux

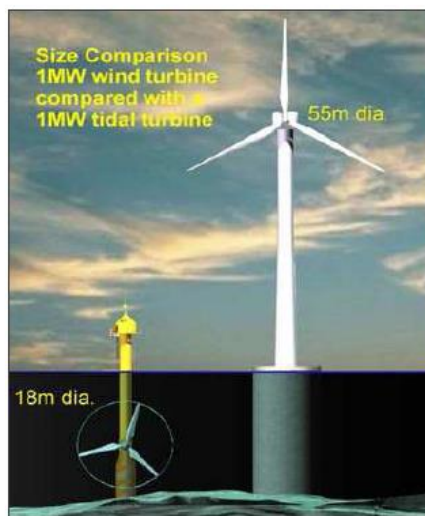


Figure 5 : Comparaison à puissance égale entre une éolienne et une hydrolienne [MCT]

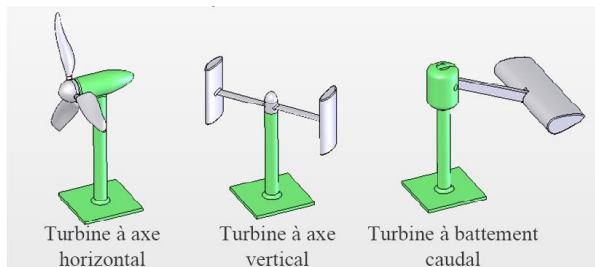


Figure 6 : Concepts fondamentaux de turbines hydroliennes.

A. Projets basés sur l'utilisation de turbines à axe horizontal

1) Le projet SEAFLOW/SEAGEN de la société Marine Current Turbine (MCT) au Royaume Uni [24].

La société «Marine Current Turbine» (MCT) a testé un prototype d'hydrolienne nommé «Seaflow» basé sur un système de turbine à axe horizontal dans le Nord du Devon à approximativement 1,1 km de la côte et 25 m de profondeur. Le diamètre de l'hélice dont la conception est assez proche d'une turbine éolienne classique est de 11 m. Un contrôle de pas est utilisé pour

la régulation de puissance. Le générateur est constitué d'une machine asynchrone à cage associée à un convertisseur 4 quadrants à IGBT. La figure 7 présente des vues de cette turbine Seaflow. La puissance nominale développée par ce système est de 300 kW crête dans des conditions optimales de courant de marée. La turbine tourne alors à 15 tr/min. Cette installation expérimentale n'est pas connectée au réseau mais débite sur une charge résistive réglable. La machine est montée sur une pile plantée dans le sol marin dépassant de la surface de la mer. L'ensemble constitué de la génératrice et de la turbine peut ainsi s'élever le long de cette colonne jusqu'à la surface ce qui permet un accès par bateau facilité pour les opérations de maintenance. Accéder et opérer sur un système sous-marin dans des conditions de forts courants et souvent dans des conditions météorologiques défavorables est en effet très difficile voire impossible.

La seconde phase du projet est d'étendre ce concept à un ensemble de turbines/générateurs jumeaux fonctionnant en contre rotation d'environ 500 kW sur la même pile chacune ce qui amènerait la puissance totale du système autour d'1 MW (Fig. 8a).



Figure 7 : Turbine seaflow en position immergée et émergée [MCT].

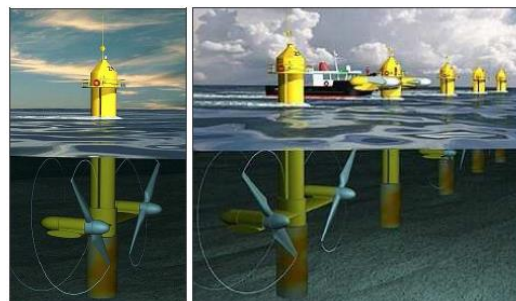


Figure 8 : Vue d'artiste de turbines Seagen [MCT].

Un système Seagen pourrait ainsi produire environ 3 fois plus que le prototype Seaflow. Ces systèmes pourraient avoir un diamètre d'environ 15 m et être associés en une ferme de plusieurs machines pour atteindre des puissances de production de l'ordre de 5 MW (Fig. 8b).

2) Le projet E-Tide (Norvège) [25].

La société Hammerfest Strom a développé un projet appelé Blue ou E- Tide Concept à Kvalsund au nord de la norvège en 2003. Le système, constitué d'une turbine contra rotative est fixée au sol Cette turbine peut opérer dans les 2 sens de rotations par inversion du pas de l'hélice (Fig. 9). Un système de 300 kW a été testé, et comme pour le projet « Seagen », un système de l'ordre du MW a été dimensionné pour ce même site d'essai. La turbine a un diamètre d'environ 15m.

3) Le projet Tidal Stream Energy (Royaume Uni) [28].

La figure 10 est une illustration du projet anglais «tidal stream ». Le projet a été étudié pour être implanté sur le site de pentland firth situé entre le nord de J'écosse et les îles Orkney [18]. Ce site étant de «faible» profondeur et avec un grand marnage, la première option choisie (Fig. 10a) serait d'équiper le système de 2 turbines de 20 m de diamètre développant une puissance nominale entre 1 et 2 MW. Le système fonctionne entre 30 et 50 m de profondeur et flotte entre deux eaux grâce à un bras articulé fixé au sol par une rotule à un corps mort. Le bras est associé à une base flottante à son extrémité haute. Ce système permet le déplacement des turbines dans les 3 directions. On peut également noter que ce bras articulé permet de remonter le système pour les opérations de maintenance et d'installation. Une évolution actuelle de ce projet consiste à fonctionner avec 4 turbines au lieu de deux pour diminuer les charges hydrodynamiques sur les pales. Ceci conduit à un ensemble pouvant développer une puissance totale proche de 4 MW. Le système a été testé en rivière à échelle réduite (rotor de 15 m de diamètre) avec succès

4) Le projet "Tidel" de la société SMD Hydrovision (GB) [29].

Le concept à la base du projet Tidel propose d'associer 2 turbines de 500 kW montées sur une poutre horizontale (Fig. 11). Le système flotte entre 2 eaux et est amarré au sol par des chaînes qui permettent un alignement de la turbine dans la direction du courant sans aucune intervention. Le système semble facile à implanter dans un grand nombre de sites côtiers car il ne nécessite pas de mettre en place de structures importantes. Chacune des turbines composées d'une

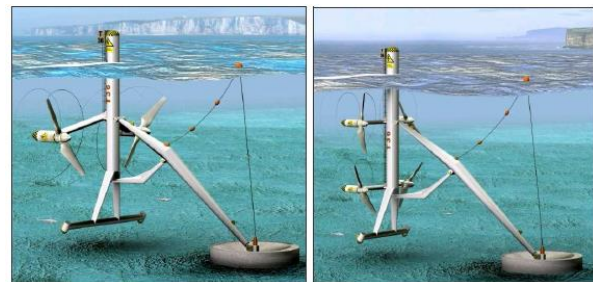
hélice à pas fixe de 15 m de diamètre est associée à un multiplicateur et un générateur disposé dans une nacelle.



(a) turbine E-tide.

(b) Installation.

Figure 9 : Le système Blue ou E-Tide [Stream AS]



(a)

(b)

Figure 10 : Le projet Tidal Stream [Tidal Stream]

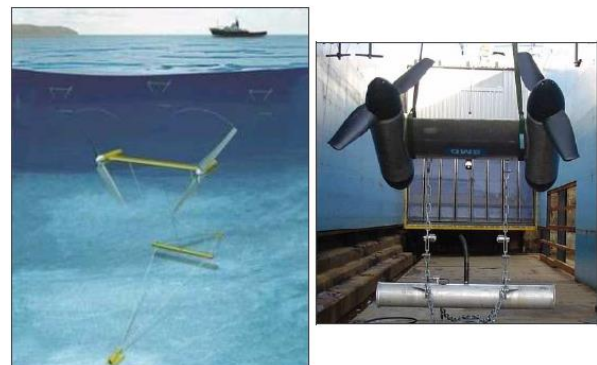


Figure 11 : Illustration et vue du prototype du projet de turbine TidEL [SMD Hydrovision]

Ces systèmes de 1 MW ont été conçus pour être disposés dans des sites offshore d'une profondeur supérieure à 30 m où la vitesse du courant atteint 5 noeuds (environ 2,5 m / s)

5) Le projet Lunar Energy (GB) [30].

Ce projet utilise une turbine carénée sous tuyère fixée au sol par un socle pesant. La tuyère permet de récupérer de l'énergie sur une plus grande surface que celle de la turbine et d'accélérer le courant. Ceci permet d'utiliser une turbine plus compacte pour une même puissance extraite. Le principe du système proposé par Lunar

Energy est d'utiliser une turbine à pales symétrique qui entraîne un générateur situé au dessus de la carène par une transmission hydraulique. L'ensemble turbine/transmission/générateur est amovible et peut être extrait par un jeu de câble situé sur la tuyère pour des opérations de maintenance. Le système de turbine et de tuyère «lunar energy» doit permettre d'extraire de l'énergie dans les 2 directions de courants même si le courant n'est pas orientée dans l'axe exact de la turbine (il est possible d'extraire de l'énergie dans un secteur angulaire de $\pm 40^\circ$ autour de l'axe) sans nécessiter un complexe et coûteux contrôle d'orientation de la turbine. Un modèle au 1/20^{ème} a été testé en 2004 et l'installation d'un système de 1 MW est attendue dans les prochain mois.

6) Le projet Hydrohelix (France)[31]

Le but de ce projet est de développer des turbines à pales symétrique à pas fixe de 200 kW sous tuyère (Fig. 13a) et de les associer pour former des unités de production de 1 MW (Fig. 13b). Un prototype de 10 kW nommé "Sabella" doit être installé aux environs de Benodet en avril 2008. Comme dans le cas précédent, l'utilisation d'une turbine carénée permet l'augmentation des performances hydrodynamiques et la protection des pales par une couronne extérieure.

Tous ces projets ont en commun un certain nombre de caractéristiques. La turbine tourne à des vitesse très faibles (10 à 20 tr/min) ce qui impose des couples très élevés pour une puissance donnée.

B. Turbines à axe perpendiculaire au courant

La plupart des turbines à axe perpendiculaire au courant sont des turbines à axe vertical très proches dans leur principe de la turbine de type Darrieus utilisée en éolien avec une base au sol. Ce type de turbine est un système où le fluide traverse la section de la turbine perpendiculairement à son axe de rotation. Ces systèmes permettent d'extraire l'énergie venant de toutes les directions de flux possibles sans aucune reconfiguration de la turbine. Il est ainsi possible d'exploiter l'ensemble de l' "ellipse de courant" d'un site [32]. Pour des applications marines il est possible d'utiliser ce type de systèmes pour transmettre le mouvement de rotation de la turbine directement à une plate-forme flottante à la surface sans lui associer de complexes transmissions mécaniques ou des nacelles sous marines. Cependant, la proximité de la turbine de la surface entraîne une plus grande variabilité de la ressource dus au vent et à la houle et les mouvements de plate-forme liés à ces phénomènes perturbent le fonctionnement de la turbine. Comme les turbines à axe horizontal les vitesses de

rotations de ce type de turbines sont très faibles (autour de 15 tr/min).

1) Le projet Enermarr (Italy) [26].

Ce projet repose sur l'utilisation de la turbine Kobold (Fig. 14a). Cette turbine possède un couple de démarrage très important qui lui permet de démarrer sans assistance particulière. Une installation pilote a été testée dans le détroit de Messine près de la cote Sicilienne dans un courant nominal de 2 m/s (Fig. 14b). Le système testé peut produire 20 kW pour une vitesse de courant de 1,8 m / s

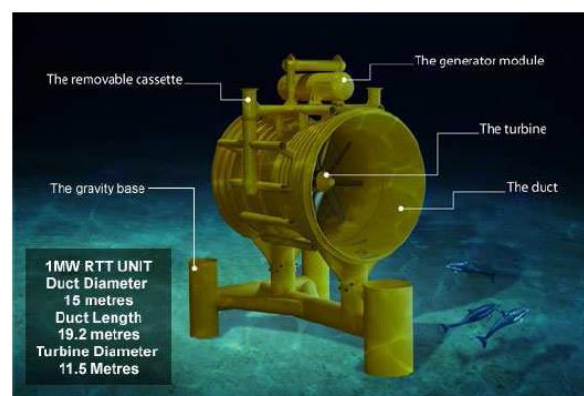


Figure 12 : Le système Lunar Energy [Lunar Energy]



(a) turbine. (b) unité de production. (c) démonstrateur « sabella »
Figure 13 : Le projet Hydrohelix [HydroHelix Energies]

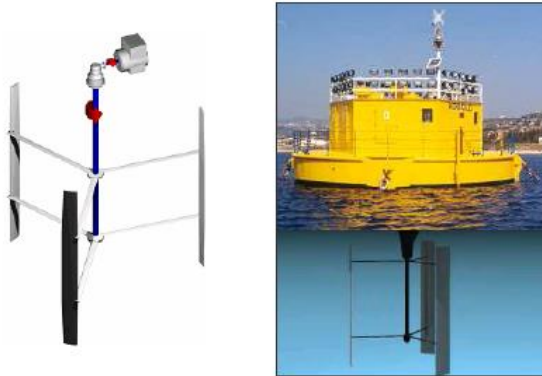
2) Le projet Blue Energy (Canada) [33].

Le système est constitué de rotors à 4 pales fixes qui entraînent un multiplicateur associé à une génératrice. L'ensemble est monté dans un robuste caisson flottant caréné de manière à accélérer le flux de courant. Le système est amarré au fond de l'océan. Le générateur et le multiplicateur se situent au dessus du caisson et donc au dessus de la surface ce qui permet une maintenance aisée. Les pales présentent un profil spécifique qui permet, d'une part, à la turbine d'avoir une vitesse périphérique plus importante que la vitesse du fluide, et d'autre part, que le sens rotation de la turbine soit identique pour toutes les directions de courant. Chaque unité est prévue pour une puissance nominale de 200 kW. Plusieurs de ces Unités peuvent être mises à couple afin de créer un barrage flottant perpendiculaire au courant avec une grande capacité de production. Un

prototype a été testé dans les installations de l'université de Colombie britannique.

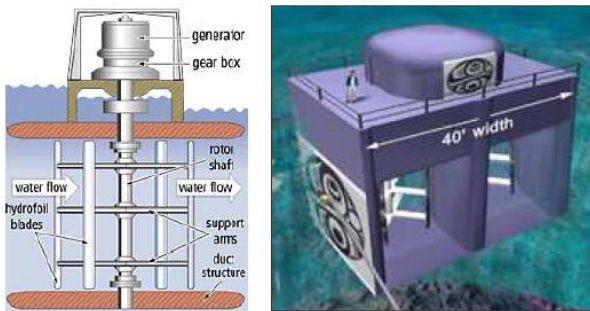
3) La Turbine de type Gorlov (USA) [34,35] et Achard [36].

La turbine hélicoïdale Gorlov (GHT) est formée de plusieurs pales hélicoïdales assemblées dans une cage d'écureuil. Comme dans le projet précédent les pales dont les profils sont inspirés de profils d'ailes ont une vitesse périphérique plus importante que la vitesse du courant et tournent dans la même direction quelque soit l'orientation du courant



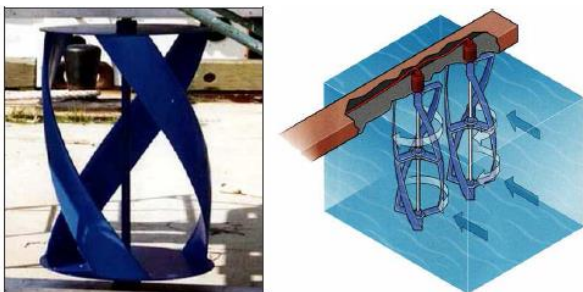
(a) Turbine Kobold . (b) Base flottante.

Figure 14 : Le projet Enermar [Ponte di Archimede]



(a) Blue Energy turbine. (b) Turbine platform.

Figure 15 : Le projet Blue Energy [Blue Energy].



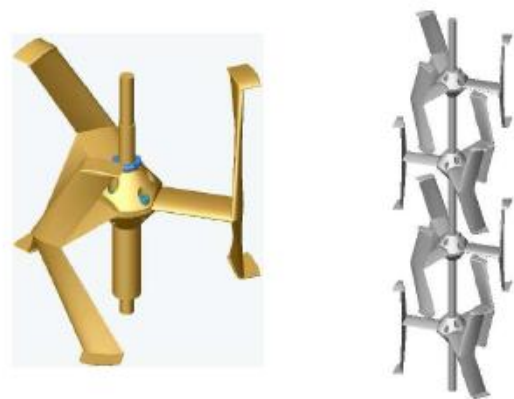
(a) turbine Gorlov. (b) Vue d'artiste d'une installation.

Figure 16 : La turbine Gorlov [GCK Technology].

La GHT démarre sans assistance et peut produire une puissance significative à partir de 1,5 m / s de vitesse de courant. Les dimensions de la turbine standard sont de

1 m de diamètre et de 2,5 m de longueur. Cette turbine peut alors produire de 1,5 kW pour un courant de 1,5 m/s à 180 kW pour un courant de 7,7 m/s. Ce type de turbine peut être installé horizontalement ou verticalement [35]. Une vue d'artiste d'un projet d'usine comprenant 2 de ces turbines installées horizontalement est présentée à la figure 16b.

Un concept très proche de la GHT est la turbine Achard développée dans le cadre du projet Harvest (France) [36]. Cette turbine comprend des pales à profil d'ailes fixes par rapport à l'axe qui ne sont pas contrairement à la GHT assemblées en une cage d'écureuil mais sont reliées à l'axe par leur centre. (Fig. 17a). Un aileron d'extrémité est disposé sur chaque pale afin de minimiser les tourbillons en bout d'aile et la traînée induite par ces phénomènes turbulents. Les bras de liaisons entre les pales et l'axe ont eux aussi des profils d'ailes et peuvent avoir un pas différent de 0 ce qui permet de pousser vers le haut ou vers le bas la turbine selon la valeur de ce pas. Le concept permet d'associer plusieurs turbines pour former un chapelet sur le même axe et ainsi augmenter la puissance produite par unité (Fig. 17b). Un ensemble de ces chapelets peut alors être attaché à une barge flottante à une extrémité et ancré au fond par l'autre extrémité pour donner une ferme hydrolienne complète.



(a) Turbine Achard. (b) Chapelet de turbines.

Figure 17. Le projet Harvest[36].

4) Turbines à base de roues à aubes (Hydrogen Fr [37], Univ. Southampton, GB [38]).

Certains projets proposent des concepts de turbines basés sur l'utilisation de roues à aubes en surface. C'est le cas du projet Français, Hydrogen, et d'un projet a priori très similaire de l'université de Southampton qui proposent tous les deux un concept utilisant une roue à aubes maintenue en surface par des flotteurs. Des essais de ces systèmes entraînés en remorque d'un navire ont été réalisés avec des démonstrateurs de faible puissance (de l'ordre de quelque kW avec des vitesses d'avance de 2 à 4 nœuds). Les figures 18a et b présentent une vue des

systèmes expérimentaux de ces 2 projets. Les systèmes sont conçus pour être positionnés dans des zones proches des côtes et relativement protégées.



(a) Université de Southampton.[37] (b) Hydrogen [38].

Figure 18 : Turbines à base de roues à aubes

C. Systèmes à base de profils hydrodynamiques oscillant [27, 39, 40, 41]

Le concept de générateur oscillant est illustré par le système Stingray développé par la société Engineering Business (GB) et est présenté à la figure 19a. Il est composé d'une pale qui oscille horizontalement perpendiculairement au courant dans un mouvement qui se rapproche de celui de la queue d'un cétacé. L'angle d'attaque de la pale varie grâce à un simple mécanisme. Le bras supportant le plan va alors osciller et entraîner, via un système hydraulique à huile pressurisée, un générateur électrique. Un démonstrateur (Fig. 19b) a été dimensionné pour une puissance de 150 kW. Il a été testé dans un courant nominal de 1,5 m/s et a produit une puissance moyenne de 90 kW pour une puissance crête de 250 kW lors de ces premiers cycles fonctionnement. Le projet a été mis en suspens en 2005. Il est à noter que ce système est assez proche, dans son principe, d'autres projets dans le monde comme le projet anglais «seasnail» de l'université Robert Gordon (Fig. 20) [39] qui consiste en une série de profils associés mécaniquement ou le projet «pulsegeneration» qui associe 2 profils associés sur un bras oscillant autour de son centre (Fig. 21) [40]. Le projet australien «biostream» de la société Biopower, lui aussi basé sur ce type de concept, est basé sur le bio mimétisme d'une queue de poisson (Fig. 22) [41].



(a) Le système Stingray (b) Démonstrateur

Figure 19 : Le Système stingray [EB]

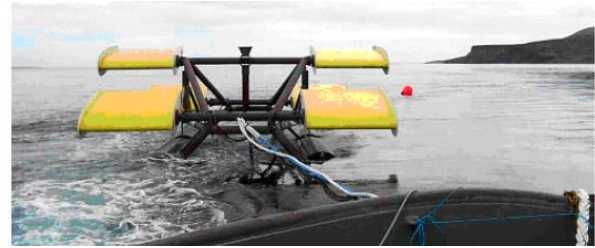


Figure 20 : le prototype Seasnail[RGU]

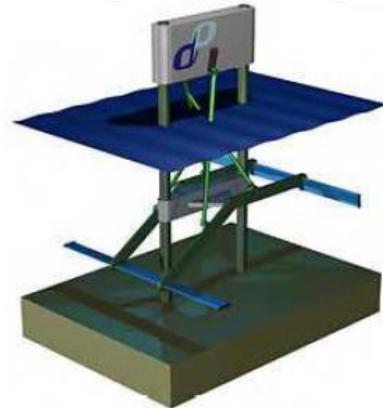
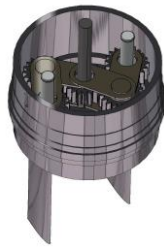


Figure 21 : Prototype Humber [pulsedgeneration]



Figure 22 : Le système "Biostream"[BIOPOWER]

Il est à noter que d'autres systèmes à bases de mouvements de profils à cinématique particulière sont actuellement à l'étude. Certaines technologies sont directement dérivées de systèmes de propulsion navale non conventionnels. Par exemple, un prototype de système cycloïdal à axe vertical, le rotor Lipp [42], dont la trajectoire trochoïdale des pales obtenue par un ensemble d'engrenage, est actuellement testé (Fig. 23) en générateur à l'Institut de Recherche de l'Ecole Navale en France [43].



(a) Rotor Lipp en tunnel hydrodynamique

(b) CAO du Lipp

Figure 23 : Le prototype Lipp [49].

D. Considérations sur le développement futur des technologies de récupération des courants marins.

Les technologies qui permettent de récupérer l'énergie des courants marins sont encore en cours de développement. Une technologie de référence ne s'est pas encore imposée. Pour l'instant seules les technologies basées sur des turbines à axe horizontal dérivées des technologies classiques d'éoliennes ont été testées à une échelle de production industrielle sur des durées représentatives avec les prototypes des projets Seagen, et E-tide [24,25]. La vitesse du fluide est plus prévisible dans le cas d'une hydrolienne que dans le cas d'une éolienne. Cependant, de très forts états de mer dus à des conditions météorologiques extrêmes, peuvent entraîner des surcharges mécaniques dynamiques sur ces structures et causer des dommages. Ceci implique un effort particulier lors du choix des sites qui conduit souvent au choix de sites proches des côtes car plus protégés qu'en haute mer. Ces raisons font qu'il est nécessaire de développer des recherches qui permettent de modéliser et prévoir les performances des systèmes de récupération dans des conditions de fonctionnement réel. L'objectif est d'être capable de déterminer les solutions technologiques les plus adaptées à chaque site [44]. Il est pour l'instant impossible de prévoir quelle est la solution qui va s'imposer pour les systèmes de récupération de l'énergie cinétique des courants. Ce que l'on peut dire à l'heure actuelle c'est que les systèmes devront être particulièrement robustes pour minimiser les opérations de maintenance et que les procédures de mise hors service des systèmes lors des phases de dépassement des valeurs nominales de vitesse de fluides ne pourront dans le cadre hydrolien n'être qu'exceptionnelles contrairement à l'éolien (Elles correspondront à des conditions extrêmes seulement rencontrées lors de très fortes tempêtes) [20], [44].

4 Structures et topologies de conversion électromécanique

La plupart des systèmes qui ont été proposés pour l'extraction de l'énergie des courants marins sont dérivés de l'éolien. Il semble donc relativement logique que certaines topologies d'association convertisseur/machine qui ont été choisies dans le cas éolien puissent être utilisées avec succès dans le contexte hydrolien [45]. Cependant, il existe des différences notables de contraintes entre les deux domaines. La première est que dans le domaine hydrolien il semble nécessaire de diminuer ou d'éliminer toute opération de maintenance car les sites à haut potentiel sont particulièrement difficiles d'accès et que la maintenance nécessite des opérations complexes liées au fait que les machines sont immergées [20]. Un deuxième point significatif est lié à la différence de densité du fluide. Dans le cas éolien les tailles des nacelles contenant les systèmes de génération électrique sont en général négligeables devant la taille des capteurs mécaniques (hélices ou turbines) ce qui n'est pas forcément le cas en hydrolien où les hélices sont beaucoup plus petites pour une même puissance. La traînée due à l'écoulement d'eau sur les structures d'une hydrolienne impose des contraintes mécaniques beaucoup plus grandes que la traînée due à l'écoulement d'air sur les structures d'une éolienne. On voit donc que la compacité des systèmes de conversion électromécanique est un point particulièrement important. On peut ainsi examiner les avantages et inconvénients des solutions électromécaniques classiques résumées dans la Table 1 à la lumière de ces considérations. Si les solutions ne nécessitant ni système bague-balais, ni multiplicateur comme ceux à bases de génératrices synchrones lentes à entraînement direct semblent séduisantes pour la minimisation des contraintes liées à la maintenance [46], elles semblent beaucoup moins pertinentes en termes de compacité et de prix. Les solutions utilisant des multiplicateurs permettent grâce à l'utilisation de machines électrique plus rapides d'augmenter la compacité et d'utiliser des solutions sur étagère en termes de structures électromécaniques. Cependant les contraintes de maintenance liées à l'utilisation de multiplicateurs (lubrification régulière) semblent difficilement compatibles avec le contexte hydrolien. Des expérimentations permettant des comparaisons de solutions in situ peuvent permettre de mieux identifier quelle solution sera la plus adaptée à chacune des technologies et des sites. Ainsi le projet coréen Uldolmok (Fig. 24) consiste à implanter dans une même usine, située au sud ouest de la Corée, deux turbines

Gorlov de 500 kW chacune, associées l'une à une génératrice asynchrone à double alimentation et l'autre à une génératrice synchrone [47]. Il est également nécessaire d'envisager des configurations turbines/machines spécifiques qui permettent de répondre au mieux au cahier des charges hydrolien. Ainsi associer un générateur synchrone à aimant permanent à attaque directe avec une turbine à axe vertical semble particulièrement intéressant. L'avantage de cette association est que le générateur étant situé au dessus ou en dessous de la turbine, la taille du générateur n'a pas de conséquences sur les performances hydrodynamiques du système (Fig. 25).

Les turbines dites à entraînement circonférentiel semblent une piste également très prometteuse. Dans cette configuration la turbine est complètement intégrée avec la machine électrique. L'hélice de la turbine supporte alors une jante, sur laquelle sont collés des aimants permanents. L'ensemble constitue alors le rotor d'une génératrice synchrone. Le stator est alors situé dans un carénage autour de l'hélice (Fig. 26). [48,49, 50]. Ce type de solution a été également étudié pour la propulsion des navires [51].

Ce type de solution semble particulièrement intéressant en termes de maintenance car il n'y a pas de système de transmission mécanique complexe. La localisation de la machine dans la carène autour de l'hélice permet l'amélioration des performances hydrodynamiques de l'ensemble. Ce concept a été adopté par la société OpenHydro (Irlande) [49] (Fig. 27). Il est possible selon les cas d'envisager d'utiliser d'autres topologies de systèmes comme par exemple les machines à flux axial ou à flux transverse mais cela augmente la complexité du système [52]

Table 1 : Solutions électromécaniques [38]

Type	avantages	inconvénients
Génératrice asynchrone à cage + convertisseur	<ul style="list-style-type: none"> ✓ gamme de vitesse importante ✓ pas de système balais bagues ✓ contrôle de puissance active et réactive ✓ technologie éprouvée 	<ul style="list-style-type: none"> ■ convertisseur de puissance nominale ■ présence d'un multiplicateur
Génératrice synchrone bobinée + convertisseur	<ul style="list-style-type: none"> ✓ gamme de vitesse importante ✓ entraînement direct possible ✓ contrôle de puissance active et réactive 	<ul style="list-style-type: none"> ■ convertisseur d'excitation de puissance réduite ■ convertisseur d'induit de puissance nominale ■ présence d'un système balais bagues
Génératrice synchrone à aimants + convertisseur	<ul style="list-style-type: none"> ✓ gamme de vitesse importante ✓ entraînement direct possible ✓ contrôle de puissance active et réactive ✓ pas de système balais bagues ✓ excitation autonome 	<ul style="list-style-type: none"> ■ convertisseur de puissance nominale ■ poids taille et prix importants ■ le flux d'excitation ne peut être coupé en cas de défaut
Machine asynchrone à double alimentation	<ul style="list-style-type: none"> ✓ convertisseur de puissance réduite ✓ contrôle de puissance active et réactive 	<ul style="list-style-type: none"> ■ présence d'un système balais bagues ■ présence d'un multiplicateur ■ gamme de vitesse limitée à 30% autour du synchronisme
Machine asynchrone avec connexion directe au réseau	<ul style="list-style-type: none"> ✓ pas de système balais bagues ✓ technologie éprouvée et peu coûteuse ✓ pas de convertisseur 	<ul style="list-style-type: none"> ■ vitesse quasi fixée (proche du synchronisme) ■ pas de contrôle de la puissance réactive ■ présence d'un multiplicateur

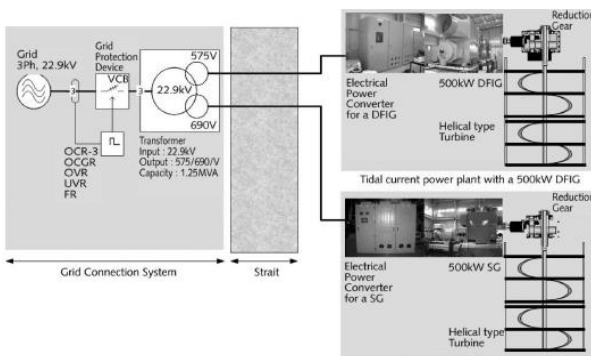


Figure 24 : L'installation pilote Uldolmok (1 MW) [40].

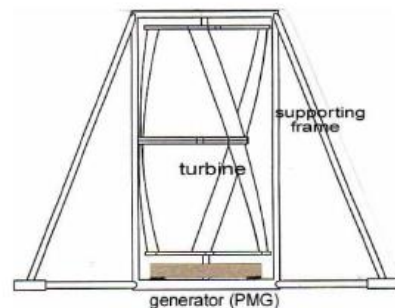


Figure 25 : Turbine Gorlov associée à un générateur synchrone à entraînement direct.

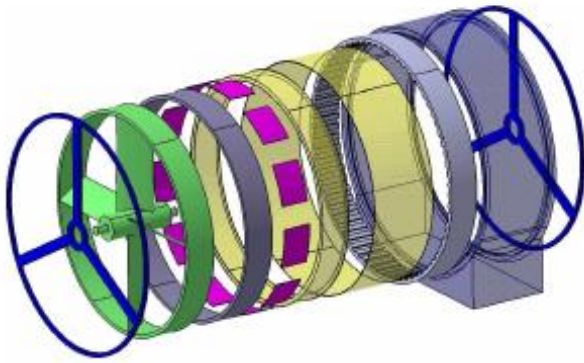


Figure 26 : Concept de turbine à entraînement circonférentiel



Figure 27 : La Turbine à entraînement circonférentiel "Open Centre" [OpenHydro].

5. Conclusion

Cet article se veut un état de l'art des systèmes de récupération de l'énergie des courants marins. Cette énergie renouvelable représente un potentiel très important en Europe de l'Ouest et en France en particulier. A travers une description des diverses solutions possibles que ce soit pour les turbines ou pour l'architecture de conversion électromécanique il apparaît clairement qu'aucune solution technologique de référence ne s'est pour l'instant imposée.

Un effort particulier de recherche et développement doit donc être mené dans les prochaines années afin de faire émerger les solutions technologiques qui permettront d'exploiter de manière optimale cette ressource énergétique.

REFERENCES

- [1] A.T. Jones et al., "Recent progress in offshore renewable energy technology development," in Proceedings of IEEE PESGM'05, vol. 2, pp. 2017-2022, San Francisco (USA), June 2005.
- [2] R. Ramakumar et al., "Economic aspects of advanced energy technologies," Proc. IEEE, vol. 3, n°8, pp. 318-332, March 1993.
- [3] G. T. Heydt, "An assessment of ocean thermal energy conversion as an advanced electric generation methodology," Proc. IEEE, vol. 3, n°8, pp. 409-418, March 1993.
- [4] C.M. Johnstone et al., "EC FPVI co-ordinated action on ocean energy: A European platform for sharing technical information and research outcomes in wave and tidal energy systems," Renewable Energy, vol. 31, pp.191-196,2006.
- [5] L.B. Bemshtein, "Tidal power development - A realistic, justifiable and topical problem of today," IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 10, n°3, pp. 591-599, September 1995.
- [6] T.J. Hanunons, "Tidal power," Proc. IEEE, vol. 3, n°8, pp. 419-433, March 1993.
- [7] S. Seth et al., "Tidal energy in electric power systems," in Proceedings of IEEE PESGM'05, vol. 2, pp. 630-635, San Francisco (USA), June 2005.
- [8] J.P. Frau, "Tidal energy: Promising projects. La Rance, a successful industrial-scale experiment," IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 8, n°3, pp. 552-558, September 1993.
- [9] 2005 IEEE Power Engineering Society General Meeting Panel Session, "Hamessing the untapped energy potential of the oceans: Tidal, wave, currents and OTEC," San Francisco (USA), June 2005.
- [10] Technomare SpA and IT Power Ltd., "Non Nuclear Energy-JOULE II, Wave energy project results: The Exploitation of tidal marine currents," Non-Nuclear Energy R&D Component, EU JOULE Contract J0U2CT94-0355, 1996.
- [11] P.W. Ullman, "Offshore tidal power generation- A new approach to power conversion of the oceans' tides," MTS Journal, vol. 36, n°4, pp. 16-24,2002.
- [12] I.G. Bryden et al., "Choosing and evaluating sites for tidal current development," Proc. IMechE, Part A: Journal of Power and Energy, vol. 218, n°8, pp. 567-578,2004.
- [13] B.V. Davis, "Low head tidal power: A Major source of energy from the world's oceans," in Proceedings of IECEC'97, vol. 3, pp. 1982-1989, Honolulu (USA), July-August 1997.
- [14] I.G. Bryden et al., "An assessment of tidal streams as energy sources in Orkney and Shetland," Underwater Technology, vol. 21, n°2, 1995.
- [15] I.G. Bryden, "Tidal stream power for Orkney and Shetland," Underwater Technology, vol. 9, n°4, 1993.
- [16] T.G. Pugh, Tides, Surges and Mean Sea-Level. London, UK: Wiley,1987.
- [17] L.S. Bluden et al., "Initial evaluation of tidal stream energy resources at Portland Bill, UK," Renewable Energy, vol. 31, pp. 121-132,2006.
- [18] I.G. Bryden et al., "Assessing the potential of a simple tidal channel to deliver useful energy," Applied Ocean Research, vol. 26, pp. 198-204, 2004.

- [19] J.S. Couch et al., "Tidal current energy extraction: Hydrodynamic resource characteristics," Proc. IMechE, Part M: Journal of Engineering for the Maritime, vol. 220, n°4, pp. 185-194, 2006.
- [20] A.S. Bahaj et al., "Fundamentals applicable to the utilisation of marine current turbines for energy production," Renewable Energy, vol. 28, pp. 2205-2211, 2003.
- [21] L. Myers et al., "Power output performance characteristics of a horizontal axis marine current turbine," Renewable Energy, vol. 31, pp. 197-208, 2006.
- [22] P.L. Fraenkel, "Power from marine currents," Proc. IMechE, Part A: Journal of Power and Energy, vol. 216, n°1, pp. 1-14, 2002.
- [23] I.G. Bryden et al., "MEI- Marine energy extraction: Tidal resource analysis," Renewable Energy, vol. 31, pp. 133-139, 2006.
- [24] <http://www.marineturbines.com/home.htm> (last accessed January 2008).
- [25] <http://www.e-tidevannsennergi.com/> (last accessed January 2008).
- [26] <http://www.pontediarchimede.com/> (last accessed January 2008).
- [27] <http://www.engb.com/> (last accessed January 2008).
- [28] <http://www.teleos.co.uk/Home.htm> (last accessed January 2007).
- [29] <http://www.berr.gov.uk/files/fileI5998.pdf> (last accessed January 2008).
- [30] <http://www.lunarenergy.co.uk/> (last accessed January 2008).
- [31] <http://www.hvdrohelix.fr/> (last accessed January 2008).
- [32] S. Kilio et al., "The power generation from tidal currents by Darrieus turbine," Renewable Energy, vol. 9, n°1-4, pp. 1242-1245, 1996.
- [33] <http://www.blueenergy.com/> (last accessed January 2008).
- [34] <http://www.gcktechnology.com/GCK/> (last accessed January 2008).
- [35] AM. Gorlov, "The Helical Turbine and its applications for tidal and wave power," in Proceedings of IEEE OCEANCS'03, vol. 4, pp. 1996, San Diego (USA), September 2003.
- [36] <http://www.legi.hmginpg.fr/cavit/Data/Harvest.html> (last accessed January 2007).
- [37] Development of a floating tidal energy system suitable for use in shallow water., SR Turnock and AI, in proceedings (CD rom) 7th EWTEC 2007, Porto 11-13 sept 2007
- [38] <http://www.hydro-gen.fr> (last accessed January 2008)
- [39] <http://www.rgu.ac.uk/cree/general/page.cfm?page=10769> (last accessed January 2008)
- [40] <http://www.pulsegeneration.co.uk/> (last accessed January 2008)
- [41] <http://www.biopowersystems.com/biostream.html> (last accessed October 2007)
- [42] <http://wagram.ecole-navale.fr/fr/irenav/cv/darnay/projet.swf> (last accessed January 2008).
- [43] Ben Ramdane, S., Damay, T., Hauville, F., Deniset, F. and Astolfi, J-A, "Etude de l'écoulement sur un hydrofoile en mouvements forcés: application à la propulsion cycloïdale", 10^{èmes} Journées de l'Hydrodynamique, Nantes, Ecole Centrale de Nantes, pp. 39-52, 7-9 Mars, 2005
- [44] JA Clarke et al., "Regulating the output characteristics of tidal current power stations to facilitate better base load matching over the lunar cycle," Renewable Energy, vol. 31, pp. 173-180, 2006.
- [45] M.E.H. Benbouzid et al., "The state of the art of generators for wind energy conversion systems," in Proceedings of ICEM'06, Chania (Greece), September 2006.
- [46] H. Polinder et al., "Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines," IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 21, n°3, pp. 725-733, September 2006.
- [47] IW. Park et al., "Wide speed operation of a doubly-fed induction generator for tidal current energy," in Proceedings of IEEE IECON'04, vol. 2, pp. 1333-1338, Busan (Korea), November 2004.
- [48] S.M. Abu Sharkh et al., "Performance of an integrated water turbine pm generator," in Proceedings of IEE PEMD'02, vol. 2, pp. 486-491, Bath (UK), April 2002.
- [49] <http://www.openhydro.com/home.html> (last accessed January 2007).
- [50] Drouen, L. Charpentier, JF. Semail, E. Clenet, S. "Study of an innovative electrical machine fitted to marine current turbines" in IEEE OCEAN07 Aberdeen Scotland 18-21 Juin 2007 6pp in CDROM proceedings
- [51] O. Krelvel et al., "Design of an integrated 100 kW permanent magnet synchronous machine in a prototype thrusters for ship propulsion," in Proceedings of ICEM'04, Krakow (poland), September 2004.
- [52] IR. Bumby et al., "Axial-flux permanent-magnet air-cored generator for small-scale wind turbines," IEE Proc Electric Power Applications, vol. 152, n°5, pp. 1065-1075, September 2005.

Sonde différentielle 1/100 – 2 Voies : Dix ans déjà

Vincent FICHET

Professeur de Physique Appliquée
Lycée Jules Fil, 11021 CARCASSONNE

Résumé : L'emploi de l'oscilloscope dans le domaine de l'électrotechnique présente des difficultés dès lors que l'on se frotte un peu au réseau. Nous familiarisons le plus tôt possible nos étudiants à ce contexte. Cette sonde différentielle économique a été conçue afin de pouvoir effectuer des mesures en toute sécurité. Nous disposons maintenant d'un recul suffisant pour tirer un bilan de cette réalisation. .

A - LA PROBLEMATIQUE.

A l'occasion de l'arrivée des nouveaux élèves de TS Electrotechnique, le premier cycle des Essais de Système propose quelques séances focalisées sur la sécurité d'une part, et sur l'utilisation de matériels de mesure adaptés à notre environnement d'autre part.

Ainsi un de nos sujets d'ES posent la problématique des mesures sur le réseau : il s'agit d'un simple pont de diodes, dont on souhaite visualiser à l'oscilloscope la tension redressée (cf schéma ci-dessous). Evidemment, si on branche sans précaution l'oscilloscope, on provoque un gros défaut via les diodes, et le différentiel de la table de mesure (voire de toute la salle) déclenche. Plusieurs solutions sont testées : coupure de la terre de l'oscilloscope (eh oui, ça s'est beaucoup fait !), emploi d'un transformateur d'isolement 230/230V, utilisation d'une sonde différentielle.

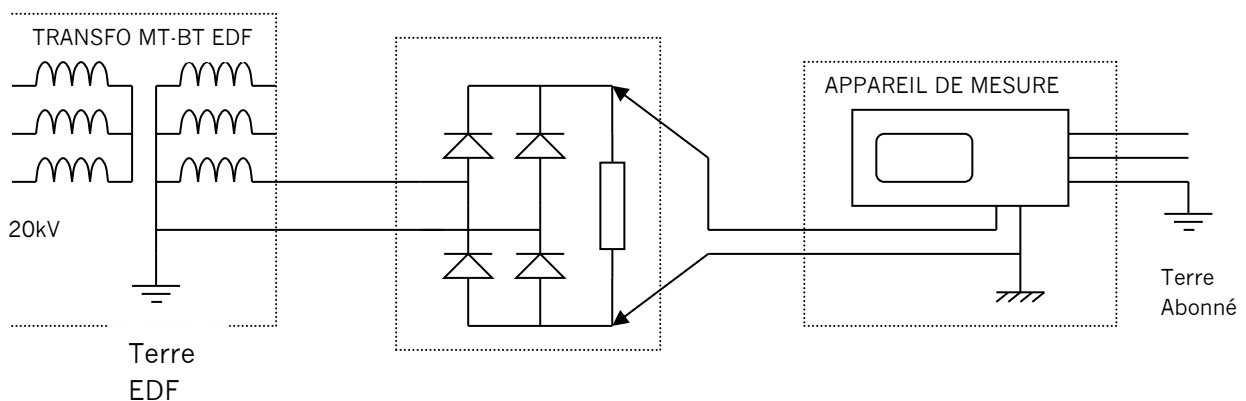
La suppression du conducteur de terre de l'oscilloscope se faisait couramment, cette époque est

heureusement révolue, entre autres, grâce aux formations à l'habilitation.

L'emploi d'un transformateur d'isolement occasionne un changement de régime de neutre, on est alors en régime IT, et la connexion d'une voie de l'oscilloscope nous met en situation de premier défaut : la mesure est possible ; mais attention au second défaut avec l'autre voie ! De plus le transfo doit pouvoir fournir la puissance du dispositif sous test, on peut se baser sur 1kVA par système, et chaque table doit disposer de son transfo propre. Lourd, cher, et finalement pas très pratique à utiliser.

La solution impliquant la sonde différentielle est particulièrement séduisante, on a une résolution élégante des problèmes de terre et de masse (ce qui est différent), mais les prix-catalogue font plutôt peur si on souhaite s'équiper massivement...

D'où l'idée de fabriquer nous même une sonde différentielle, pour voir. C'était il y a une douzaine d'années.



B - DESCRIPTION DE LA SONDE

1 - SCHEMA D'UNE VOIE.

Chaque canal est constitué d'un amplificateur différentiel classique précédé d'un atténuateur 1/100. On utilise 2 résistances de 470K Ω pour la tenue en tension : pas plus de 500V par résistance.

L'ajustable de 1K Ω règle la réjection de mode commun (Relier E+ et E- à une phase du réseau, régler l'ajustable de 1K Ω pour obtenir une sortie « plate » et l'aligner sur zéro avec l'ajustable de 100K Ω).

Les condensateurs de 27pF assurent la stabilité, sinon le TLO81 utilisé avec un gain aussi faible présente un dépassement en réponse indicielle.

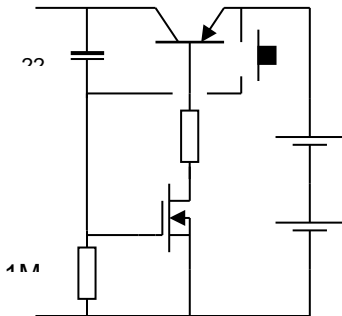
Avec les piles de 9V, on visualise sans problème du 400V (700V crête, 7V en sortie)

2 - SCHEMA DE L'ALIMENTATION.

Initialement, la sonde est au repos, le condensateur de 22 μ F est déchargé.

L'action sur le bouton-poussoir provoque la conduction du transistor MOS, lequel commande les 2 interrupteurs statiques NPN et PNP. La sonde est alors alimentée en +9V et -9V environ.

Ensuite le condensateur se recharge à travers la 1M Ω , l'armature du bas devient de plus en plus négative. (cf schéma simplifié ci dessous)



Quand la tension de gate du MOS est suffisamment basse (le seuil est d'environ 1,6V), celui-ci commence à se bloquer, et avec lui le PNP ; le potentiel de l'armature du haut du condensateur diminue, abaissant immédiatement celui de celle du bas. Le phénomène est cumulatif, le blocage de l'ensemble est très « raide », et la sonde n'est plus alimentée.

Pour 22 μ F, l'auto-extinction se fait après 60 secondes. Si un signal (alternatif) est présent en sortie S1 ou S2, il est appliqué à un bon vieux doubleur Schenkel, l'autre transistor PNP conduit donc, et maintient déchargé le condensateur. (Pour un signal d'entrée sinus à 50Hz, il faut environ 40V_{eff}, soit 110V_{càc}). La sonde reste opérationnelle tant qu'il y a un signal.

3 - REPONSE EN FREQUENCE.

Expérimentalement, le temps de montée sur des signaux carrés est de 0.6 ms (soit une fréquence de coupure à 0.6 MHz). C'est moins bon que dans le commerce, mais c'est très suffisant pour du redressement, et à évaluer dans d'autres cas (Convertisseur M.L.I. industriel, par exemple).

4 - COÛT

Le prix de revient unitaire est de l'ordre d'une vingtaine d'euro, boîtier compris. A comparer avec les prix des sondes du commerce : rapport de 10. Dans ces conditions, ça vaut la peine de s'en équiper en nombre afin d'en banaliser l'usage (cf BILAN).

C - BILAN

Ces sondes ont été mises au point et développées avec l'aide de Lydie CECCHI, aide de laboratoire, au Lycée Jules Fil en 1995 ; les dimensions du CI sont de 10x10cm, il tient juste dans un boîtier occupant un volume de 10,5x11,5x4,5cm.

Une description en a été publiée dans le BUP (bulletin de l'union des physiciens) en mai 1997. Il est donc légitime de tirer un bilan de 10 années d'utilisation.

- ◆ Il en a été fabriqué une dizaine ; la section BTS Electrotechnique en a hérité de 8, actuellement il nous en subsiste 7 en circulation. Produit fiable donc, on peut envisager une garantie décennale...

- ◆ Du fait de leur disponibilité en nombre, on a assisté rapidement à une banalisation de leur utilisation, avec en corollaire un intérêt certain des étudiants pour ce qui touche à la sécurité et aux histoires de régime de neutre (cf plus haut).

- ◆ Bien que disposant de 2 voies, j'ai constaté qu'elles ne sont pratiquement utilisées qu'en monocanal. Il est d'ailleurs tout-à-fait possible de ne câbler qu'une voie. Ça fait moins de fils sur la table.

- ◆ Grace à l'économiseur d'alimentation, les piles durent en moyenne 2 ans. A comparer avec les produits du commerce... Dans ces conditions, inutile d'utiliser des accus rechargeables.

- ◆ Certains oscilloscopes (les TDS entre autres) souffrent d'un calibre d'entrée limité à 5V/div, soit 40V crête à crête maximum. Les mesures sur nos maquettes d'onduleur alimentées sous 30V, soit 60V crête à crête, nécessitent alors l'utilisation d'atténuateur complémentaire : ainsi cette sonde (avec l'avantage de s'affranchir des problèmes de masse). Malheureusement l'alimentation nécessite un signal de 110V_{càc} pour se maintenir, et elle se déconnecte au bout d'une minute, il

faut alors penser à presser régulièrement le bouton. C'est un peu agaçant, mais on s'y fait.

◆ La seule cause de détérioration (pour l'instant) a été l'intervention accidentelle des bornes entrées-sorties. Une des sondes a eu son circuit imprimé entièrement détruit par application de 400V sur la sortie, au niveau des AOP. Les autres ont pu être réparés.

◆ Nous avons mis un certain temps avant d'adopter une connectique adaptée. Après passage entre les mains d'une société de mise aux normes de sécurité, nos sondes nous sont revenues avec des entrées reliées par fils de 60cm à des fiches mâles de sécurité sans reprise arrière, les sorties se faisant sur embases BNC. Depuis, plus de confusion entre entrée et sortie. Actuellement, nous relançons la fabrication d'une nouvelle série d'une dizaine de sondes pour les autres sections d'électrotechnique du lycée.

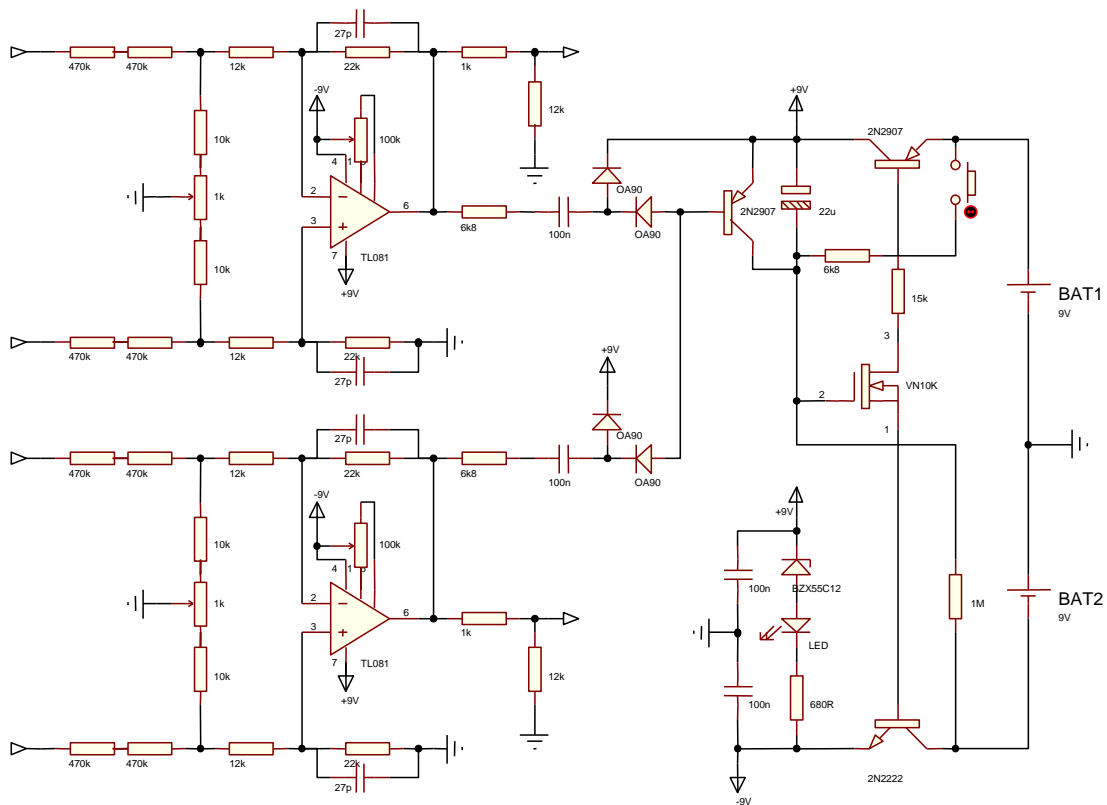


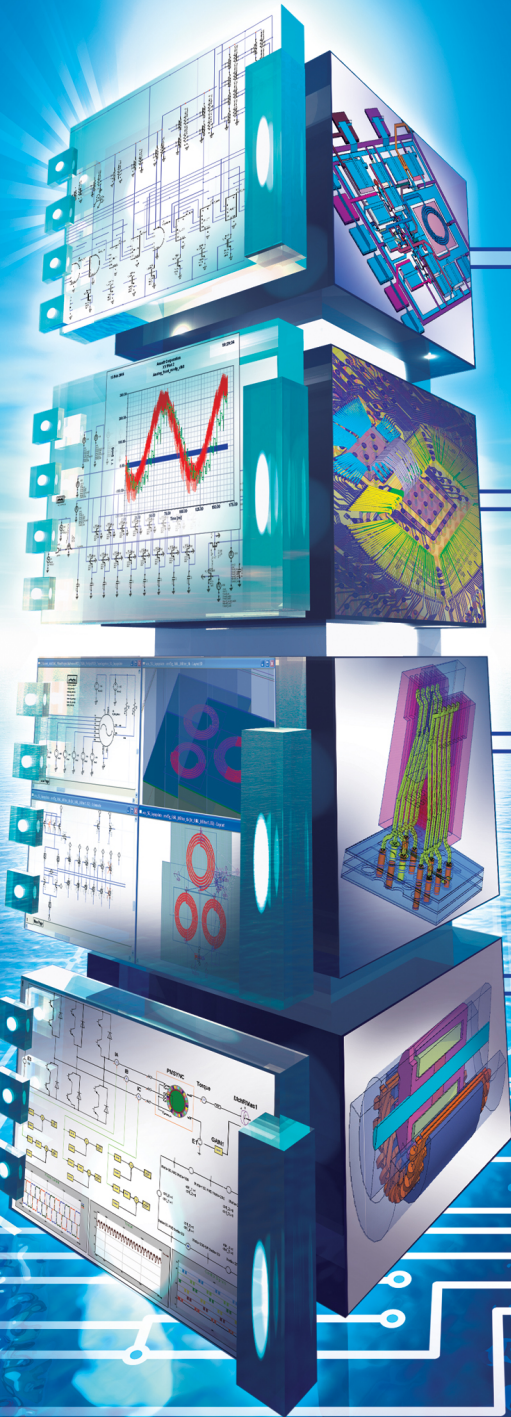
Schéma de la sonde différentielle



photo de la sonde



photo de la sonde ouverte



**HIGH-PERFORMANCE
IC DESIGN & VERIFICATION**

**HIGH-PERFORMANCE
SIGNAL & POWER INTEGRITY**

**HIGH-PERFORMANCE
RF & MICROWAVE DESIGN**

**HIGH-PERFORMANCE
EM SYSTEMS DESIGN**

ANSOFT.COM

**SIMULATION SOFTWARE
FOR HIGH-PERFORMANCE ELECTRONIC DESIGN**

Ansoft France - 153, rue Fourny BP 513 78535 BUC Cedex
Tel. 01 39 56 67 99 - Fax. 01 39 56 64 14 - Email: contactfrance@ansoft.com

