

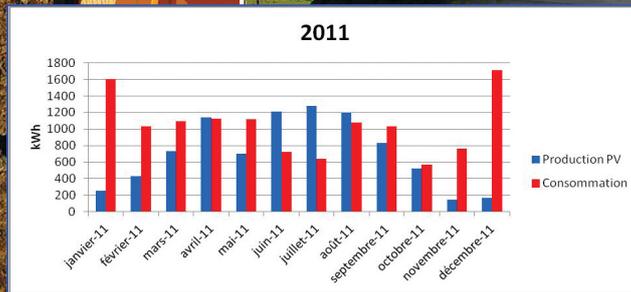
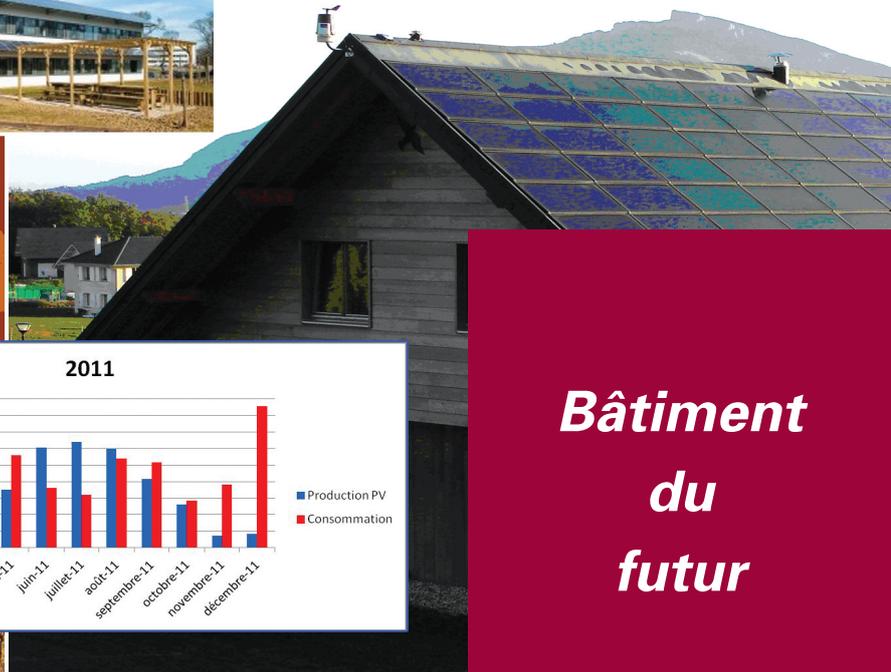
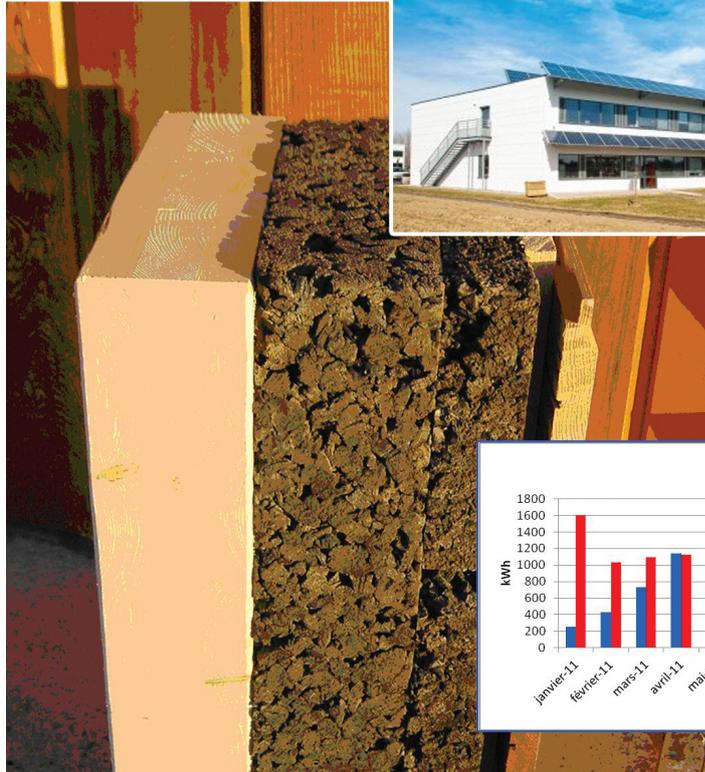
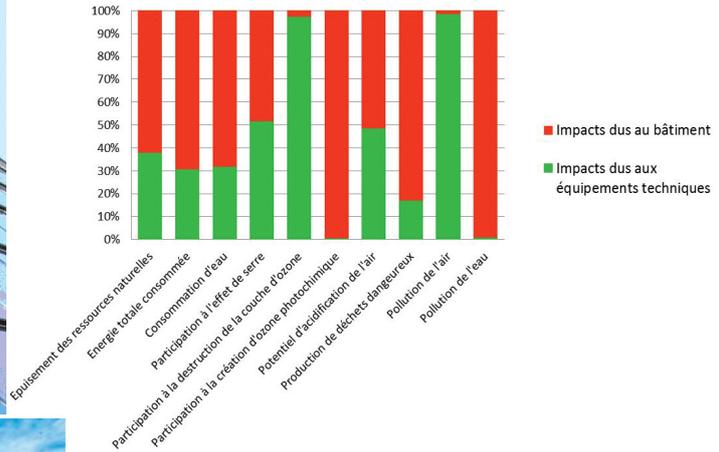
# La Revue SEE



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



Comparaison des impacts



**Bâtiment  
du  
futur**

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



PREMIER APPEL A COMMUNICATIONS  
PRELIMINARY CALL FOR PAPERS



# CETSIS 2013

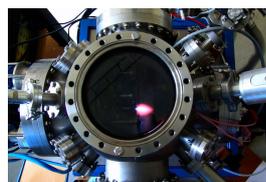
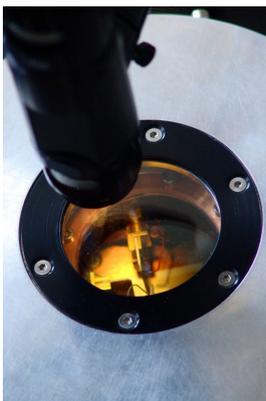
Le 10<sup>ème</sup> Colloque du club EEA sur l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes

**20-22 mars 2013, Caen, France**

**Université de Caen Basse-Normandie / ENSICAEN  
CAMPUS II**

<http://cetsis2013.sciencesconf.org>

Les thématiques générales du colloque concernent les champs disciplinaires fondamentaux, les champs disciplinaires des sciences de l'ingénieur et les articulations entre formations supérieures et société. A côté de la tenue de ses célèbres POMMADES (POsters, MAquettes, DEMonstrations), le 10<sup>ème</sup> CETSIS fera une rétrospective de ce cycle de conférence comme temps fort d'une table ronde.



**UNICAEN**  
université de Caen  
Basse-Normandie



**ENSICAEN**  
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN  
& CENTRE DE RECHERCHE



## CONTACT

**Didier ROBBES**

Département de Physique – EEA

UFR Sciences - UCBN

6 Bd Maréchal Juin

F – 14050 Caen Cedex – FRANCE

Tél : +33 (0)2 31 45 26 97 Web : [cetsis2013.sciencesconf.org](http://cetsis2013.sciencesconf.org)

Fax : +33 (0)2 31 45 26 98 Mail : [cetsis2013@sciencesconf.org](mailto:cetsis2013@sciencesconf.org)



## La Revue 3EI

publication trimestrielle  
du Cercle Thématique 13-01  
de la SEE

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

17, rue de l'Amiral Hamelin, PARIS 75783 CEDEX 16  
Tél : 01 56 90 37 00 Fax : 01 56 90 37 19  
site web : [www.see.asso.fr](http://www.see.asso.fr)

SEE, association reconnue d'utilité publique par le décret du 7 décembre 1886  
Siret 785 393 232 00042, APE 9412 Z, n° d'identification FR 44 785 393 232

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

<p><b>La Revue 3EI, Édition SEE,</b> 17 rue de l'Amiral Hamelin 75783 PARIS Cedex 16</p> <p><b>Directeur de la publication</b> Paul FRIEDEL Président de la SEE</p> <p><b>Rédactrice en Chef</b> Marie Michèle LE BIHAN</p> <p>Adresser les propositions d'article à : <a href="mailto:revue3ei.art@voila.fr">revue3ei.art@voila.fr</a></p> <p><b>Communication</b> Micheline BERTAUX <a href="mailto:communication@see.asso.fr">communication@see.asso.fr</a> 01 56 90 37 17</p> <p>publicité au rapport</p> <p><b>Abonnement (4 numéros par an)</b> Janvier, Avril, Juillet, Octobre 2012.</p> <p>tarifs TTC :</p> <p><b>Individuel :</b> France et CEE.....39 € Pays hors CEE.....49 €</p> <p><b>Collectivités</b> France et CEE.....55 € Pays hors CEE.....68 €</p> <p><b>Réalisation et impression</b> Repro-Systèmes 23, rue de Verdun 77181 Le Pin</p> <p><b>Routage et Expédition</b> Départ Presse ZI les Richardets 93966 Noisy le Grand</p> <p><b>Dépôt Légal : Juillet 2012</b></p> <p>Commission Paritaire 1212 G 78028 ISSN 1252-770X</p>	<b>Sommaire du n° 69</b>	
	<b>Thème : Bâtiment du futur</b>	
	p. 2	Éditorial,
	p. 3	Publications, Informations,
	p. 7	Introduction journées EEA thème : "Bâtiment - Energie : quelles contributions du génie électrique ? M. RUELLAN
	p. 8	La Maison Z.E.N A. RICAUD, I. LOKHAT CYTHELIA, 350 route de la Traverse 73000 MONTAGNOLE
	p. 13	Programme HOMES : une gestion intelligente de l'énergie dans les bâtiments V. BOUTIN SCHNEIDER ELECTRIC
	p. 18	De la passoire thermique aux îlots à énergie positive, un aperçu des défis à relever par les acteurs de la filière électrique JC. VISIER Université Paris Est MARNE LA VALLÉE
	p. 22	Le Confort dans le bâtiment : n'oublions pas l'habitant ! F. THELLIER*, F. MONCHOUX, J.-P. BEDRUNE TOULOUSE
	p. 31	Causes de pertes dans le calcul des performances des systèmes photovoltaïques connectés au réseau F. BARRUEL et al. CEA-INES LE BOURGET DU LAC
p. 39	Impacts environnementaux de bâtiments : Comparaison du poids respectif des équipements techniques et du bâti L. FLOISSAC, L. FELIX, G. MILESI, H. VALKHOFF LRA TOULOUSE	
<b>Hors Thème</b>		
p. 47	Comptage d'énergie sur une pompe à chaleur G. LEGUERN, S. GRENAILLE VILLIERS SAINT FREDERIC	
p. 54	Mieux connaître sa consommation électrique M. OURY, (MOIRAN 38430) G. AUBERT (VERSAILLES)	
p. 60	L'électricité pas toujours maîtrisée L. SIMONOT POITIERS	
p. 69	La technologie Lithium-ion A. CHAGNES ENSCP-LECIME PARIS	
p. 73	Mesure d'énergie et de quantité d'électricité G. HERAULT CACHAN	
p. 791	Développement d'un modèle de panneau photovoltaïque sous Psim JM ROUSSEL, T AUBRY IUT de l'Indre, CHATEAUROUX	
<b>Et Demain ?</b>		
p. 85	Et demain ? Tour d'horizon des avancées technologiques	

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).

Comme vous le savez, les questions du développement durable et de la gestion de l'énergie orientent considérablement de nos jours les réflexions sur le « **Bâtiment du futur** », thème de ce numéro.

Vous trouverez ainsi les articles des entreprises **Schneider Electric** et **Cythélia**, qui n'ont pas hésité à nous exposer leurs projets et réalisations et nous les en remercions. Vous trouverez également le fruit d'une collaboration avec le Club EEA (Club des enseignants et chercheurs en Electronique, Electrotechnique et Automatique) sous la forme de quatre articles issus des journées électrotechnique du mois de mars dernier :

- « de la passoire thermique aux îlots à énergie positive, un aperçu des défis à relever pour les acteurs de la filière électrique » (J.-C. Visier),
- « le confort dans le bâtiment: n'oublions pas l'habitant ! » (F. Tellier, F. Monchoux et J.P. Debrune),
- « impacts environnementaux de bâtiments : comparaison du poids respectif des équipements techniques et du bâti » (L. Floissac, L. Felix, G. Milesi et H. Valkhoff),
- « causes de pertes dans le calcul des performances des systèmes photovoltaïques connectés au réseau » ( F. Barruel).

Nous laisserons à **Marie Ruellan** le soin de les introduire.

Un grand merci à **Arnaud Brugier** qui a piloté ce travail autour du thème : la richesse de ce dernier va réjouir tous les collègues qui doivent développer de nouvelles activités pour leurs élèves, dans le cadre des réformes des baccalauréats STIDD et Ssi et de certaines STS.

Dans la **partie hors thème**, plusieurs articles à caractère pédagogique, dont deux exploitations pour le lycée, touchent à un sujet connexe au thème : la mesure de la consommation d'énergie. La modélisation de modules photovoltaïques sous PSIM, la technologie Lithium – Ion pour le stockage de l'énergie et une réflexion sur les difficultés de la compréhension des lois de l'électricité viennent les compléter.

La rubrique « **Et demain ?...** » a pour centre d'intérêt les éoliennes ce trimestre.

Il n'y a pas d'article dans la rubrique Histoire des Sciences dans ce numéro. Nous sollicitons donc votre participation pour que des propositions permettent d'alimenter cette rubrique très prochainement.

Après le dernier numéro de cette année en Octobre 2012, **Pratiques pédagogiques**, de nouveaux thèmes seront abordés en 2013 : Biologie et EEA, Enseignement à l'Etranger....

Un support numérique des **archives de la Revue 3EI** des quinze premières années (60 numéros au format « .pdf ») est en préparation et sera bientôt disponible à la commande.

Continuez à nous envoyer des articles à vocation pédagogique : fiches de TP, TD, cours, présentation de projets... Nous sommes toujours très intéressés par des articles présentant des études de systèmes avec une approche pluridisciplinaire et nous serons heureux de les recueillir dans la boîte aux lettres dont l'adresse e-mail est [revue3ei.art@voila.fr](mailto:revue3ei.art@voila.fr)

Bonne lecture à toutes et tous.

Le Comité de Publication de la Revue3EI

**Nous comptons sur vous pour faire connaître notre revue afin d'assurer sa pérennité.**

**La Revue 3EI**

**Comité de publication**

Hamid BEN AHMED

Jean BONAL

Arnaud BRUGIER

Jean FAUCHER

Gilles FELD

Jean-Philippe ILARY

Chérif LAROUCI

Marie Michèle LE BIHAN

Franck LE GALL

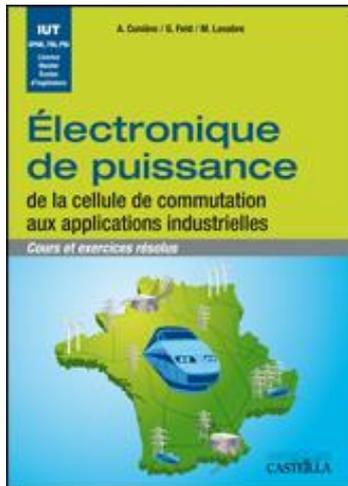
Pascal LOOS

Oviglio SALA

Jean-François SERGENT

Jean-Claude VANNIER

Pierre VIDAL



## **Électronique de puissance**

*Cours et exercices résolus*

Alain Cunière, Gilles Feld, Michel Lavabre

CASTEILLA

Après douze ans de parution, le temps était venu de rééditer l'ouvrage *Électronique de Puissance*. À un toilettage de la seconde édition, les auteurs ont préféré une refonte complète du livre. Il était nécessaire, d'une part, de se replacer dans la perspective actuelle de présentation des convertisseurs statiques et, d'autre part, de dégager les nouveaux champs d'application exploitant les possibilités des composants bi-commandables.

Une première partie est consacrée aux généralités sur les outils mathématiques et physiques nécessaires à l'étude des systèmes industriels utilisant l'électronique de puissance.

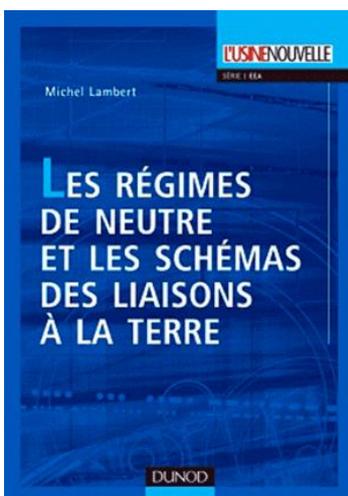
Une deuxième partie se consacre à l'étude fonctionnelle des convertisseurs en s'appuyant sur le concept de la cellule de commutation imaginé en son temps par le Professeur Foch.

Les auteurs ont privilégié une présentation à partir de la conversion continu/continu et dans le droit fil de cette amorce, l'étude des convertisseurs courant alternatif/tension continue et des convertisseurs courant continu/tension alternative.

Une troisième partie est réservée aux applications dans le domaine des réseaux électriques. Historiquement réservé au thyristor, le domaine du transport de l'énergie électrique a bénéficié de l'apparition des transistors IGBT à forte puissance commutée.

À l'apport de l'électronique de puissance dans les liaisons à courant continu et dans le transport en courant alternatif, s'ajoute la gestion des puissances actives et réactives. Ces applications sont vues à partir d'études de cas.

Dans l'ensemble de l'ouvrage, chaque chapitre donne lieu à un découpage classique qui avait été apprécié dans les éditions précédentes : cours suivis d'exercices dont on a regroupé par chapitre les réponses ou les solutions succinctes.



## **Les régimes de neutre et les schémas des liaisons à la terre**

Michel Lambert

Dunod, L'Usine Nouvelle

Cet ouvrage s'adresse aux exploitants et aux concepteurs des réseaux d'énergie électrique, qu'ils soient ingénieurs ou techniciens. Il sera également utile aux formateurs et à tous ceux qui veulent maintenir leurs connaissances à jour.

Dans la conception et dans l'exploitation de tout réseau électrique le mode de fixation du neutre à la terre est une question importante, et les solutions choisies peuvent évoluer en même temps que le réseau évolue.

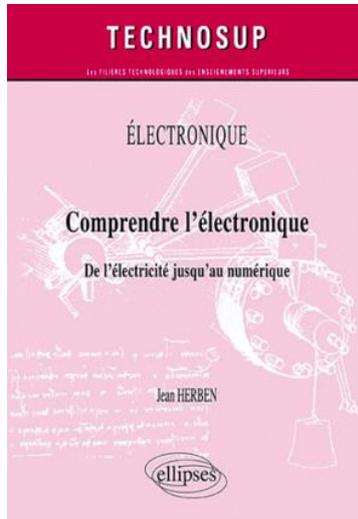
Cet ouvrage est un outil d'analyse et de réflexion. C'est aussi un outil pertinent pour réaliser l'inventaire des dispositions qui doivent être prises en cohérence avec le choix du régime de neutre.

La première partie définit :

- Les déséquilibres homopolaires.
- Les régimes de neutre et les schémas des liaisons à la terre.
- Les critères de choix d'un régime de neutre.

La deuxième partie présente les dispositions associées :

- Les dispositifs de mise à la terre d'un neutre.
- Les plans de protections.
- L'exploitation.



### **Comprendre l'électronique** *De l'électricité jusqu'au numérique*

Jean Herben

ELLIPSES

*Pour comprendre l'électronique, réduire l'appel aux mathématiques au minimum indispensable est le parti pris de l'auteur de ce livre, qui préfère expliquer.*

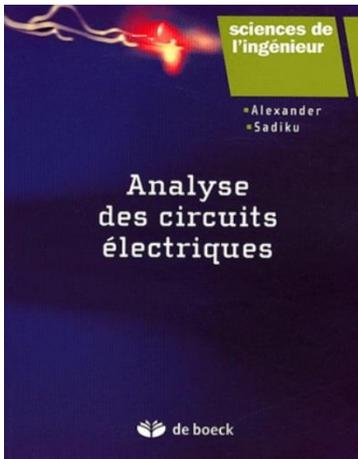
*Pour cela, quelques règles d'électricité sont d'abord nécessaires. Puis les différents composants sont analysés et leurs comportements disséqués. Sont mis en évidence les phénomènes naturels qui conduisent à des circuits simples mais efficaces, comme le super-hétérodyne. Les modulations AM et FM sont décortiquées et les réponses spectrales sont analysées. Même Fourier voit ses maths réduites avec des explications de bon sens.*

*Les semi-conducteurs n'échappent pas à l'examen de l'implication des électrons, mais de façon presque anecdotique. La diode, puis le transistor sont alors étudiés de façon pragmatique.*

*Puis ce sont les UJT, FET, MOSFET et autres thyristors qui sont passés en revue, avec des applications pratiques. Les circuits intégrés classiques les plus courants sont aussi mis en situation. Un chapitre est entièrement consacré aux amplis et un autre à toutes les alimentations qui y sont étudiées en détail avec leurs régulations et leurs protections.*

*Le numérique n'est pas oublié et le digital est revu sous toutes ses facettes, depuis la base jusqu'au codage et la digitalisation.*

*Un livre pour enchanter le débutant, aider l'étudiant et rafraîchir les connaissances du technicien de métier.*



### **Analyse des circuits électriques**

Charles K. Alexander , Matthew N.O. Sadiku , Marius Dancila ,  
Dragos Dancila

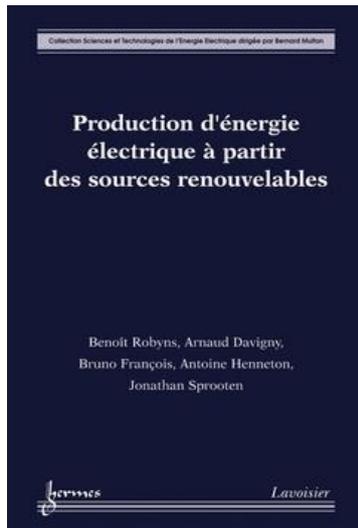
DE BOECK

*L'objectif de cet ouvrage est de présenter l'analyse des circuits électriques de manière claire, intéressante et facile à comprendre, et d'accompagner l'étudiant tout au long de ses études en électricité et en électronique, jusqu'au master.*

*Structuré en trois parties - circuits à courant continu, circuits à courant alternatif et analyse approfondie des circuits - ce volume rassemble l'essentiel des connaissances sur les éléments fondamentaux et avancés de l'analyse des circuits électriques. Il aborde notamment la notion d'amplificateur opérationnel, en tant qu'élément de base des circuits électriques modernes, ainsi que les transformées de Fourier et de Laplace.*

*L'accent est mis sur la résolution de situations concrètes en guidant l'étudiant à travers les lois, théorèmes et outils de travail modernes tels les logiciels spécialisés PSpice et MATLAB. Une méthodologie en 6 étapes pour résoudre les problèmes de circuit, présentée au chapitre 1, est utilisée tout au long du livre, offrant ainsi aux étudiants un excellent outil de travail.*

*Chaque chapitre est introduit par une discussion sur la manière de résoudre les différents problèmes posés, et de nombreux exemples viennent illustrer la théorie. En fin de chapitre, après un résumé des points importants, des problèmes et des questions récapitulatives permettent à l'étudiant de vérifier les connaissances acquises.*



### ***Production d'énergie électrique à partir des sources renouvelables***

**ROBYNS** Benoît, **DAVIGNY** Arnaud, **FRANÇOIS** Bruno, **HENNETON** Antoine, **SPROOTEN** Jonathan

**HERMES LAVOISIER**

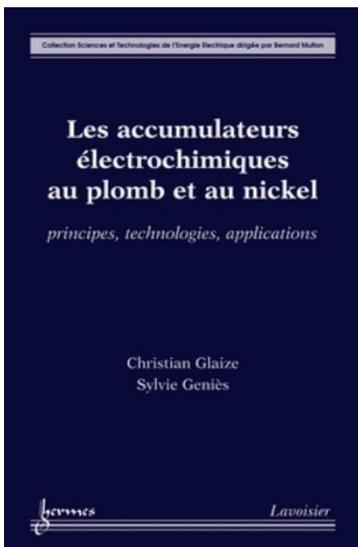
*Les questions de développement durable et de projection des besoins futurs favorisent l'apparition de nouvelles technologies de production d'énergie et entraînent un changement de comportement des usagers.*

*Ce livre contribue à une meilleure appréhension de ces technologies émergentes de production d'électricité. Il analyse leurs enjeux, leurs sources et leurs moyens de conversion électrique. Suivant une approche didactique et générale, cet ouvrage présente :*

*- les systèmes de production d'électricité à partir de ressources énergétiques renouvelables des petites aux moyennes puissances (jusque 100 à 200 MW),*

*- les notions électrotechniques de base nécessaire à la compréhension des caractéristiques de fonctionnement de ces convertisseurs,*

*- les contraintes et problèmes d'intégration dans les réseaux électriques de ces moyens de production.*



### ***Les accumulateurs électrochimiques au plomb et au nickel***

*principes, technologies, applications*

**GLAIZE** Christian, **GENÈS** Sylvie

**HERMES LAVOISIER**

*Que ce que soit pour les applications portables, embarquées ou stationnaires, il est indispensable de disposer de systèmes de stockage performants, aux coûts de fabrication, d'usage et de recyclage maîtrisés. Cet ouvrage étudie deux technologies de stockage électrochimique parmi les plus utilisées : les accumulateurs au plomb-acide et les accumulateurs au nickel. Afin de les utiliser dans des conditions optimales, il est nécessaire de maîtriser les phénomènes électrochimiques internes. Les accumulateurs électrochimiques au plomb et au nickel expose les réactions électrochimiques aux électrodes, les différentes conceptions internes, les modes de dégradation qui s'établissent en fonctionnement et les meilleures conditions d'utilisation qui permettent de préserver les performances et de prolonger les durées de vie. Didactique et accessible, il s'adresse aux métiers du génie électrique et aux industriels et électrochimistes confrontés à l'utilisation de tels systèmes.*



### CETSIS 2013

Le 10<sup>ème</sup> Colloque sur l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes  
20-22 mars 2013, Caen, France



CETSIS est un colloque d'audience internationale francophone important pour échanger, se faire reconnaître et s'informer sur la pédagogie dans le monde de l'enseignement universitaire.

#### THEMES GENERAUX DES CETSIS :

AUTOMATIQUE ÉLECTRONIQUE ÉNERGIE INFORMATIQUE INDUSTRIELLE OPTIQUE MATHÉMATIQUES MÉCANIQUE  
PHYSIQUE ARTS, LITTÉRATURE SIGNAL ET IMAGE PÉDAGOGIE : PAR PROJETS, À DISTANCE, NUMÉRIQUE...  
HUMANITÉS ET SCIENCES FORMATIONS SUPÉRIEURES ET SOCIÉTÉ

#### 4 TABLES RONDES :

<p>DES SAVOIRS FONDAMENTAUX AUX FORMATIONS SUPÉRIEURES</p> <p>Évolutions des contenus fondamentaux et compétences exigibles : nouveaux programmes des lycées, filière STIDD...</p> <p>Impacts sur nos formations, savoirs effectifs et compétences des entrants en cycle L, IUT, CPGE, cycle M...</p>	<p>ÉVOLUTION DES BESOINS SOCIÉTAUX, IMPACTS SUR LES FORMATIONS SUPÉRIEURES</p> <p>Les pôles de compétitivité : quels effets sur nos formations ?</p> <p>Exemple du pôle Transaction Électronique Sécurisée en Basse Normandie</p> <p>Délocalisation – Relocalisation : quels impacts sur nos formations?</p>
<p>INSTRUMENTATION, QUELLE PLACE POUR L'ANALOGIQUE ?</p> <p>Besoins dans les applications industrielles actuelles ?</p> <p>Place dans nos formations ?</p>	<p>RECONNAISSANCE, ÉVALUATION DES COMMUNICATIONS DÉDIÉES À L'ENSEIGNEMENT</p> <p>Bilan, évaluations et projection des CETSIS</p> <p>Et les autres? (à l'étranger, dans les autres sociétés savantes...)</p>

CONTACT : Didier ROBBES  
Département de Physique – EEA  
UFR Sciences - UCBN  
6 Bd Maréchal Juin  
F – 14050 Caen Cedex – FRANCE  
Tél : +33 (0)2 31 45 26 97 Web : cetsis2013.sciencesconf.org  
Fax : +33 (0)2 31 45 26 98 Mail : cetsis2013@sciencesconf.org

*Pour toute information complémentaire voir le site : [cetsis2013.sciencesconf.org](http://cetsis2013.sciencesconf.org)*

## Introduction journées EEA thème : "Bâtiment - Energie : quelles contributions du génie électrique ?"

**Marie RUELLAN**

Université de Cergy-Pontoise  
Rue d'Eragny - Neuville Sur Oise  
95031 CERGY-PONTOISE Cédex  
[marie.ruellan@u-cergy.fr](mailto:marie.ruellan@u-cergy.fr)

*Résumé : Les journées de la section électrotechnique du club EEA rassemblent chaque année la communauté francophone d'enseignement et de recherche en génie électrique. Elles permettent de faire le point sur les évolutions les plus récentes dans un thème clé de cette discipline fondamentalement tournée vers l'énergie.*

*Pour l'édition 2012, le thème retenu était "Bâtiment - Energie : quelles contributions du génie électrique ?" et cette manifestation se déroulait sur le site de Gennevilliers de l'Université de Cergy Pontoise, avec le soutien du laboratoire SATIE.*

En France, le bâtiment est le plus gros consommateur d'énergie parmi tous les secteurs économiques avec 70 millions de tonnes d'équivalent pétrole. Soit 43 % de l'énergie finale totale consommée annuellement par chacun d'entre nous. La France s'est fixée comme objectif de diviser par quatre cette consommation d'ici 2050. La consommation moyenne annuelle d'énergie primaire des bâtiments est proche de 400 kWh par m<sup>2</sup> chauffé. La contrainte de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> ainsi que la hausse inéluctable du coût de l'énergie liée à l'épuisement progressif des ressources, nécessiteront donc de parvenir à une consommation moyenne d'énergie primaire de l'ordre de 100 kWh/m<sup>2</sup> en 2050 pour l'ensemble des bâtiments en service, dont environ 50 kWh/m<sup>2</sup> d'énergie primaire pour les usages de chauffage de locaux et de l'eau chaude sanitaire.

Le secteur du bâtiment se positionne dorénavant comme un acteur clé pour parvenir à résoudre les inquiétants défis environnementaux auxquels nous devons faire face. Cette évolution est liée à une prise de conscience récente que ce secteur pourrait bien être le seul qui offre des possibilités de progrès suffisamment fortes pour répondre à aux engagements nationaux de réduction des émissions de gaz à effet de serre. (<http://www2.ademe.fr> - L'efficacité énergétique des bâtiments)

Ainsi les bâtiments du futur devront être peu consommateurs d'énergie voire autonomes

énergétiquement, répondre à nos besoins quotidiens et assurer un certain confort. Les mots clés pour répondre à cette problématique seront à la fois les bâtiments dits basse consommation, à forte efficacité énergétique, intégrant le pilotage et la gestion énergétique des bâtiments ainsi que les énergies renouvelables.

Lors des journées 2012, des spécialistes issus de nombreuses disciplines ont partagé leurs connaissances et apporté leur éclairage à cette problématique. Les notions indispensables, telles que la modélisation thermique du bâtiment mais également l'étude du comportement des occupants, l'analyse sur cycle de vie des habitants et de leurs équipements, les énergies renouvelables dans le cadre du bâtiment, la gestion d'énergie, etc..., ont été mises à la portée des participants. Ces présentations ont permis de réels échanges entre enseignants (du secondaire), universitaires.

Dans cette édition du mois de juillet 2012 de la revue 3EI, nous avons sélectionné quelques articles qui permettront aux lecteurs d'avoir un aperçu de la richesse de cette thématique.

Ils pourront compléter cette lecture avec les présentations des différents orateurs sur la page : <http://www.u-cergy.fr/fr/laboratoires/labosatie/actualites-du-laboratoire-2/club-eea.html>

## La Maison Z.E.N

**Alain RICAUD, Ismaël LOKHAT**

CYTHELIA, 350 route de la Traverse

73000 Montagnole

[www.cythelia.fr](http://www.cythelia.fr)

**Résumé : la Maison Z.E.N (Zéro Energie Nette), inaugurée en Novembre 2007 est la première maison à énergie positive de France. Nous rappelons les principes qui ont guidé sa conception et justifions les choix qui ont été faits. Après quatre années d'exploitation, nous donnons les principaux résultats du suivi de performance qui montrent que l'objectif annoncé à l'époque est vérifié.**

### 1. Enjeux et contexte

Le bâtiment (secteur Résidentiel-Tertiaire) représente 44% de la consommation d'énergie finale. En termes d'émissions de gaz à effet de serre, ce secteur représente 22% des émissions (chiffres 2005, source Agence Européenne de l'Environnement, juin 2007).

Sur les 92 Mt éq CO<sub>2</sub>, concernant ce secteur, 67% sont attribués au résidentiel, donc à l'habitat.

Compte tenu des très grandes marges de manœuvre en termes de procédés constructifs (isolation) et de systèmes actifs (pompes à chaleur), les pouvoirs publics ont tout naturellement décidé de faire porter en priorité l'effort sur ce secteur à travers les différentes réglementations thermiques (RT 2000, RT 2005 et maintenant la RT 2012, qui rend obligatoire la construction de tous les bâtiments neufs en BBC) avec l'objectif que tous les bâtiments neufs soient à énergie positive en 2020. Avec une première étude de faisabilité réalisée en 2004, une construction démarrée en 2006, et une inauguration 2007, la Maison Z.E.N avait pour ambition de démontrer qu'il était possible de construire ce type de bâtiment avec des matériaux et technologies déjà disponibles sur le marché.

### 2. Le concept ZEN

La conception d'une maison à énergie positive ne dissocie pas le bâtiment et la partie énergétique. La recherche de performance énergétique est globale : une approche systémique et multidisciplinaire permet d'assurer à la fois une bonne qualité architecturale, un environnement intérieur sain, une faible consommation d'énergie et une production locale.

L'idée d'un bâtiment qui soit complètement autonome en énergie n'est pas nouvelle. Plusieurs réalisations existent. Hélas, celles-ci font souvent intervenir des moyens de stockage onéreux (batteries électrochimiques au Pb-acide ou système électrolyseur - hydrogène - pile à combustible) tant au niveau de l'investissement que de l'entretien, les cantonnant à l'expérimentation.

La maison Z.E.N qui, sur l'année, produit autant d'énergie qu'elle en consomme, n'est pas autonome dans le sens où elle pourrait se passer de la connexion au

réseau. C'est en fait ce dernier qui lui assure son « stockage nocturne » et « inter-saisonnier ». En somme, **elle est interdépendante, mais n'échange avec l'extérieur que de l'eau, de l'air, de l'électricité et de l'information**. Ses apports énergétiques lui sont fournis sous forme électrique, prélevée sur son toit photovoltaïque ou sur le réseau de distribution et dans l'air où sont prélevées les calories gratuites dont elle a besoin pour se chauffer.

La démarche qui a guidé la conception de la maison Z.E.N est globale : le bâtiment est vu comme un ensemble de fonctions, et non comme une juxtaposition d'éléments qu'il s'agirait d'optimiser individuellement. Par exemple : il n'est pas envisageable de bien isoler les parois opaques tout en négligeant les vitrages, pas plus qu'il n'est permis de réduire les ouvrants au détriment de l'éclairage naturel. De même, il a fallu prendre en compte les interactions entre les différents systèmes actifs.

La première étape de la conception est la réduction des besoins énergétiques.

On regroupe ces besoins au sein de trois ensembles :

- ▲ chauffage/rafraîchissement/ventilation ;
- ▲ éclairage ;
- ▲ eau chaude sanitaire.

Dans un autre ensemble - électricité spécifique -, on regroupe tous les besoins qui ne peuvent être assurés que par le vecteur électricité, tels que la bureautique, la hi-fi, etc. On y inclut aussi les besoins énergétiques pour la cuisine (même si elle aurait pu se faire au gaz, ou toute autre source).

L'objectif étant de ne pas dépasser les 50 kWh/m<sup>2</sup>/an en énergie finale. Une fois cet objectif atteint, le bâtiment doit pouvoir produire une quantité d'énergie au moins équivalente pour pouvoir prétendre à l'appellation « Zéro Energie » ou « Energie positive ». Celle-ci est le plus souvent obtenue au moyen d'une installation photovoltaïque.

Nous présentons ci-après les aspects relatifs à l'architecture, le mode constructif et les systèmes de chauffage, ventilation et eau chaude sanitaire, ainsi que le système photovoltaïque.

### 3. Architecture, matériaux et systèmes

#### 3.1. L'architecture

Afin de limiter les déperditions il est nécessaire de minimiser le ratio surface déperditif/volume et donc de maximiser la compacité du bâtiment. Une bonne maîtrise du volume permet de limiter les déperditions et la meilleure forme pour cela est la yourte mongole.

Dans le cas de l'habitation Z.E.N, nous avons réfléchi à l'intégration du bâtiment dans son environnement géographique. Nous avons donc adopté un style simple, qui reprend l'esthétique des constructions savoyardes, avec un toit à deux pentes égales de 38°, l'inclinaison optimale pour une installation photovoltaïque.

Les débords de l'étage permettent de gagner de la surface habitable à l'étage et d'agir en casquette solaire tout en protégeant le périmètre du RDC de la pluie.

La Surface Hors-d'Oeuvre Nette (SHON) est de 225 m<sup>2</sup> et la surface habitable, de 192 m<sup>2</sup>.



Figure 1 : vue sud-ouest de la Maison Z.E.N

Les pièces de vie sont orientées au sud, à l'est et à l'ouest tandis que les pièces de service, moins fréquentées (cuisine, salles d'eau, entrée, escaliers) sont disposées en face nord. La façade sud est munie de larges ouvertures vitrées afin de valoriser les apports solaires en hiver et de bénéficier du confort de la lumière naturelle. Afin de tenir compte d'un masque proche situé à l'ouest, la maison est légèrement orientée vers l'est (20°) (figure 1).

Pour limiter les surchauffes d'été, une « casquette » sud a été calculée. Pratiquement, il s'agit simplement du débord de toiture. Au solstice d'été, le 21 juin, lorsque le soleil est au zénith, la casquette ombre complète le vitrage qu'elle surplombe, tandis qu'au solstice d'hiver, à midi solaire, la fenêtre est complètement exposée à l'éclairage direct. Elle permet de stopper 60 % de l'ensoleillement sur les trois mois d'été. Toutefois, en hiver, elle laisse largement pénétrer les rayons du soleil pour réchauffer l'intérieur de la maison.

#### 3.2. L'utilisation de matériaux naturels et performants

La maison est essentiellement constituée de bois pour les murs et la façade. Celui-ci constitue une ressource renouvelable et fixe plus de CO<sub>2</sub> qu'il n'en consomme : les émissions de gaz à effet de serre du bois

d'œuvre sont considérées comme négatives (500 kg éq C/tonne) si le bois est replanté, comme c'est le cas en Europe; c'est donc un puits de carbone.

##### 3.2.1. Une structure en bois

La maison Z.E.N est construite avec une structure bois en « KLH » (Kreuz Lagen Holz, épicea d'Autriche). Il s'agit de panneaux constitués de lamelles de bois massif contrecollées croisées avec d'excellentes propriétés mécaniques, isolantes et inertielles. Ce matériau de construction, outre le fait qu'il offre la possibilité de bâtir une maison en une journée, présente d'excellentes propriétés thermiques, une certaine inertie et absorbe l'humidité. Les 94 mm d'épaisseur du KLH, en couches croisées, renforcent donc la capacité naturelle du bois à limiter les flux de chaleur. En effet, 3,5 cm de bois équivalent à 1 cm d'isolant classique mais à plus de 35 cm de béton. Le KLH étant prédécoupé en usine, la pose complète se déroule en 10 heures.

L'utilisation de bois massif s'inscrit dans une politique de développement durable, le bois étant l'un des rares matériaux de construction renouvelable. Les forêts d'Autriche, exploitées de manière durable, fournissent la matière première pour le KLH. Ce matériau de construction a reçu un avis favorable du CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment).

##### 3.2.2. Une isolation extérieure en liège

L'isolation extérieure permet d'exploiter l'inertie thermique du bâtiment : synonyme de confort, elle limite fortement les ponts thermiques. On estime, de façon générale, qu'elle permet de diviser par 2 ou 3 les pertes de chaleur. Le surcoût apparent qu'elle présente est en réalité assez minime dans un bilan économique global.

L'isolant est du liège fabriqué à partir de l'écorce du chêne liège. Chauffé à 300 °C avec de la vapeur d'eau il s'expande et se colle avec sa propre résine. Ce processus demande très peu d'énergie grise. Au-delà d'un matériau écologique, il présente l'avantage pour une maison à ossature bois, d'être imputrescible et incombustible.

##### 3.2.3. Le bardage en Red Cedar

Le bardage de la maison Z.E.N est en cèdre rouge, ce qui lui procure un aspect chaleureux, en habillant la maison d'un beau camaïeu ocre. Cette essence, en provenance du Canada, résiste au pourrissement et aux attaques d'insecte. Cela augmente sa durée de vie, sans avoir recours à un traitement chimique. De plus, ce bois est exempt de veines de résine, il est léger, facile à travailler et à finir. Notons que les parois ne comprennent pas de pare-vapeur ; celui-ci est en effet inutile dans la mesure où il n'existe aucun risque de condensation dans l'isolant, puisque c'est la paroi intérieure qui fait office de pare-vapeur.

### 3.2.4. Résistance thermique de la paroi de la maison ZEN

On a de l'intérieur (gauche) vers l'extérieur (droite) (figure 2) :

- du bois massif KLH de 94 mm d'épaisseur ;
- un isolant liège de 150 mm ;
- une lame d'air de 27 mm ;
- un bardage en Red Cedar de 19 mm.



Figure 2 : maquette d'une paroi verticale de la Maison Z.E.N

La résistance thermique par unité de surface offerte par cette paroi entre les deux ambiances qu'elle sépare, est de  $4,37 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ , soit un coefficient de déperditions  $U$  de  $0,23 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ .

### 3.3. Les ouvrants

Les pertes par les vitrages représentant 25 à 35 % des pertes totales, nous avons choisi des ouvrants à la pointe de la technologie, composés de triples vitrages peu émissifs (qui empêchent le rayonnement infrarouge du vitrage intérieur vers l'extérieur) avec lame d'argon.

Ainsi, toutes les façades de la maison Z.E.N possèdent des ouvrants munis de triples vitrages peu émissifs. Cette configuration a pour avantage de limiter au maximum les déperditions au nord, et de lutter contre les surchauffes d'été au sud.

Pour une meilleure gestion des apports solaires, leur surface est limitée au nord, mais pas leur nombre, afin de garantir un éclairage naturel suffisant dans toutes les pièces de la maison. Ainsi, toutes les salles d'eau bénéficient d'un éclairage naturel, même celles qui sont situées à l'étage, via des fenêtres de toit, elles aussi en triple vitrage.

Les cadres sont également d'excellente facture. En bois, ils comportent une isolation supplémentaire avec des rupteurs de ponts thermiques en liège. Ce qui permet d'obtenir les performances suivantes :

- ▲  $U_w = 0,86 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$  (coefficient de transmission de la fenêtre),
- ▲  $g = 0,5$  (facteur solaire du vitrage, défini comme le ratio de la quantité totale d'énergie pénétrant dans le bâtiment sur l'énergie incidente reçue par le vitrage).
- ▲  $U_{verre} = 0,55 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ .

### 3.4. Les systèmes actifs

#### 3.4.1. La ventilation

Elle est assurée mécaniquement par une double-flux thermodynamique en amont de laquelle on trouve un puits climatique (ou puits canadien/provençal).

#### 3.4.2. Le puits climatique

Le puits canadien de la Maison Z.E.N est un tube de 20 cm de diamètre enterré à 2,50 mètres de profondeur ; en forme d'épingle, il fait 40 mètres de long. Toutes les parties enterrées sont constituées de tronçons en polyéthylène haute densité, recouvertes d'un revêtement en argent antibactérien. Les parties accessibles (entrée et sortie) sont en PVC.

Notons qu'en été, il y a risque de condensation et il est important de ne pas avoir de point bas à l'intérieur même du puits canadien : de l'eau stagnante pourrait générer des odeurs désagréables qui se retrouveraient dans la maison.

Sur le puits de la maison Z.E.N, deux points bas existent : un à l'entrée et l'autre à la sortie ; ce dernier est équipé d'une récupération des condensats.

Le puits canadien est équipé d'un by-pass constitué de deux registres motorisés qui permettent de sélectionner l'air le plus favorable en fonction de la saison : le plus chaud en hiver et le plus frais en été.

#### 3.4.3. La double-flux thermodynamique

La pompe à chaleur de la Maison Z.E.N permet de fournir 2 kW en mode chaud et 3 kW en mode froid. Elle dispose en effet de deux compresseurs de 1 et 2 kW qui peuvent fonctionner alternativement en mode chaud et simultanément en mode froid.

La pompe à chaleur est installée au sous-sol, dans lequel arrive l'air neuf soit en provenance du puits canadien, soit directement de l'extérieur. L'air neuf est ensuite insufflé dans les différentes pièces au moyen de colonnes situées de chaque côté de la maison (à l'Est et à l'Ouest). Une puissance de 2 kW est suffisante pour couvrir la plus grande partie des besoins de chauffage, mais un complément est nécessaire dès que la température extérieure avoisine les  $0^\circ\text{C}$ . Ce complément est assuré par une pompe à chaleur air/eau.

#### 3.4.4. La pompe à chaleur air/eau

Une PAC air/eau de 3kW eut été suffisante pour garantir des performances correctes. Mais il n'en existait pas sur le marché.

D'une puissance d'environ 5 kW, celle choisie fonctionne grâce à un compresseur disposant de la technologie « Inverter ». Cette technologie permet de réguler la vitesse de rotation du compresseur en fonction de la puissance à fournir. Cela permet de réaliser des économies par rapport à une solution en Tout-Ou-Rien, qui, en raison des appels de puissance au démarrage du compresseur, est bien plus gourmande en énergie. La technologie « Inverter » permet aussi de faire l'impasse sur un ballon tampon.

La PAC permet de chauffer le bâtiment au moyen d'émetteurs basse température.

La PAC air/eau permet aussi de produire de l'eau chaude sanitaire.

#### 3.4.5. Les émetteurs de chauffage

Dans la maison Z.E.N, les émetteurs de chauffage sont constitués par des murs chauffants en allège, option préférée à celle d'un plancher chauffant en raison d'une moindre inertie. En effet, il peut arriver que le système

de chauffage soit sollicité pour des périodes de temps très courtes, en particulier pour des bâtiments bien isolés. Ceci est d'autant plus vrai pour la maison Z.E.N qu'elle est dotée d'un second système de chauffage. Pour un plancher chauffant, on devra d'abord chauffer la dalle, avant qu'un régime permanent ne s'établisse. Et, bien qu'il existe des chapes à faible inertie, le temps de mise en action est beaucoup plus lent (3-4 heures) qu'avec un mur chauffant (1/4 - 1/2 heure), dont l'épaisseur (et donc la masse) est beaucoup plus faible.

Les émetteurs sont constitués par des plaques de Fermacell de 18 mm, dans lesquels circulent des tuyaux (eau chaude à 33 °C).

#### 3.4.6. Le photovoltaïque

L'une des spécificités de la maison ZEN est qu'elle n'échange que de l'électricité avec l'extérieur.

Ce fut un choix délibéré que de baser le système énergétique de la maison sur le vecteur électricité. Sa croissance annuelle mondiale est deux fois plus rapide que les autres formes d'énergie. Dès lors, outre le fait que l'accès à l'électricité est un facteur important du développement des pays les moins avancés, nous pensons que d'un point de vue global, ce vecteur énergétique tiendra une place prépondérante dans le bouquet énergétique du milieu du siècle. Ses applications potentielles sont en effet multiples et des synergies sont possibles entre l'habitat et le transport, deux secteurs importants au niveau de la consommation énergétique et des émissions de gaz à effet de serre.

Néanmoins, compte tenu de son coût encore élevé, et ce fut l'une des préoccupations principales lors de la conception, l'objectif premier est d'utiliser rationnellement et intelligemment cette énergie.

Grâce aux efforts consentis sur la demande, nous avons pu utiliser le photovoltaïque (figure 3) comme source pour concevoir une maison qui ne consomme et ne produit que de l'électricité. Nous avons installé sur la toiture de la maison ZEN une puissance photovoltaïque de 13 kWc (7 kWc au Sud et 6 kWc au Nord) qui produit annuellement respectivement 7 000 kWh et 3 000 kWh pour un total de 10 000 kWh, correspondant aux besoins estimés de 50 kWh/m<sup>2</sup>.an d'une utilisation domestique sur une surface habitable de 200 m<sup>2</sup>.



Figure 3 : les modules en couches minces CIS de la Maison Z.E.N

Contrairement aux idées reçues, il n'est pas impossible d'installer des modules photovoltaïques

orientés au nord. C'est tout à fait envisageable dans le cas d'une construction neuve pour laquelle les modules se substituent aux tuiles.

En outre, ce n'est pas parce qu'un module photovoltaïque est au nord qu'il ne produit pas : les simulations (et le monitoring l'a prouvé) montraient que le pan nord produirait la moitié de ce que produit le pan sud. En fondant le calcul non sur l'investissement total de l'installation, mais sur cet investissement moins l'économie réalisée sur les ardoises, on arrive à un équilibre économique acceptable.

#### 4. Bilan

La maison a été conçue comme une maison d'habitation, mais elle abrite depuis janvier 2008 les bureaux de Cythelia ([www.cythelia.fr](http://www.cythelia.fr)). Les objectifs n'ont pas changé pour autant, seule la répartition entre les postes de consommation est modifiée.

La figure 4 ci-dessous présente les consommations par poste ainsi que les productions des quatre dernières années. Les consommations de 2008 sont sous-estimées puisque le monitoring complet n'est opérationnel que depuis mars 2008. On remarque qu'à l'exception de 2010, les consommations sont très proches de l'objectif des 50 kWh/m<sup>2</sup>.an et que les productions sont également très proches.

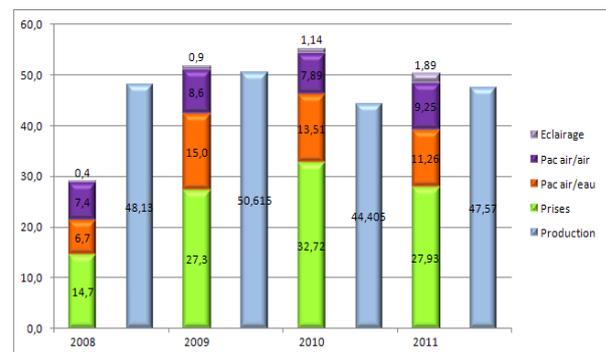


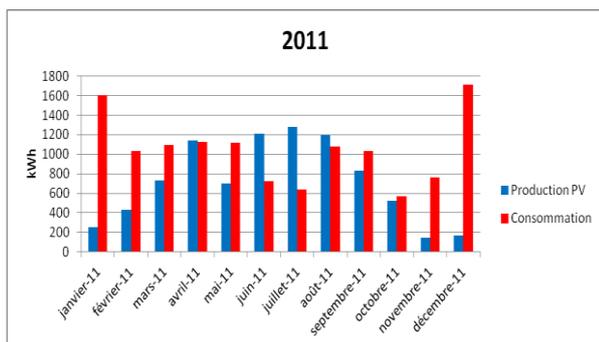
Figure 4 : consommations détaillées et productions des quatre dernières années.

On remarque, entre 2009 et 2010, que des consommations plus importantes d'électricité spécifique (« prises ») se traduisent par des besoins de chauffage moins importants (les deux PAC), en raison d'apports internes plus importants. L'augmentation des consommations d'électricité spécifique entre 2008 et 2010 s'explique par le passage du nombre d'occupants de 5 à 12. La diminution observée en 2011 s'explique en partie par une réorganisation du temps de travail, au renouvellement du matériel informatique, et, osons-nous l'espérer, à un comportement plus sobre !

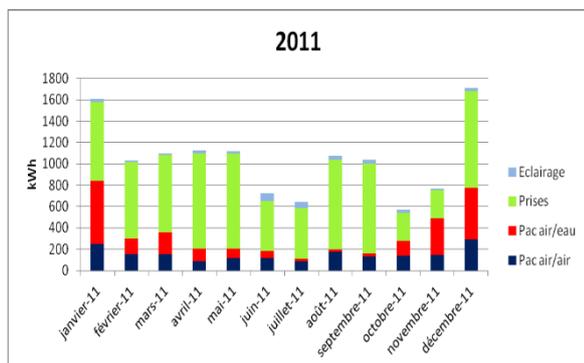
La Figure 5 illustre particulièrement bien le déphasage semestriel existant entre consommations et production pour l'année 2011.

La Figure 6 détaille ces mêmes consommations poste par poste. Elles sont relativement faibles. Attention, les consommations d'éclairage sont surestimées, puisqu'elles prennent en compte la consommation d'un ventilateur destiné à ventiler les modules

photovoltaïques et c'est pourquoi les consommations de ce poste sont plus élevées l'été.



**Figure 5 :** consommations et productions mois par mois (2011)

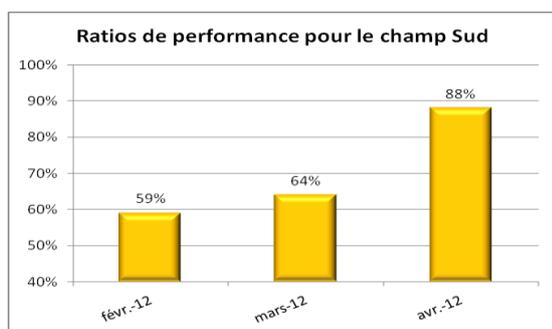


**Figure 6 :** consommations détaillées mois par mois (2011)

Des observations intéressantes ont pu être faites concernant l'installation photovoltaïque, notamment concernant la dégradation des modules.

La technologie CIS mise en œuvre, comme certaines autres couches minces encapsulées dans un verre sodocalcique, nécessite une mise à la terre de la polarité négative. Or, cette spécificité n'est connue que depuis début 2010 et la correction n'a été apportée qu'au printemps 2010. Entre-temps, le suivi de production a permis de mettre en évidence la dégradation des modules par le ratio de performance (figure 7): les productions n'étaient plus à la hauteur de ce qui était attendu étant donnée l'irradiation solaire; depuis la mise à la terre, la dégradation s'est stabilisée.

Les modules ont été échangés gracieusement en mars 2012 au titre de la garantie, et l'impact sur le ratio de performance est immédiatement visible.



**Figure 7 :** ratios de performance pour le champ Sud sur la période février à avril 2012

## 5. Les suites du projet

Nous l'avons vu, le nombre d'occupants de la Maison Z.E.N a considérablement augmenté. C'est une des raisons pour lesquelles nous avons construit un deuxième bâtiment, plus petit, à proximité immédiate.

La Petite Maison ZEN (PMZ) (figure 8) est toujours un bâtiment à énergie positive, en ossature bois, et est équipée d'un système de chauffage/rafraîchissement/ECS utilisant le couplage entre toiture photovoltaïque (en couches minces CIGS) et pompe à chaleur. Cette idée de couplage thermique avait été initiée sur la Maison Z.E.N, pour laquelle l'évaporateur de la PAC air/eau est placé au grenier, permettant une ventilation des modules PV et une augmentation de la température de source froide.

Pour la PMZ, un prototype a été développé dans le cadre du programme de recherche PACAirPV financé par l'ANR et devrait déboucher sur la commercialisation du système AEDOMIA, en partenariat avec un industriel.

AEDOMIA est un produit de couverture du bâtiment multifonctions. Ce système énergétique multifonctionnel permet de valoriser la toiture photovoltaïque et d'en faire un élément actif de la construction. Il satisfait 5 besoins : couverture, production d'électricité, de chaud, de froid (en été, le système fonctionne la nuit) et d'eau chaude sanitaire. La toiture devient ainsi un élément clef du confort dans le bâtiment. Principaux avantages :

- ✦ les modules PV sont mieux ventilés et leur production et durée de vie sont augmentées,
- ✦ le coefficient de performance (COP) de la PAC est amélioré,
- ✦ le système permet de déphaser production et consommation. La production est réalisée aux moments les plus favorables.



**Figure 8 :** au premier plan, la Petite Maison Z.EN, en arrière plan, la Maison Z.E.N

En attendant que les bâtiments à énergie positive ne deviennent obligatoires en 2020, un label similaire au label BBC-Effinergie est en cours d'élaboration, et devrait inciter les maîtres d'ouvrage à en construire dès 2013.

## 6. Références

« Construire un bâtiment à énergie positive », Alain Ricaud et Ismaël Lokhat, Editions Dunod, 2010.

# Programme HOMES : une gestion intelligente de l'énergie dans les bâtiments

Véronique BOUTIN

Schneider Electric

[veronique.boutin@schneider-electric.com](mailto:veronique.boutin@schneider-electric.com)

**Résumé :** le programme HOMES est un projet de coopération R&D entre 13 partenaires industriels et acteurs de recherche. Son ambition est de préparer des solutions pour permettre à chaque bâtiment (neuf ou ancien, tertiaire ou résidentiel) d'atteindre sa meilleure performance énergétique, à partir de solutions d'Efficacité Énergétique Active. Ces solutions mettent notamment en œuvre des solutions de contrôle optimisant le compromis confort/énergie, en considérant le système bâtiment dans sa globalité. Après plus de trois années de travaux, le programme a livré un large ensemble de résultats : des études, des prototypes de solutions, des expérimentations ainsi que des actions de dissémination. Les premiers résultats d'expérimentations sont très positifs, puisque les gains d'efficacité énergétique évalués à partir de simulations sur un jeu de bâtiments pilotes vont de 25% à plus de 50%.

## 1. L'efficacité énergétique des bâtiments: un enjeu clé pour l'Europe

La lutte contre le changement climatique est l'un des défis majeurs du 21<sup>ème</sup> siècle. Réduire les émissions de gaz à effet de serre (dont le CO<sub>2</sub>) de façon drastique au cours des décennies à venir est devenu un leitmotiv.

Les bâtiments représentent près de 40% de l'énergie utilisée dans la plupart des pays et sont responsables d'un niveau similaire des émissions mondiales de CO<sub>2</sub>. L'efficacité énergétique dans les bâtiments est donc l'une des clés pour réduire les émissions à effet de serre. Pour activer efficacement ce levier, il faut disposer de solutions faciles à déployer -en termes de coût et de mise en œuvre- et accessibles au parc existant : rappelons que seulement 1% du parc est renouvelé chaque année et que l'essentiel des dépenses énergétiques est imputable au parc existant

Les institutions internationales établissent des directives et des normes autour de l'efficacité énergétique (figure 1), qui fixent des exigences minimales pour l'efficacité énergétique des bâtiments. Ces éléments sont progressivement pris en compte dans les réglementations nationales et les codes du bâtiment. Aujourd'hui, ces réglementations concernent majoritairement la conception des bâtiments et exploitent encore assez peu le potentiel des solutions de gestion de l'énergie qui peuvent générer d'importants gains opérationnels avec des investissements relativement faibles.

Les labels de performance environnementale permettent de se projeter au-delà de la performance minimale visée par les aspects réglementaires. Ils offrent un moyen et une opportunité d'attribuer une valeur à l'efficacité énergétique et sont un moteur essentiel de progrès. Les fonctions de management de l'énergie telles que le contrôle, la mesure et la surveillance des équipements consommateurs d'énergie sont facilement intégrables dans leurs critères d'évaluation et peuvent ainsi

contribuer à la diffusion de l'efficacité énergétique active.

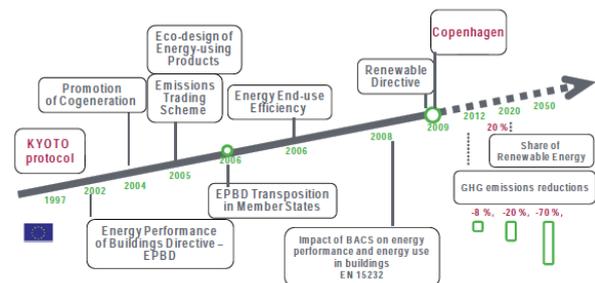


Figure 1 : le processus européen de transformation de la demande énergétique des bâtiments

## 2. Comment améliorer l'efficacité énergétique ?

L'énergie entre dans le bâtiment sous plusieurs formes (figure 2) :

- ▲ elle peut être délivrée par un fournisseur d'énergie sous la forme d'électricité, de fuel, de gaz ou autre. Cette énergie a un coût économique et environnemental.
- ▲ elle peut-être produite localement (énergie électrique produite par PV ou micro-éolien, énergie thermique produite par panneau solaire thermique par exemple),
- ▲ elle est également apportée au bâtiment de façon « gratuite » en grande partie par les fenêtres (énergie thermique et lumineuse) et par les apports thermiques des occupants, des équipements. En fonction du moment, de la saison, ces apports gratuits peuvent être favorables ou non.

Les pertes énergétiques du bâtiment correspondent aux pertes de chaleur par l'enveloppe, aux pertes de chaleur liées au renouvellement d'air (ventilation), aux pertes techniques par les cheminées...

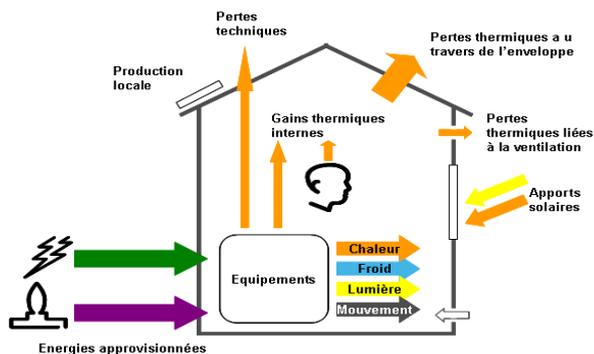


Figure 2 : les flux énergétiques dans le bâtiment

Les solutions techniques sont de plusieurs natures :

- ▲ les solutions « passives » qui améliorent l'enveloppe (ex : isolation, vitrages performants) pour diminuer les besoins en chauffage ou en refroidissement,
- ▲ les solutions mettant en œuvre la performance « intrinsèque » des équipements de confort ou d'usage (ex : ampoules basse consommation),
- ▲ les solutions qui permettent de produire localement de l'énergie grâce aux énergies renouvelables,
- ▲ les solutions « d'efficacité énergétique active » qui visent à améliorer l'utilisation des équipements consommateurs d'énergie et à développer la prise de conscience énergétique.

### 3. Le programme HOMES : une coopération R&D d'envergure dédiée à l'efficacité énergétique active

Le programme HOMES est un programme de 4 ans, soutenu par OSEO, et lancé en 2008 afin de développer une nouvelle filière de solutions autour de l'efficacité énergétique active. C'est un des seuls programmes de recherche s'étendant des études marketing au déploiement des solutions.



Figure 3 : les partenaires du programme HOMES ([www.homesprogramme.com](http://www.homesprogramme.com))

Le programme fédère 13 partenaires industriels (figure 3) et acteurs de recherche leaders de leur marché (éclairage, climatisation, fermetures, production et distribution électrique, gestion technique du bâtiment), innovateurs technologiques, prescripteurs, normalisateurs, sous la conduite de Schneider Electric, chef de file. HOMES regroupe un ensemble d'études, de travaux et d'actions pour lesquels les partenaires apportent leur savoir-faire et leur contribution :

- ▲ des études de cadrage pour analyser les leviers d'efficacité énergétique, pour spécifier les besoins en termes de valeurs d'usage, pour comprendre le jeu réglementaire et normatif en place et en devenir, pour concevoir et optimiser les architectures des systèmes apportant mesure, contrôle et distribution des énergies,
- ▲ des travaux technologiques pour intégrer les technologies émergentes ou existantes aux besoins des prototypes,
- ▲ des travaux de prototypage des solutions. Celles-ci sont mises en œuvre et testées sur des plateformes de test, et dans des bâtiments pilotes.
- ▲ des actions de dissémination pour préparer la compréhension et l'adoption des futures solutions.

L'ambition du consortium est de préparer des solutions pour permettre à chaque bâtiment (neuf ou ancien, tertiaire ou résidentiel) d'atteindre sa meilleure performance énergétique, à partir de solutions d'efficacité énergétique active. Ces solutions mettent notamment en œuvre des solutions de contrôle optimisant le compromis confort/énergie, en considérant le système bâtiment dans sa globalité.

### 4. Les leviers d'efficacité énergétique active mis en œuvre par HOMES

Partant de l'analyse des flux énergétiques dans le bâtiment, le programme HOMES a organisé sa réflexion autour des objectifs suivants (figure 4) :

- **réduire les besoins de lumière artificielle, de chaleur et de froid artificiels, les besoins en eau chaude, les besoins en air neuf et les besoins en énergie des équipements d'activité mobiliers ou immobiliers** : le principe général est d'apporter le confort optimal et les services énergétiques quand et où il y a occupation, et de privilégier les économies d'énergie dans tous les autres cas. Pour cela, il faut prendre en compte l'occupation réelle au niveau de chaque zone du bâtiment, permettre l'adaptation des niveaux de confort en fonction de l'occupation, en fonction des souhaits des occupants (de façon à supprimer les dérèglages liés aux insatisfactions), prendre en compte les apports gratuits, notamment les apports de lumière et de chaleur par les fenêtres, soit pour les utiliser, soit pour s'en protéger.

Cela conduit à la mise en place de systèmes de détection (et/ou de prévision) d'occupation (présence/absence, nombre de personnes), de capteurs permettant de mesurer les paramètres impactant le confort (thermique, lumineux, qualité d'air), de systèmes permettant de piloter les équipements de confort (émetteurs de chaleur, de lumière, extracteurs ou brasseurs d'air, ...), d'algorithmes permettant d'optimiser le jeu optimal de consignes.

- **réduire la demande en énergie approvisionnée pour satisfaire les besoins de confort et d'efficacité des activités dans les différents locaux** : pour cela, on cherche à améliorer les performances des systèmes techniques d'une part (systèmes de génération,

distribution et émission de chaleur, de froid) et à optimiser la gestion des sources d'énergie d'autre part en priorisant des énergies renouvelables produites localement, sous contraintes du réseau (Smart Grid).

Cela conduit à la mise en place d'un ensemble de fonctions de contrôle permettant, par exemple, d'ajuster la température d'un liquide caloporteur par une loi d'eau optimisée, de gérer les arrêts/redémarrages des équipements de production, d'utiliser des stockages d'énergie thermique (ou électrique)...

- **créer une prise de conscience énergétique** : l'enjeu et le levier le plus important pour transformer durablement les consommations énergétiques des bâtiments et réduire leur empreinte. Il s'agit de créer une dynamique et la volonté de :

- ▲ modifier les comportements énergivores du quotidien,
- ▲ assister la décision d'investir pour améliorer la performance de son logement ou de son parc de bâtiment en facilitant la sélection des solutions les plus pertinentes dans chaque cas,
- ▲ intégrer la dimension énergétique dans les phases de conception, réalisation, gestion et maintenance des bâtiments.

Pour contribuer à faire évoluer les comportements, un ensemble de solutions et d'outils peuvent être mis en place et sont étudiés par le programme HOMES: des équipements de mesure faciles à installer et peu coûteux pour disposer des informations de consommation suffisamment détaillées, des indicateurs lisibles et motivants adaptés à chaque profil, des outils de conviction pour les maîtres d'ouvrage, des outils de simulation pour la filière professionnelle.



Figure 4 : Les leviers HOMES de l'efficacité énergétique active

Il est bien évident que l'intérêt de chaque levier est différent suivant le type de bâtiment, ses usages, sa localisation. Par exemple, les fonctions d'optimisation par l'intermittence présentent un intérêt tout particulier pour les bâtiments existants (à cause de la facilité d'installation). Ou encore, la gestion des apports gratuits ou encore la prise en compte de l'énergie solaire compteront parmi les priorités des bâtiments neufs.

## 5. Nouvelles solutions pour le bâtiment : quelques prototypes issus du programme HOMES

- « **Roombox** », un contrôleur permettant l'intégration de fonctions d'optimisation énergétique dans une zone tertiaire (figures 5 et 6).

Leader du projet : Schneider Electric

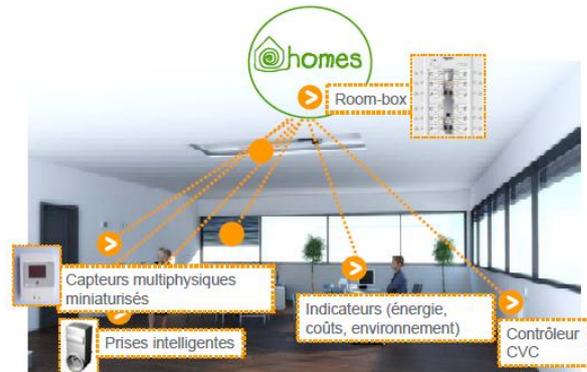


Figure 5 : RoomBox

La solution « RoomBox » est le futur produit qui permet une architecture électrique de contrôle-commande décentralisée et multi-applicative. « RoomBox » alimente, protège et contrôle à la fois l'éclairage, les volets et les stores, le chauffage, la ventilation, la climatisation (CVC). Elle assure quatre fonctions essentielles : distribution électrique, mesure de la consommation, contrôle de chaque circuit électrique, protection individuelle des circuits électriques. De plus, l'installation d'une solution « RoomBox » réduit l'utilisation de câbles de 30 à 60 % et le temps d'installation - reconfiguration des bureaux est divisé par 2.



Figure 6 : le prototype « RoomBox » fait partie des prototypes HOMES présentés à l'International Customer Lounge, show room Schneider Electric à Rueil Malmaison (accessibles aux enseignants avec un groupe d'étudiants sur rendez-vous)

- le **contrôleur d'émission CVC haute efficacité énergétique**.

Leader du projet : CIAT

Le contrôleur d'émission CVC haute efficacité énergétique a pour objectifs principaux :

- ▲ d'augmenter le confort, en adaptant la ventilation au besoin précis du moment, en minimisant le bruit lors des variations de vitesse de la ventilation,
- ▲ d'obtenir la meilleure efficacité énergétique, en utilisant des moteurs à haut rendement et en apportant le moyen d'assurer la production de chaud, de froid au besoin réel d'émission,

- ♣ de sensibiliser à la consommation d'énergie, en mettant à disposition des indicateurs de consommation temps réel pour le gestionnaire et la maintenance.

Le contrôleur d'émission CVC contrôle la vitesse du moteur de la ventilation et son alimentation en eau. Il acquiert les informations des capteurs locaux, et évalue en temps réel les consommations d'énergie thermique et électrique. Il dialogue avec le « Building Management System (BMS) » et/ou la « RoomBox » ainsi qu'avec le producteur thermique (ex. : climatisation ou pompe à chaleur) : cela permet de prendre en compte les consignes demandées au niveau global du bâtiment et d'ajuster la production au besoin local. Grâce aux fonctions de communication, le contrôleur d'émission fournit également des informations détaillées de consommation par zone.

- le **capteur de confort sans fil et autonome** (figure 7) :

Leaders du projet : CEA & Schneider Electric



Figure 7 : capteur de confort

Le capteur de confort sans fil et autonome vise :

- ♣ à acquérir en temps réel les données qui entrent en jeu dans la perception de confort,
- ♣ à intégrer ces données sur un même composant pour réduire les coûts,
- ♣ à être simple à installer et sans maintenance tout au long de sa durée de vie, et donc compatible avec tous types de bâtiments, notamment en rénovation.

Ce capteur de confort est autonome en énergie : il est alimenté à partir d'une cellule solaire et communique sans fil les informations de mesure, en se basant sur le protocole ZigBee. Sa consommation est très faible (5µ watts), ce qui garantit son fonctionnement même si le niveau d'éclairage est très réduit : deux mois de fonctionnement dans une pièce non éclairée.

- « **EveBIM** », outil collaboratif pour les acteurs du bâtiment (figure 8)

Leaders du projet : CEA & Schneider Electric

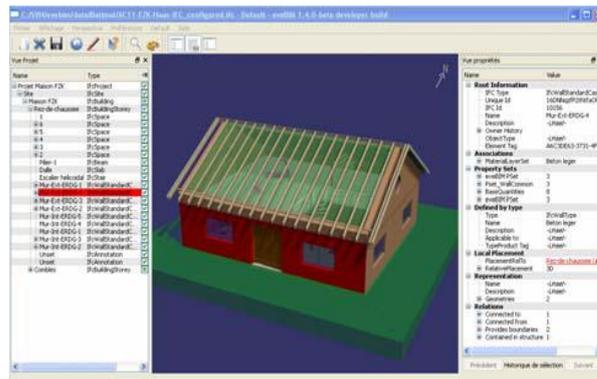


Figure 8 : « EveBIM »

« EveBIM » est un outil logiciel conçu pour faciliter la collaboration entre les différents acteurs du bâtiment. Il permet de partager des données du bâtiment et ainsi d'augmenter l'efficacité du travail de chacun : réduire délais et erreurs, encourager les échanges. Il intègre une dimension efficacité énergétique à chaque étape de la réalisation et de la gestion d'un bâtiment en facilitant l'interfaçage avec les outils de simulation et d'évaluation, ainsi que le suivi de la performance énergétique. Le projet a pour ambition de développer un ensemble de composants logiciels répondant aux normes IFC. Un premier prototype logiciel pour visualiser les fichiers IFC (vues 3D et objets) a été réalisé. En cours, le développement d'une interface avec les outils de simulation d'énergie et de confort (dont SIMBAD).

- les **équipements ZigBee et courant porteur** pour l'efficacité énergétique dans la maison :

Leaders du projet : Schneider Electric - Watteco

Il s'agit ici de mettre à disposition de l'habitat un ensemble de produits communicants permettant de gérer les charges d'une part et de mesurer les consommations d'autre part. Ils permettent de répondre à des demandes du réseau intelligent (smart grid), de rendre l'énergie consommée visible et d'exécuter des algorithmes d'efficacité énergétique. Une première série de prototypes a été réalisée, basée sur une communication radio ZigBee et courant porteur WPC (Watt Pulse Communication).

- ♣ ZigBee TIC (Télé-Information Clients) pour lire les informations transmises par le compteur électronique,
- ♣ module de réception pour cadre photo numérique afin d'afficher des informations tarifaires et de consommation énergétique,
- ♣ prise communicante pilotable pour piloter les charges en fonction, par exemple, du prix de l'énergie.

Un prototype de télécommande radio directive, le « pointeur radio », a également été réalisé pour associer facilement les équipements entre eux et ainsi simplifier l'installation. De nouvelles fonctionnalités sont étudiées dans la suite du programme : algorithmes de contrôle avancés, fonctions de suivi et tendances des consommations, charge optimisée du véhicule électrique...

## 6. Les économies d'énergies accessibles vues au travers des expérimentations et des simulations

Les stratégies de contrôle permettant de réduire les besoins (besoins de lumière artificielle, de chaleur -ou de froid- artificiels, besoins en air neuf, en eau chaude sanitaire et besoins d'alimentation électrique des équipements d'activité) ont été testés et évalués sur un ensemble de sites réels choisis pour leur diversité (différents âges constructifs, secteurs d'activité climatologie, équipements techniques, sources renouvelables). Un ensemble de sept sites pilotes ont ainsi été instrumentés pendant plus d'une année. Les données réelles relevées ont ainsi permis de simuler et d'évaluer les stratégies de contrôle HOMES. Les résultats (figure 9) ont montré des gains allant de 25% à 56% sur la consommation globale du site. De plus, les différentes expérimentations ont montré que ces gains étaient d'autant plus grands que l'on contrôlait finement les espaces et l'occupation. A noter que ces résultats extrapolés au parc européen effacent 40% de la consommation des bâtiments.

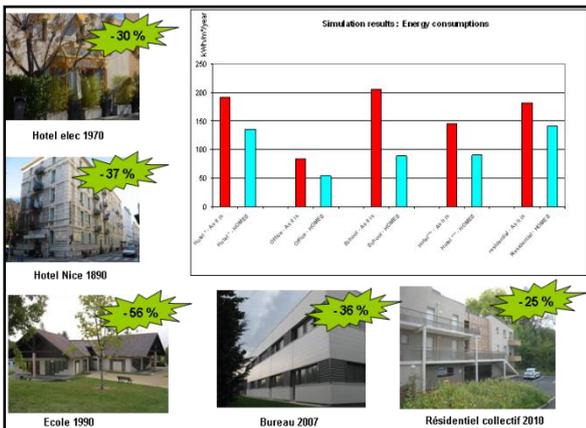


Figure 9 : exemples de sites pilotes et résultats associés

## 7. HOMES et au-delà

Au-delà des résultats techniques, de nombreuses actions de dissémination ont été menées dans le cadre du programme HOMES, avec l'objectif permanent de promouvoir l'efficacité énergétique dans les bâtiments : des actions pédagogiques pour les jeunes, pour les professionnels ont permis d'en expliquer les principes, au travers des MiniHOMES par exemple (Figure 10), de supports de cours ou d'interventions dans le milieu universitaire par exemple.

La pédagogie est d'ailleurs au centre des préoccupations du groupe Schneider Electric qui a mis en ligne pour les acteurs professionnels un ensemble de formations gratuites ([www.MyEnergyUniversity.com](http://www.MyEnergyUniversity.com)), et qui conçoit des offres de kits pédagogiques autour de l'efficacité énergétique.



Figure 10 : MiniHOMES est un projet pédagogique basé sur l'expérimentation, visant à expliquer aux plus jeunes, dans un contexte scolaire, les moyens d'économiser l'énergie dans une maison.

# De la passoire thermique aux ilots à énergie positive, un aperçu des défis à relever par les acteurs de la filière électrique

Jean Christophe VISIER

Université Paris Est, Centre scientifique et technique du bâtiment, Département Energie Santé Environnement 84 Avenue Jean Jaures F-77447 Marne la Vallée Cedex 02

**Résumé :** Les bâtiments consomment 40% de l'énergie utilisée en France. Les lois Grenelle et les directives européennes fixent un nouveau cadre. D'ici 2020 les bâtiments neufs devront être à énergie positive et les bâtiments existants devront avoir réduit leur consommation de 38%. Quels sont les défis à relever pour atteindre ces objectifs. Nous sommes partis d'une analyse menée en 2009 sur les besoins de recherche pour aller vers des bâtiments à énergie positive. Cette étude a permis d'identifier les besoins suivant 8 axes structurants et on identifie une série de défis spécifiques à la filière électrique.

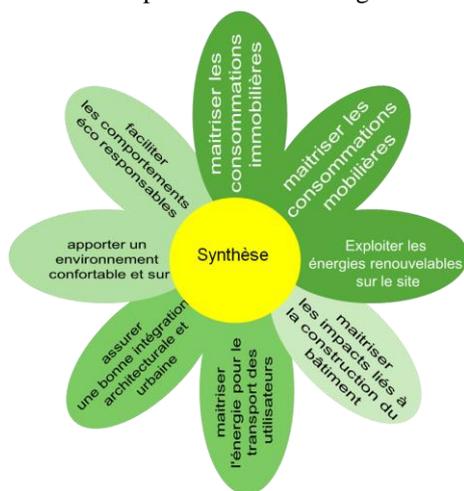
## 1. Introduction

En 2005 un article de prospective décrivait la voie vers les bâtiments à énergie positive, bâtiments qui produisent plus qu'ils ne consomment [1].

Cette vision prospective passe rapidement à la réalité puisque les premiers bâtiments à énergie positive sont construits dans les années qui suivent [2] et qu'en 2009 la loi grenelle 1 indique que d'ici 2020 tous les bâtiments devront être à énergie positive [3].

Les défis à relever pour passer des passoires thermiques qui sont nombreuses aujourd'hui à ces bâtiments à énergie positive sont nombreux. Le PREBAT mène en 2009 une analyse des besoins de recherche nécessaires pour aller vers l'énergie positive.

Cette analyse se traduit par une représentation selon huit grands défis représentés sur la marguerite suivante.



Trois ans après cette analyse, l'objet de cet article est de passer en revue cette analyse pour la décliner en défis spécifiques à la filière électrique.

## 2. Où passe l'énergie dans les bâtiments ?

Le tableau 1 présente quelques ordres de grandeur des consommations et des productions d'énergie primaire correspondant aux différents éléments du bilan d'un bâtiment dit à énergie positive. Toutes les consommations sont exprimées en kWh d'énergie primaire par m<sup>2</sup> et par an.

Consommations immobilières: chauffage, ECS, refroidissement, ventilation, auxiliaires et éclairage)	50 dans les logements neufs, 240 dans les bâtiments existants, jusqu'à 500 dans une passoire thermique.
Consommation mobilières : électroménager, audiovisuel, informatique, communication	Logement : de l'ordre de 60 Tertiaire : 30 (projets de pointe) à plus de 300 (bâtiments de forte densité sans attention particulière).
Energie grise (énergie utilisée pour construire le bâtiment)	De 20 (maison individuelle optimisée) à 80 (tour)
Transport des utilisateurs	De 10 (utilisateurs se déplaçant à courte distance en transport en commun) à plus de 200 (utilisateurs venant de loin en voiture).
Production photovoltaïque	De 30 (immeuble de 10 étages avec toits et murs PV) à 100 (maison sur 2 niveaux avec toit PV) ou à 200 (maison sur un niveau avec toiture 1 pente totalement PV).

**Tableau 1 :** Ordre de grandeur des consommations et production en kWh d'énergie primaire par m<sup>2</sup> et par an

Les consommations d'énergie pour construire le bâtiment ont été ramenées à une valeur annuelle en supposant une durée de vie de 50 ans pour le bâtiment.

Ces chiffres sont repris sur la figure 1.

On constate que l'on a quatre groupes de consommations : consommations immobilières, consommations mobilières, énergie grise et transport des utilisateurs dont les ordres de grandeur sont comparables et sur lesquels il faudra agir pour maîtriser la demande.

On constate également que la production locale d'énergie par le photovoltaïque reste marginale par rapport aux consommations dans les cas où aucun effort n'est fait, mais peut compenser la totalité des consommations dans les cas les plus favorables conduisant ainsi à des bâtiments qui produisent plus qu'ils ne consomment, les bâtiments à énergie positive.

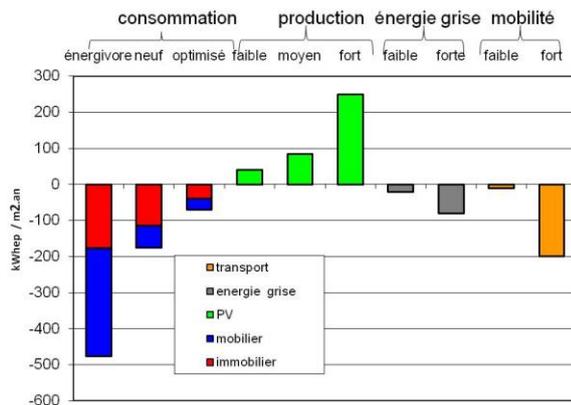


Figure 1 : ordre de grandeur des consommations et productions

### 3. Les défis pour la filière électrique

#### 3.1. Maîtriser les consommations mobilières

Les équipements mobiliers sont ceux rapportés par les occupants lorsqu'ils utilisent le bâtiment. Ils intègrent notamment les équipements électroménagers, audiovisuels, informatiques et de communication. Alors que la consommation pour les usages immobiliers sont en décroissance du fait des rénovations thermiques et du renforcement des réglementations thermiques pour les bâtiments neufs les consommations mobilières sont en croissance forte. Les progrès techniques pour aller vers des équipements moins énergivores sont en effet très nettement compensés par la multiplication des appareils.

La première action consiste d'abord à rendre les produits plus économes en électricité. L'étiquette énergie (figure 2) qui est obligatoire sur un nombre croissant de produits oriente le choix du client final et donc conduit les industriels à orienter leur capacité d'innovation sur ce sujet.

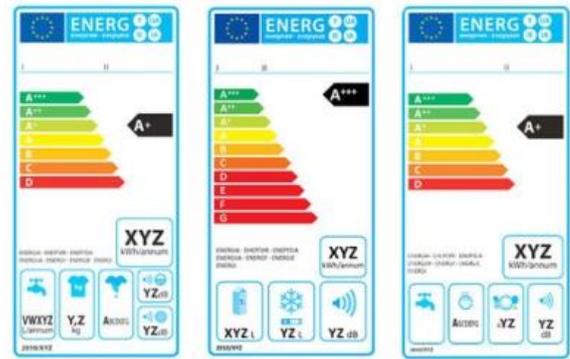


Figure 2 : étiquettes énergies

Il est nécessaire d'intégrer cette préoccupation d'économie d'énergie dès l'émergence d'une nouvelle famille de produits. Nous sommes en effet face à des produits qui se renouvellent très rapidement et sur lequel les règles ne suivent qu'avec retard. Un exemple est celui de l'informatique dans lequel les consommations d'énergie des pc sont restées très élevées jusqu'à ce que le souhait de disposer de portables à autonomie élevée conduise à orienter la recherche sur la réduction des consommations. Ceci conduit aujourd'hui les promoteurs de bâtiments à énergie positive à recommander l'utilisation d'ordinateurs portables en lieu et place des ordinateurs de bureau beaucoup moins économes.

Cette prise en compte des consommations immobilières dans la définition des projets de construction est en train de devenir un standard dans les projets. Bien sûr lors de la phase d'exploitation mais également lors de la phase amont de conception. Le plus exigeant des labels énergétiques français le label effinergie + rend ainsi obligatoire cette évaluation pour tous les bâtiments souhaitant obtenir le label [5].

#### 3.2. Maîtriser les consommations immobilières

Ces consommations servent à chauffer, rafraîchir et éclairer les locaux, produire de l'eau chaude sanitaire, faire circuler l'air et l'eau... Elles sont très fortement influencées par les choix faits lors de la construction ou de la réhabilitation des bâtiments. Ces choix ont des impacts pendant des durées longues. La réduction de ces consommations passe d'abord par une conception bioclimatique qui permet la réduction des besoins : isolation des bâtiments, architecture favorisant l'éclairage naturel, protections solaires pour éviter la climatisation....

Les travaux visent également à introduire des systèmes performants à la place des systèmes actuels. Cela vise par exemple à substituer les systèmes classiques de chauffage par des pompes à chaleur pour le chauffage des locaux ou l'eau chaude sanitaire, à remplacer l'éclairage incandescent ou fluo par de l'éclairage à led régulé automatiquement, à échanger les

moteurs de pompes ou de ventilateurs peu efficaces par des moteurs à haute efficacité bien régulés.

Les recherches intègrent le développement de systèmes multifonctionnels associant par exemple chauffage, ventilation, production d'eau chaude sanitaire ou production combinée de chaud de froid et d'électricité dans des systèmes de cogénération. Cette intégration permet d'augmenter fortement le rendement thermodynamique global en valorisant les pertes de chaleur aujourd'hui inutilisées.

Les dispositifs de régulation gestion devront permettre à la fois de réguler chauffage, ventilation, éclairage, climatisation, pompes et ventilateurs en fonction des besoins devenus très faibles mais aussi d'utiliser prioritairement les systèmes utilisant les énergies renouvelables par rapport aux appoints utilisant de l'énergie fossile.

### 3.3. Exploiter les énergies renouvelables

Quatre sources principales d'énergies renouvelables peuvent être collectées directement sur le site :

- le solaire pour le chauffage de l'eau chaude sanitaire, la climatisation et la production d'électricité,
- le vent pour la ventilation naturelle, la climatisation et la production d'électricité,
- l'air extérieur pour le chauffage et la climatisation, soit par usage direct, soit via des pompes à chaleur,
- l'énergie du sol pour le chauffage et la climatisation, soit par usage direct (puits climatiques), soit via des pompes à chaleur.

Les travaux porteront notamment sur :

- l'efficacité et la réduction des coûts des systèmes de production,
- leur intégration technique et architecturale dans l'enveloppe du bâtiment,
- les systèmes de stockage de chaleur et d'électricité,
- les outils de gestion du paquet «génération, stockage, utilisation» permettant d'utiliser en priorité les énergies renouvelables,
- les outils permettant de dimensionner et de calculer la production renouvelable utile,
- les méthodes permettant de garantir la production effective de l'énergie renouvelable en intégrant très fortement des mesures de terrain.

Le rôle de la filière électrique est ici essentiel. A la fois pour la définition des dispositifs de production, et pour les dispositifs de gestion. Une des difficultés est d'arriver à faire coopérer les acteurs de la filière électrique et les acteurs de la filière bâtiment. L'intégration des panneaux photovoltaïques en toiture montre chaque jour que cette coopération est capitale pour aboutir à de bonnes performances.

### 3.4. Faciliter les comportements responsables

Les consommations effectives des bâtiments sont extrêmement sensibles à leur usage. Pour la filière électrique deux points paraissent incontournables.

Concevoir des systèmes simples à installer, à maintenir et à utiliser. C'est le garant de l'efficacité réelle sur le terrain. Nombre de systèmes performants sur le papier s'avèrent décevants sur le terrain du fait de la difficulté à comprendre comment les installer ou les utiliser.

Fournir des outils d'information aux occupants et aux gestionnaires des bâtiments leur permettant à la fois de visualiser l'impact de leurs actions sur les consommations et de suivre celles-ci.

Progresser sur ces deux points nécessitera des travaux de recherche expérimentaux permettant de bien comprendre comment les utilisateurs s'approprient les systèmes mis à leur disposition pour arriver à des systèmes adaptés aux différents types d'utilisateurs.

### 3.5. Maîtriser les impacts liés à la construction des bâtiments

Le développement d'une nouvelle génération de labels de Haute Qualité Environnementale illustrée par le projet HQE performance [6] et l'élargissement des paramètres pris en compte dans les labels de performance énergétique va conduire progressivement à diffuser les analyses en cycle de vie au niveau des bâtiments. Ceci doit conduire la filière à produire systématiquement des informations environnementales sur tous les produits qui seront utilisés dans le bâtiment afin que les acteurs qui conçoivent ceux-ci puissent choisir les produits sur des bases objectives. Celles-ci seront diffusées sous la forme standardisée que sont les profils environnementaux produits (PEP) qui devraient être prochainement disponibles sur la base INIES ([www.inies.fr](http://www.inies.fr)).

### 3.6. Apporter un environnement confortable et sûr

La filière électrique peut de toute évidence contribuer aux progrès en matière de confort dans les locaux.

Mais la modification profonde des installations électriques qui émerge avec les bâtiments producteurs et stockeurs d'électricité entraîne dès aujourd'hui des questions nouvelles en matière de sécurité électrique, de risque incendie ou d'explosion.

L'appréhension de ces difficultés sera nécessaire pour éviter un frein au développement de ces technologies dans le bâtiment.

### 3.7. Assurer une bonne intégration architecturale et urbaine

En 2009 on identifiait que la généralisation des bâtiments à énergie positive pouvait poser des problèmes liés à l'intégration dans la ville. « Un des enjeux sera de réussir à faire émerger des solutions tirant parti des différents contextes urbains en évitant la standardisation des formes, des couleurs, des textures que pourrait entraîner une approche purement technique. La difficulté sera de pouvoir associer les deux volontés parfois contradictoires de généralisation des bâtiments à énergie positive et de la diversité architecturale ».

Si ce point reste très fortement d'actualité il est complété par le point clé qui est aujourd'hui illustré par la problématique des smart grids. La généralisation de ces bâtiments producteurs conduisant à repenser l'architecture générale des réseaux de distribution électrique et de leur gestion.

### 3.8. Maîtriser l'énergie nécessaire pour le transport des utilisateurs

Le développement de véhicules électriques dont le rechargement pourrait être effectué par l'installation photovoltaïque du logement ou du bureau ouvre de nouveaux potentiels dont l'exploration débute seulement et qui pourraient conduire à des visions nouvelles de ce que sont les consommations rattachées au bâtiment.

## 4. Conclusions

La multiplicité des défis à relever pour passer des passoires thermiques aux bâtiments à énergie positive et le rôle que peut y jouer la filière électrique offrent des possibilités d'investissements passionnants pour les acteurs intéressés par la recherche et le développement dans ce domaine.

## 5. Références

- [1] Alain Maugard, Jean-Christophe Visier et Daniel Quénard, « Le bâtiment à énergie positive », *Futuribles*, numéro 304, janvier 2005  
<http://dx.doi.org/10.1051/futur:200530439>
- [2] « Tour Elithis, bâtiment tertiaire à énergie positive, les grands principes »  
<http://www.tour-elithis.fr/grands-principes-tour-elithis.php>
- [3] Loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement  
<http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000020949548>
- [4] JC Visier et al., « Vers des bâtiments à énergie positive. Proposition de structuration des actions de recherche » Prebat, juin 2009,  
[http://www.cstb.fr/fileadmin/documents/webzines/2009-09/BEPOS/Batiments\\_a\\_energie\\_positive\\_prebat\\_juin\\_2009\\_09\\_007\\_AT.pdf](http://www.cstb.fr/fileadmin/documents/webzines/2009-09/BEPOS/Batiments_a_energie_positive_prebat_juin_2009_09_007_AT.pdf)
- [5] Label Effinergie +  
<http://www.effinergie.org/index.php/actualite/1048-le-label-effinergie>
- [6] Alexandra Lebert et al, Evaluation de la performance environnementale des bâtiments. Définition d'ordres de grandeur. Traitement statistique du test HQE Performance 2011  
<http://assohqe.org/hqe/spip.php?article23>

## Le Confort dans le bâtiment : n'oublions pas l'habitant !

**Françoise THELLIER\*, Françoise MONCHOUX, Jean-Pierre BEDRUNE**

Université Toulouse 3 - Paul Sabatier Laboratoire PHASE - EA 3028 - Physique de l'Homme Appliquée à Son Environnement Bat. 3 R1 B2 - 118, route de Narbonne - 31062 TOULOUSE Cedex 9 - FRANCE

\*Tel : (33) (0)561.55.64.79 francoise.thellier@univ-tlse3.fr <http://phase.ups-tlse.fr/>

**Résumé :** Les crises de l'énergie successives ont conduit à des dispositions et des réglementations destinées à réduire les consommations. Leurs efficacités ont été démontrées et l'effort se poursuit régulièrement. Cela donne des bâtiments thermiquement très isolés, et théoriquement peu consommateurs. On constate toutefois que les bâtiments habités normalement présentent des performances dégradées par rapport aux prévisions. Le travail présenté ici décrit les phénomènes et les outils mis en œuvre pour caractériser le couplage entre l'habitant et le bâtiment et pour la prise en compte du ressenti humain. On amorce la réflexion quant au rôle que les disciplines de l'EEA pourraient jouer dans cet enjeu : procurer le confort à l'habitant tout en limitant les consommations énergétiques.

### I INTRODUCTION

Depuis la nuit des temps, l'être humain n'a eu de cesse de développer des stratégies et des techniques pour se protéger des agressions climatiques. L'Habitat et la Thermique sont les plus anciennes préoccupations de l'Homme, sa première grande découverte, « le feu » en est la preuve. Depuis toujours, l'amélioration de la qualité de vie a été le moteur essentiel d'une partie des grandes découvertes.

L'être humain est un homéotherme, c'est-à-dire que pour assurer ses fonctions vitales, il doit maintenir sa température interne à  $(37,0 \pm 0,5)$  °C sur une planète dont la température peut varier globalement de -50 à +50 °C.

L'homme produit de la chaleur interne suite aux réactions chimiques de transformation des aliments. C'est ce qu'on nomme le métabolisme, qui dépend entre autre de l'activité physique. Cette chaleur doit être évacuée dans l'environnement afin de maintenir l'équilibre thermique et donc la température interne constante [1].

Pour un homme nu au repos la « température idéale » à proximité de la peau est aux alentours de 29°C. Par conséquent, il a développé divers niveaux de protection successifs pour maintenir cette température quelles que soient les conditions climatiques terrestres. Tout d'abord, il possède un système de thermorégulation physiologique très performant. Ensuite, la première couche de protection est le vêtement, et la deuxième l'habitat. En fonction des besoins et des conditions

climatiques, il doit réguler ces systèmes de protection. L'imbrication des divers niveaux de régulation est donc la condition de sa survie.

Le maintien de conditions « idéales » dans les bâtiments est très consommatrice d'énergie, ce qui est à l'origine d'une forte pollution [2]. Il est alors évident que pour réduire les consommations et les coûts il faut impérativement optimiser le système ce qui passe, entre autres exigences contradictoires, par une régulation qui minimise l'énergie utilisée tout en procurant des conditions de confort maximales. La crise de l'énergie et l'obligation de réduire rapidement les émissions de gaz à effet de serre, imposent que toutes les compétences soient réunies pour répondre à ces exigences.

En fait il faut voir les choses différemment. C'est l'habitant qui est très consommateur d'énergie, via les systèmes qu'il a développés pour répondre à ses exigences de qualité de vie. De même, l'augmentation de la pollution et la disparition des combustibles fossiles ne mettent que très peu en danger la planète, mais elles compromettent la survie de l'homme dans les conditions qu'il connaît actuellement. C'est donc avec une vision anthropo-centrée qu'il faut amorcer la réflexion et tout particulièrement dans le domaine des sciences pour l'ingénieur [3].

Actuellement les problèmes énergétiques sont au devant de la scène, mais malheureusement on oublie trop souvent que l'objectif premier de tout habitat est de répondre aux besoins de l'habitant ! La tendance est souvent de croire qu'il suffit de diminuer les températures de consigne pour diminuer la facture

énergétique, mais cette solution n'est pas acceptée, car l'homme est hédoniste et cherche tout d'abord à maintenir ses conditions de vie préférées. Sur le terrain, on constate alors que le plus souvent, les thermostats sont réglés à 21°C alors que la réglementation les prévoit à 19°C.

L'Homme et l'Habitat sont deux systèmes thermiques complexes présentant quelques similarités. Dans un premier temps nous ferons une présentation simplifiée de leur bilan thermique et de leurs modes de régulation respectifs, avant d'aborder les interactions entre les deux.

## II BILANS THERMIQUES : HOMME ET HABITAT :

Le bilan thermique d'un système s'écrit selon l'équation suivante (1). Elle régit l'évolution de sa température au cours du temps.

$$C \times \frac{dT}{dt} = Prod + \Phi_{in} - \Phi_{out} \quad (1)$$

- $C$  Capacité thermique totale ( $J/^\circ C$ )
- $T$  Température moyenne du système ( $^\circ C$ )
- $t$  temps ( $s$ )
- $Prod$  Puissance produite ( $W$ )
- $\Phi$  Flux de chaleur échangé ( $W$ )  
in = entrant ; out = sortant

### A. Thermique du Corps humain

Pour rester en vie, l'Homme doit maintenir sa température centrale assez stable et autour de 37°C, pour cela il doit maintenir un bilan thermique équilibré (fig.1).

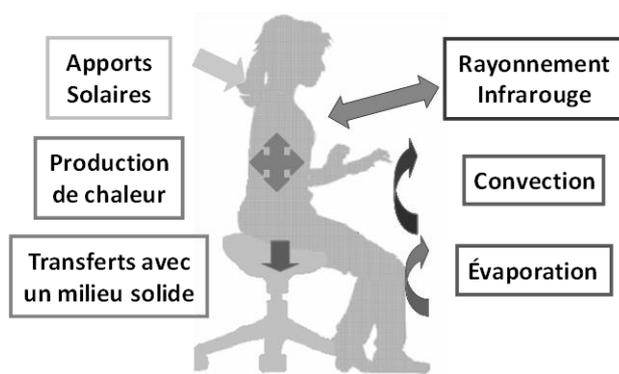


Figure. 1 : Transferts thermiques du corps humain

- **La puissance produite** (ou métabolisme,  $M$ , ou thermogénèse), dépend surtout de l'activité et peut varier de 70 à 900 W pour un adulte. Ce métabolisme peut également varier en fonction du système de régulation. Une partie de cette énergie, produite au centre du corps et dans les muscles, peut être transformée en travail mécanique ( $W$ ). Le reste ou métabolisme net ( $M_{net} =$

$M - W$ ), doit être évacué sous forme de chaleur. Les transferts du centre vers la périphérie du corps se font par conduction à travers les tissus biologiques et par convection sanguine qui est régulée.

- **Les transferts thermiques** (ou thermolyse), entre le corps et l'environnement, se font par tous les mécanismes classiques de transferts, au niveau cutané et par les voies respiratoires [9, 12]. Les échanges notés \* sont le plus souvent des pertes, mais peuvent devenir des apports en ambiance chaude.

- Rayonnement Solaire ( $Ray_{sol}$ ).
- Evaporation ( $Evap$ ) cutanée\* et respiratoire.
- Convection ( $Conv$ ) cutanée \* et respiratoire.
- Rayonnement Infra rouge ( $Ray_{IR}$ )\*.
- Conduction avec un milieu solide ( $Kond$ )\*.

- **Bilan thermique global du corps Humain**

$$C_h \frac{dT_h}{dt} = M_{net} + Ray_{sol} - Evap \pm Conv \pm Ray_{IR} \pm Kond \quad (2)$$

Tous les transferts avec l'ambiance dépendent des variables physiques de l'ambiance : températures ( $T_{air}$ ) et vitesses ( $V_{air}$ ) d'air, températures des surfaces ( $T_{surf}$ ), pression de vapeur ( $P_{v,air}$ ) et rayonnement solaire.

Ces échanges dépendent aussi des données physiques de l'individu, essentiellement de surface, Température ( $T_{sk}$ ) et mouillure ( $\omega_{sk}$ ) de la peau. Ils peuvent largement être modifiés par de la présence éventuelle de vêtements.

Pour garder un bilan thermique (2) équilibré, c'est-à-dire, ( $dT_h/dt$ ) proche de 0, le corps humain dispose de réactions de thermorégulation, qui vont moduler les différents termes du bilan.

### B. Thermique de l'habitat

L'objectif premier de l'habitat est de maintenir, autour de l'homme, un climat intérieur propice à ses activités. Il peut donc être variable en fonction des besoins humains. Les échanges au sein du bâtiment se font par tous les modes de transferts thermiques (Fig.2).

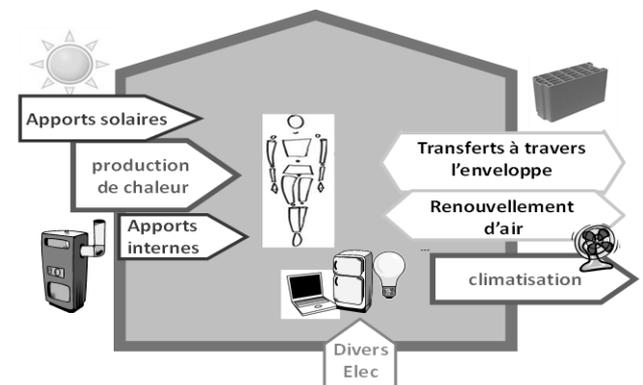


Figure. 2 : Transferts énergétiques dans l'habitat

• **La puissance produite** est composée de 2 parts distinctes :

- Les apports internes, liés au dégagement de chaleur interne (Pint) : êtres humains, éclairage, électroménager, informatique, etc. Ils sont variables et incontrôlés.
- La production des systèmes de génie climatique (Pgc), régulée en fonction des besoins. Elle est positive pour le chauffage (Pcha) et négative en cas de climatisation (Pcli).

• **Les transferts** de masse et de chaleur avec l'environnement sont liés à plusieurs phénomènes. Ils sont fonction des conditions météorologiques : températures (Text) et vitesses (Vext) d'air, pression de vapeur (Pv,ext) et rayonnement solaire. Les échanges notés \* sont des gains ou des pertes selon le cas.

- Transferts à travers l'enveloppe ( $\Phi_{env}$ )\* : mur, fenêtre, toiture, etc.
- Transferts aérauliques liés au renouvellement d'air ( $\Phi_{air}$ )\* : infiltration, ventilation, etc.
- Apports solaires à travers les vitrages ( $\Phi_{sol}$ ).

Les échanges dépendent évidemment de la forme du bâtiment, de sa situation géographique, de son orientation, etc.

• Bilan thermique global d'un habitat/ bâtiment

$$C_b \frac{dT_b}{dt} = Pint \pm Pgc + \Phi_{sol} \pm \Phi_{env} \pm \Phi_{air} \quad (3)$$

Pour garder un bilan thermique équilibré, c'est-à-dire ( $dT_b/dt$ ) proche de 0, la régulation du bâtiment module Pgc. En fonction du type de construction et du climat, les grandeurs physiques intérieures ;  $T_{air}$ ,  $V_{air}$ ,  $T_{surf}$ , etc. seront très différentes d'un bâtiment à l'autre, et variables au cours du temps.

### III SYSTÈMES DE RÉGULATION HOMME ET HABITAT

Tous les phénomènes de transferts sont variables dans le temps, mais aussi dans l'espace, puisqu'un bâtiment est rarement isotherme. Il en est de même pour le corps humain dont la température de peau peut varier entre 20 à 37°C d'un endroit à l'autre. Dans les deux cas ils sont très dépendants du système de régulation en température et donc des consignes, qui peuvent être globales et/ou locales.

#### A. Régulation du corps humain

S'il y a un déséquilibre de la balance thermique, le corps réagit grâce à la thermorégulation physiologique qui est complexe et pilotée par le système nerveux central. On a l'habitude de représenter son fonctionnement de façon très simplifiée en 3 étapes :

1. les thermorécepteurs périphériques et centraux envoient au cerveau des informations qui dépendent de l'état thermique du corps,
2. ces informations sont comparées à des valeurs de consigne, puis intégrées,
3. le système central détermine la commande générale et envoie des informations aux différents effecteurs. Des effets locaux supplémentaires peuvent également se produire.

o Si la température du corps est trop haute ;

- la vasodilatation augmente le diamètre des vaisseaux sanguins, pour accélérer les échanges de chaleur interne du centre vers la périphérie.
- la transpiration produit de l'eau à la surface cutanée, pour augmenter les pertes par évaporation (Evap).

o Si la température du corps est trop basse ;

- la vasoconstriction en réduisant le diamètre des vaisseaux sanguins, minimise les échanges de chaleur interne du centre vers la périphérie,
- les frissons augmentent la production de chaleur (M) surtout dans les muscles.

Ces réactions sont limitées dans leur efficacité et surtout dans leur durée. La régulation humaine ne fait pas de compromis, son but est de conserver à température constante les organes vitaux (cerveau, cœur, reins,...), ce qui peut se faire au détriment des organes périphériques (mains, pieds,...). Si la contrainte thermique est forte, les réactions physiologiques ne sont plus suffisantes pour maintenir l'équilibre thermique et c'est la mort à plus ou moins court terme, par hypo ou hyper thermie. Par ailleurs, des réactions de fortes amplitudes sont perçues comme désagréables.

On définit alors une zone de neutralité thermique ou thermo-neutralité physiologique où le bilan thermique est proche de l'équilibre avec des réactions physiologiques minimales.

#### B. Régulation de l'habitat

Bien évidemment les bâtiments actuels sont munis de systèmes de régulation plus ou moins perfectionnés, dont le but est de maintenir la température intérieure et l'hygrométrie égales à la consigne fixée en modulant uniquement la puissance (Pgc) des appareils de génie climatique. On peut schématiser de façon grossière les systèmes « classiques » en 3 étapes :

1. la/les sondes de températures envoient des informations au central de commande.
2. le central de commande compare l'information pour déterminer si la consigne est atteinte ou non.

3. le système central envoie une commande aux appareils de génie climatique. De plus, des systèmes locaux peuvent moduler la commande générale.

Actuellement, les grands bâtiments sont tous munis d'une Gestion Technique Centralisée (GTC), qui peut réguler plus finement par zones thermiques. Mais les maisons individuelles n'ont souvent qu'un système général, avec une faible modulation au niveau des émetteurs.

Pour décrire les actions, il faut alors se mettre dans deux configurations extrêmes :

- o Si la température intérieure ( $T_{int}$ ) est inférieure à la température de consigne, l'ordre va être donné d'augmenter la production de chaleur (P<sub>chauf</sub>).
- o Dans le cas inverse si  $T_{int}$  est trop élevée, l'ordre va être donné de mettre en marche la climatisation (P<sub>clim</sub>). C'est le cas en été lorsque les apports sont importants et que de la chaleur entre également par l'enveloppe. En fait, si le bâtiment est bien conçu, cette situation sur une longue période est rarement indispensable sous nos latitudes, sauf en cas de canicule.

Il faut noter que, pour maintenir l'équilibre thermique, les consommations d'énergie liées au chauffage et à la climatisation sont coûteuses et polluantes. Il va donc falloir les réduire le plus possible.

**C. Commentaire**

Si on compare ces deux systèmes, la régulation de l'être humain est actuellement beaucoup plus précise que celle du bâtiment. D'une part, la température de consigne pour les organes vitaux est de  $(37.0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$  et n'admet aucune dérive. D'autre part, le système intégrateur prend en compte les températures de la périphérie qui servent de « barrière de protection » du noyau. Il faut aussi noter que le nombre de thermorécepteurs cutanés est très grand, de 1 à 20 /cm<sup>2</sup> selon la zone corporelle, et qu'ils sont sensibles à la température et à sa vitesse de variation. Dans le meilleur des cas pour un bâtiment, il y a une sonde de température par pièce.

Autre point : la régulation physiologique est permanente et proportionnelle aux besoins, alors que celle du bâtiment est le plus souvent en tout ou rien, et peut éventuellement être déconnectée pour laisser le bâtiment en évolution libre aux intersaisons. C'est alors la période où des zones froides et d'autres en surchauffe peuvent coexister.

**IV ENERGÉTIQUE DES BÂTIMENTS OCCUPÉS**

Depuis la prise de conscience des problèmes énergétiques suite au premier choc pétrolier apparu à la fin des années 70, des réglementations successives ont été mises en place pour réduire les consommations de chauffage, comme on peut le voir sur la fig. 3.

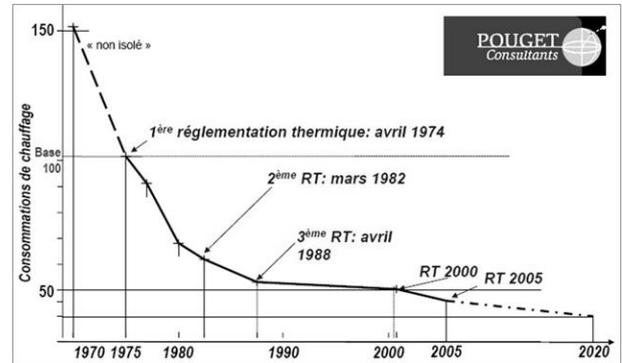


Figure 3 : Évolution de la consommation de chauffage au cours du temps

Les premières étapes avaient pour objectif principal d'améliorer l'enveloppe, puis la ventilation. Avec la Réglementation Thermique du début des années 2000 (RT2000) renforcée par la RT2005, on a eu une approche plus globale du bâtiment en jouant sur tous ses aspects, et la baisse enregistrée des consommations a été notable.

Allant plus loin, on s'intéresse maintenant à l'énergie primaire totale consommée et équivalent pétrole pour pouvoir additionner tous les usages. Il faut alors prendre en compte les consommations d'électricité spécifiques : éclairage, électro-ménager, informatique, etc. Ces consommations sont croissantes et prennent une part de plus en plus forte, surtout dans le bilan énergétique des bâtiments à faible besoin de chauffage (Fig.4).

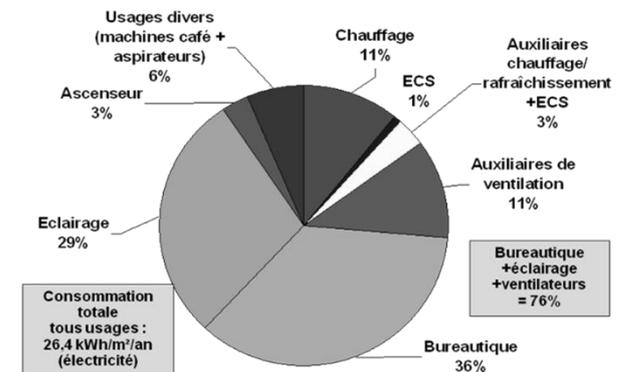


Figure 4 : Répartition des consommations énergétiques dans un immeuble de bureaux à énergie positive [11]

D'autre part, tout système qui consomme de l'électricité produit toujours de la chaleur qui doit être prise en compte dans les apports internes, ce qui peut générer des surchauffes dans les bâtiments

thermiquement très isolés où les problèmes d'inconfort d'été deviennent de plus en plus fréquents.

Actuellement pour passer à un bâtiment « zéro énergie » il faut réellement optimiser l'ensemble du bâtiment et de ses équipements. On se rend également compte que l'être humain joue un rôle qui devient totalement prépondérant alors qu'il a été jusqu'ici plutôt négligé. Cet objectif ne sera réellement obtenu que si la présence humaine, son ressenti, et les actions qui en résultent sont prises en considération.

On arrive donc tout naturellement à la conclusion que pour que les prédictions de consommation énergétique soient fiables, ils doivent impérativement avoir une approche multi-physiques et multi-échelles, mais également intégrer de plus en plus les usages et les usagers.

La difficulté de l'approche du système complet est en partie liée à des temps caractéristiques très différents pour chaque phénomène :

- Pour l'éclairage (naturel et artificiel) et l'électricité, le temps est bien inférieur à la seconde,
- Pour l'être humain le "temps physiologique" va de quelques minutes à quelques heures, par contre son comportement est instantané, mais son acclimatation est optimale au bout de 15 jours,
- Pour le bâtiment dans son ensemble, le temps caractéristique va de l'heure à plusieurs jours. Mais certains phénomènes aérodynamiques peuvent être beaucoup plus rapides.

Si de plus on prend en compte d'autres éléments, la réflexion devient encore plus complexe ; la durée de vie d'un bâtiment est d'environ 50 ans, le milieu professionnel s'approprie lentement les nouvelles technologies, et pour les usagers, les modifications d'habitudes sociologiques et donc d'acceptabilité sont également très lentes.

Dans nos sociétés occidentales, l'homme passe la majeure partie de sa vie à l'intérieur d'un habitat (bâtiment, voiture, transport en commun, ...). Les études concernant l'habitat se sont considérablement affinées depuis quelques années et ont permis d'améliorer de façon sensible l'habitabilité, pour un coût d'utilisation constant. Cet effet se traduit par la nécessité de prendre en compte des variables de complexité croissante. Il ne s'agit plus de décrire une ambiance uniquement par ses caractéristiques physiques, mais par les impacts que celles-ci ont sur l'habitant.

L'analyse des ambiances physiques et la conception architecturale doivent mieux intégrer les techniques nouvelles de la construction et rapprocher les personnes

travaillant sur l'habitat, dans le domaine des sciences pour l'ingénieur, et sur l'habitant dans le domaine des sciences de l'homme et de la société.

## V COUPLAGE DE L'HOMME ET DE L'HABITAT

En fait depuis longtemps, l'utilisateur est pris en compte de façon sous-jacente : dans le domaine du génie climatique, ce que l'on nomme hiver correspond à la période où il faut chauffer un bâtiment, pour maintenir une température acceptable pour un homme chaudement vêtu, c'est-à-dire entre 19 et 21°C. L'été est à l'inverse défini comme étant la période où il faut rafraîchir pour maintenir des conditions optimales pour un homme légèrement vêtu c'est-à-dire entre 25 et 28°C.

### A. Le système global

Pour réellement prendre les usagers en compte, il faut avoir une approche du système dans son ensemble pour étudier les couplages forts (fig. 5) qui ont une importance croissante.

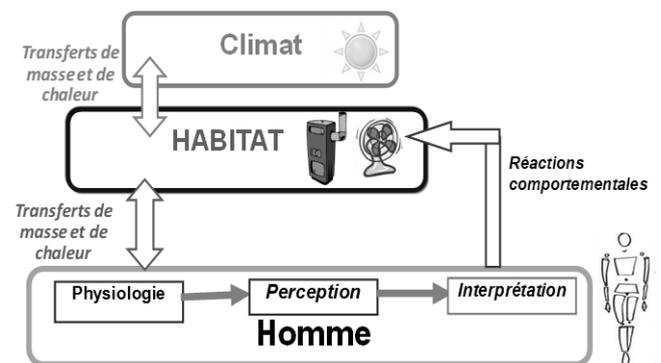


Figure 5 : Schématisation du couplage entre l'homme et l'habitat

### B. Evaluation des ambiances

Les transferts thermiques entre l'Homme et l'habitat, mais également l'activité de l'homme et ses vêtements vont entraîner un certain état thermo-physiologique du corps, qui va être perçu puis interprété (fig.5). A ce stade, la personne est consciente de son ressenti. Elle dispose de plusieurs échelles de description :

- *Le jugement thermo-sensoriel* est tout jugement porté par un individu sur son état thermique, il peut être perceptif, évaluatif, préférentiel, ... Il s'exprime selon plusieurs échelles adaptées.

- *La sensation thermique*, est un jugement perceptif, c'est une notion assez objective. Elle est liée aux températures ( $T_{sk}$ ) et mouillure ( $\omega_{sk}$ ) de peau en grande partie, mais aussi à la perception des réactions physiologiques. Elle est le plus souvent exprimée sur une échelle bipolaire en termes allant de « très froid » à « très chaud ». La sensation globale « ni chaud ni froid

» ou neutre ou encore thermo-neutralité sensorielle n'est possible que dans la zone de neutralité physiologique.

- *Le confort thermique* est un jugement évaluatif. L'ASHRAE (association internationale de génie climatique) donne comme définition : "*l'état d'esprit où l'homme exprime la satisfaction des conditions thermiques*" [11]. La déclaration de confort comporte une composante psycho-socio-affective qui est subjective et dépend des préférences de chaque individu. Il s'exprime sur une échelle unipolaire allant de « *confortable* » à « *très inconfortable* ».

Entre la sensation et le confort, il existe un lien qu'il est impossible de représenter sous forme d'équation, car ce passage fait appel à des processus encore inconnus. D'après toutes les études, même si les conditions de thermoneutralité sont à peu près les mêmes pour tous les individus, et peuvent être calculées, les conditions préférées ou de 'confort' sont très différentes selon les habitudes de chacun, la culture, les situations et les attentes personnelles.

Ces définitions sont importantes, car de fait il n'existe pas de méthode de calcul du « confort thermique ». Dans ce domaine, il est posé comme hypothèse forte que dans la majeure partie des cas, le confort peut n'être atteint que pour une perception presque neutre (ni chaud – ni froid). Donc pour maintenir ce jugement pour un individu standard, ou bien pour une majorité de personnes, on détermine les conditions ambiantes qui vont minimiser les réactions physiologiques. Les indices de « confort » sont basés sur ce principe.

De fait, la réalité est plus complexe car l'être humain, après avoir interprété son état thermique, va se déclarer ou non en situation de confort et "*si un changement a lieu produisant un inconfort, les gens réagissent de façon à rétablir leur confort*". Ce concept est à la base de la démarche adaptative et comportementale.

### C. Action-commande de l'homme

La *thermo-régulation* comportementale est déclenchée consciemment par l'être humain en fonction de ses préférences personnelles. Il modifie, soit le climat, soit directement les échanges, ce qui a pour conséquence directe de modifier son bilan thermique (fig.5). Ces comportements sont de deux types :

- régulation individuelle : ce sera un changement de posture (modification de la surface d'échange), de vêtements (modification de la résistance aux transferts thermiques), ou d'activité (augmentation de la production de chaleur), ...
- régulation collective ou technique, par la création ou la modification de l'environnement artificielle pour recréer un

micro climat plus acceptable : ouverture/fermeture des fenêtres, modification de la température de consigne, ...

Les réactions comportementales dépendent des opportunités (par exemple, si on peut ou non modifier la consigne), et sont limitées par les contraintes (par exemple la possibilité de changer de tenue vestimentaire). Les opportunités et les contraintes peuvent être techniques, sociales ou affectives. Elles dépendent également des attentes, c'est ce qui fait que l'habitat personnel sera géré d'une façon très différente des espaces de travail. L'un des autres facteurs qui influencent le comportement est l'impact financier d'une décision.

A ce stade on peut aussi souligner que la thermo-régulation physiologique est inconsciente et a pour but le maintien de l'homéothermie, alors que les réactions comportementales sont conscientes et guidées par des choix hédoniques. Ces deux modes de régulation peuvent avoir lieu simultanément, mais aussi être antagonistes.

Malgré tout, des conditions moyennes produisant un confort thermique global peuvent induire des problèmes locaux. On parle alors d'inconfort local, car le plus souvent c'est en ces termes que l'individu s'exprime, par exemple : "*je me sens globalement bien, mais j'ai un peu froid aux pieds*". L'inconfort local peut avoir diverses origines :

- un environnement thermique local particulier entraînant des flux locaux très différents : courant d'air, soleil, sol froid, asymétries de température de parois,
- des réactions physiologiques ; par exemple, si l'individu a légèrement froid, sans même qu'il en ait conscience, il peut y avoir un début de vasoconstriction qui diminue le flux sanguin et donc l'apport de chaleur dans les extrémités. Il se plaint d'avoir froid aux pieds ou aux mains, mais la cause principale de ce phénomène peut être ailleurs.

Il arrive bien souvent qu'un inconfort local soit dû aux deux causes simultanément. Mais selon les cas les solutions pour remédier aux problèmes sont totalement différentes. A contrario un phénomène local n'entraîne pas forcément les mêmes effets ; un individu qui a chaud appréciera un courant d'air local, mais s'il a froid, il ne supporte plus ce même courant d'air. Les inconforts locaux peuvent engendrer des problèmes qui dépassent une simple gêne, il faut donc avoir des méthodes performantes d'analyse, de prédiction et finalement de régulation.

On voit que la régulation comportementale lie encore plus étroitement l'homme et son habitat. Par exemple,

pour qu'un système de chauffage soit jugé « confortable » par un individu, il faut qu'il lui procure non pas la thermo-neutralité mais ses conditions thermiques préférées, globales et locales, ce qui est beaucoup plus délicat à obtenir. Il faut que de surcroît le système de chauffage lui-même soit accepté d'un point de vue symbolique et esthétique. Si toutes ces conditions ne sont pas réunies, l'être humain peut alors faire une mauvaise utilisation ou dégrader les systèmes mis à sa disposition. Il en résulte invariablement un surcoût énergétique et financier. On peut rapidement en conclure, qu'il est totalement vain de vouloir déterminer et calculer le "confort thermique universel" mais qu'il faut développer des techniques pour que chaque individu puisse réguler son espace comme il le souhaite sans générer des surconsommations d'énergie.

## VI RÉGULATION DU SYSTÈME HABITAT HABITANT

La régulation de l'ensemble doit donc être vue comme un tout où les éléments sont liés, comme le montre la fig.6.

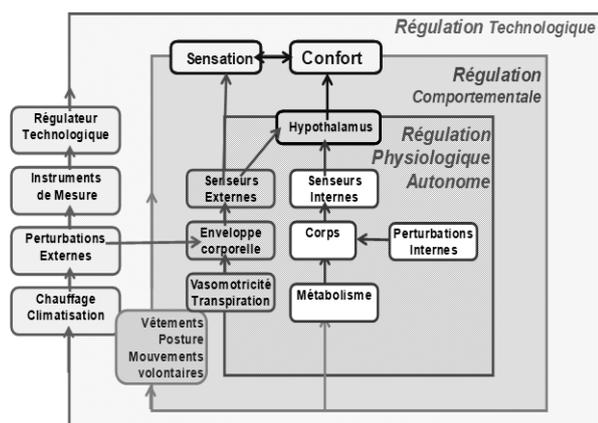


Figure 6 : Les différents niveaux de régulation de l'homme dans l'habitat

Un courant de recherches, nommé « démarche adaptative » a prouvé que si l'être humain a des moyens d'actions sur l'ambiance intérieure [7], il est plus tolérant. La fig. 7 donne la température de confort en fonction du climat extérieur.

On constate que pour des bâtiments naturellement ventilés, l'Homme accepte des températures intérieures bien plus élevées en été car il peut agir sur le bâtiment, ouverture des fenêtres par exemple, et rester en contact avec le milieu extérieur.

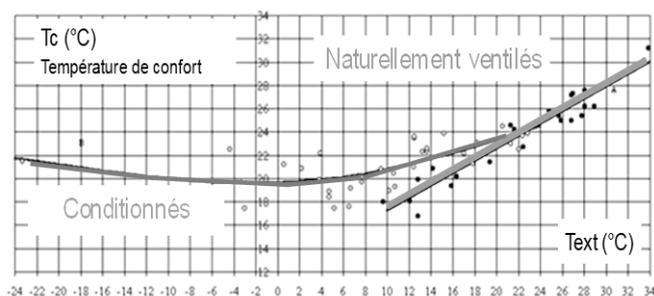


Figure 7 : Température de confort en fonction de la température moyenne courante extérieure [4].

Avec les progrès de l'électronique, de l'automatique et de l'informatique, on est en capacité d'avoir plusieurs niveaux de régulation des équipements techniques, qui doivent répondre aux exigences des utilisateurs. Des systèmes performants ont été développés dans le domaine des transports (voitures, avions, ..). Ils permettent de créer des conditions thermiques qui conviennent globalement à toutes les personnes présentes, et offrent de surcroît des moyens pour personnaliser l'environnement proche. Ceci peut être appliqué dans le domaine du bâtiment [10], des systèmes techniques commencent à se développer pour créer des « bulles de confort » qui sont alors beaucoup moins consommatrices d'énergie, plutôt que de conditionner un bâtiment entier. Ces systèmes ont en plus l'avantage de pouvoir répondre aux souhaits personnels pour arriver à un confort individuel optimal.

## VII MODÉLISATION DU SYSTÈME

Pour prévoir le comportement thermique dynamique des bâtiments, de nombreux outils numériques ont été développés, la plupart dans les années 80. On cherchait alors seulement à prédire et à comprendre l'évolution d'un système. Actuellement, on se retrouve confronté à plusieurs difficultés. Bien que ces logiciels aient emmagasiné énormément de connaissance, ils sont souvent centrés sur une seule discipline, et le couplage multi-physique est problématique. Comme on l'a souligné, les temps caractéristiques des phénomènes sont différents. Par exemple les logiciels de thermique du bâtiment ont un pas de temps de calcul de l'ordre de l'heure pour pouvoir faire une simulation sur toute l'année sans nécessiter des temps de calcul prohibitifs. La modélisation de l'humain impose un pas de temps beaucoup plus faible, et en contrôle-commande les temps sont inférieurs à la seconde. Comment alors prendre en compte les actions possibles de l'homme sur le bâtiment?

Il faut bien souligner que des problématiques nouvelles sont apparues très récemment avec les objectifs de baisse des consommations énergétiques globales. Par exemple, si les usagers ouvrent les fenêtres 2 fois par jour, l'impact relatif qui était faible dans une "passoire énergétique", peut atteindre 20% de surconsommation dans un Bâtiment Basse Consommation (BBC).

Les résultats obtenus par les logiciels de thermique du bâtiment sont souvent loin des résultats mesurés sur le terrain. Pour des bâtiments à faibles besoins énergétiques, on peut constater en moyenne des écarts de consommation d'un facteur 2, et pouvant aller jusqu'à un facteur 8. En fait les simulations supposent une utilisation « idéale » mais de fait, les bâtiments sont inoccupés.

Dans la nouvelle RT2012, la démarche adaptative commence à apparaître et les températures intérieures doivent se situer dans la zone de Brager, issue de la démarche adaptative, comme le montre la fig. 8. Ce qui, là encore, ne signifie pas que tout le monde acceptera les situations thermiques prévues par le calcul.

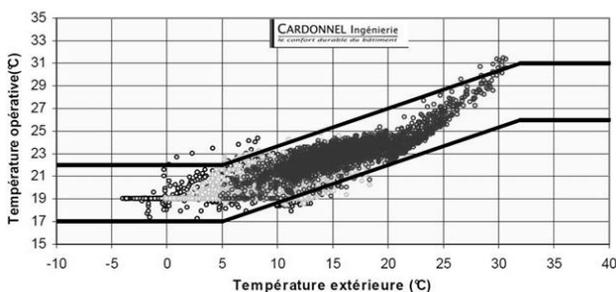


Figure 8 : températures issues de simulation comparées à la zone de Brager (en trait plein)

Les modélisations en cours introduisent maintenant un comportement supposé de l'habitant. Il peut ; se (dé)vêtir, modifier son activité ou la ventilation, actionner des systèmes de chauffage locaux, etc... [5,12]. On s'approche d'un comportement réel. Du travail reste encore à faire d'une part dans la compréhension de ce qui déclenche tel ou tel type de comportement, et d'autre part sur les systèmes de régulation à mettre à sa disposition.

## VIII PERSPECTIVES

Pour réguler les ambiances au plus près des exigences de l'habitant tout en veillant à minimiser les consommations énergétiques, il devient nécessaire d'agir conjointement sur plusieurs équipements et d'étudier simultanément "les confort des ambiances" ; thermique, éclairage, acoustique, qualité de l'air [8].

Outre la régulation du système de chauffage ou de climatisation, il faut adapter le débit de ventilation au nombre d'occupants, piloter l'éclairage en fonction de

l'éclairage naturel et de la présence d'occupants, la mise en service, le réglage des protections solaires, etc. La régulation de ces équipements, dont la fonction est d'améliorer le confort chacun dans tous les domaines, aura une influence en retour sur les températures du bâtiment. Ces dernières devront donc être régulées de manière plus fine et surtout plus réactive dans le temps.

Il est fréquent que les scénarios de régulation imaginés par les concepteurs des systèmes produisent des effets mal acceptés par les habitants. Une période de réglage et d'adaptation, bien que rarement planifiée par la Maîtrise d'Ouvrage, s'avère désormais indispensable durant l'année qui suit la construction d'un bâtiment.

Cependant comme il est écrit ci-avant, les conditions préférées de confort varient selon les individus ; il sera donc difficile d'adapter la régulation des systèmes pour des conditions idéales pour tous, ainsi qu'en témoigne l'échec du « tout domotique » constaté ces dernières années. L'automate parfait n'existant pas dans ce domaine, une possibilité de reprise en main des réglages par l'habitant est indispensable. Si le surcoût du doublage des commandes des systèmes (automatisme + humain), en termes de linéaires de fils électriques, s'est avéré souvent prohibitif, des solutions existent aujourd'hui pour le réduire : commandes sans fil ou courant porteur. Il convient donc de réaliser des dispositifs de dialogue avec le système de régulation, ou interfaces, les mieux adaptés. Cependant, comme le montre Meier [6], l'ergonomie des organes de réglages confiés à la charge des habitants doit être étudiée avec soin. En effet, les thermostats programmables de première génération sont bien plus utilisés que leurs homologues hi-tech. La combinaison avec les automatismes requiert de plus des dispositifs de gestion de priorités, de temporisation... autant de notions dont l'acceptabilité par l'habitant est complexe à faire passer.

La nouvelle réglementation considère que les usagers ne peuvent pas ouvrir les fenêtres en hiver, pourtant on sait pertinemment que ce ne sera pas accepté ; il est alors plus judicieux de prévoir un système, contact sur les feuillures, par exemple, qui coupe le chauffage en cas d'ouverture des fenêtres. Si la technologie semble au point, le défi à relever pour une bonne intégration de la régulation des systèmes habitat-habitant dans les bâtiments modernes nécessite des recherches approfondies dans le domaine des sciences humaines.

## IX CONCLUSIONS

La consommation énergétique dans les bâtiments est le résultat de l'imbrication des deux systèmes thermiques que sont l'habitat et l'habitant. Si le premier est considéré comme bien cerné, le second fait encore montre de nombreuses inconnues, tant par son comportement que par le jugement qu'il porte sur son environnement.

On peut penser (et espérer !) que le développement de systèmes économes, informés par des capteurs performants, et s'appuyant sur des modèles plus complets, permettra d'éviter les gaspillages et d'offrir à l'homme une ambiance qu'il appréciera. Toutefois, il faudra refuser le « tout automatique » et laisser leur part à la liberté et la fantaisie.

## REFERENCES

- [1] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (2009). ASHRAE Handbook. Fundamentals. Chapter 9.
- [2] De Herde, A., Liébard A. (2005). *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique: concevoir, édifier et aménager*. Éditions Le Moniteur.
- [3] Duffaure-Gallais I. (2011) Et si on s'intéressait aux usagers des bâtiments ? <http://www.lemoniteur.fr>
- [4] Humphreys, M.A., Hancock, M. (2007). Do people like to feel, neutral ? Exploring the variation of the desired thermal sensation on the ASHRAE scale. *Energy and Buildings*, vol 39: 867-874.
- [5] Lavoye F., Thellier F., Spagnol S., Lartigue B. (2008). Perception de la qualité des ambiances intérieures soumises à des transferts thermo-aérauliques. Conférence IBPSA, Lyon.
- [6] Meier A., Aragon C., Hurwitz B., Mujumdar B., Peffer T., Pritoni M. (2010). How People Actually Use Thermostats. ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings 2-19.
- [7] Nicol, J.F., Humphreys, M.A. (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings*, vol 34: 563-572.
- [8] Norme NF-EN-15251 (2007). Critères d'ambiance intérieure pour la conception et évaluation de la performance énergétique des bâtiments, couvrant la qualité de l'air intérieur, la thermique, l'éclairage et l'acoustique. Eds. AFNOR.
- [9] Parsons K.C. (1993). *Human Thermal Environments. The effects of hot, moderate and cold environment on human health*. Eds. Taylor & Francis, London.
- [10] Quintela D., Gaspar A., Raimundo A., (2000) Development of local heating systems for thermal comfort and energy savings in buildings. International Conference UIE 2000, Electricity for a Sustainable Urban Development, Lisbon, Portugal.
- [11] Sidler O. (2011). Les bâtiments à énergie positive : déjà une réalité. <http://www.enertech.fr/>
- [12] Thellier F. (1999). *L'homme et son environnement Thermique. Modélisation*. Mémoire d'Habilitation à Diriger des recherches Toulouse. <http://phase.ups-tlse.fr/>

# Causes de pertes dans le calcul des performances des systèmes photovoltaïques connectés au réseau

Franck BARRUEL et al.

CEA-INES Institut National de l'Énergie Solaire, Laboratoire des Systèmes Solaires. Savoie Technolac  
73370 Le Bourget du Lac  
franck.barruel@cea.fr

**Résumé :** Cet article dresse un état des lieux des causes de pertes et d'incertitudes dans les systèmes photovoltaïques (PV) connectés au réseau, intégrés ou non aux bâtiments. Elles sont catégorisées en trois familles. Tout d'abord, les pertes liées aux propriétés intrinsèques des composants d'un système PV. Ensuite les pertes engendrées par la phase de conception d'une centrale PV. Enfin les pertes qui sont causées lors de l'exploitation. À chaque fois une comparaison est faite sur la possibilité de tenir compte de ces pertes dans les outils de simulation actuels.

## 1. Introduction

Depuis 2006, le marché français du photovoltaïque (PV) a décollé grâce aux aides de l'état sous forme de crédit d'impôt et de tarifs d'achat préférentiels pour la revente d'électricité issue du PV. Il existe aujourd'hui plus de 200 000 installations de moins de 3 kWc, 20 000 entre 3 et 500 kWc et 230 de plus de 500 kWc [1]. Le marché s'est principalement segmenté autour des différents tarifs d'achat qui diffèrent en fonction du type d'installation (au sol, intégration simplifiée, intégration complète...). Les tarifs pour un système intégré sont 2 à 3 fois plus avantageux économiquement qu'un système au sol et expliquent le grand nombre de petites installations.

Le tarif d'achat reste le même quel que soit le lieu géographique, en revanche les performances diffèrent. Il est évident que le niveau d'ensoleillement n'est pas le même à Lille qu'à Marseille et qu'à puissance égale, l'énergie produite sera plus importante au Sud qu'au Nord. L'inclinaison et l'orientation sont aussi des paramètres de base du calcul de performance. Cependant, nous allons voir dans cet article que d'autres paramètres influencent sur les performances et qu'il est difficile de garantir précisément une production annuelle (et donc un taux de retour sur investissement) à moins de prendre une grande marge de sécurité.

Après un rapide chapitre sur les notions de performances d'un système photovoltaïque et les outils de simulation, on détaillera en trois grandes familles les causes des pertes et d'incertitudes. Tout d'abord, les incertitudes liées à la mesure d'irradiation et les pertes liées aux propriétés intrinsèques des panneaux et des onduleurs seront abordées. Ensuite, nous détaillerons les pertes liées à la phase de conception d'une centrale, tels que l'ombrage, le mismatch ou l'intégration au bâti.

Enfin, nous présenterons les pertes liées à l'exploitation de la centrale, typiquement la salissure et les pannes.

## 2. Performances d'un système pv et outils de simulation

### 2.1. Conditions standards de test et indicateurs

Dans le domaine du PV il faut utiliser la notion de *watt crête* (Wc) ou *watt peak* (Wp) en anglais. Cette unité correspond à la puissance que peut fournir une cellule ou un module dans des conditions standards de test (STC) qui sont :

- 1000 W/m<sup>2</sup> d'irradiation solaire
- 25°C pour la température de la cellule
- AM 1,5 ; Air Masse correspondante au spectre solaire perçu via un angle de 48° par rapport au zénith du soleil.

Chaque module passe un flash test en fin de production à l'aide d'une sollicitation impulsionnelle à 1000W/m<sup>2</sup> pour caractériser en conditions STC le courant de court-circuit (Isc), le courant nominal (Imp), la tension de circuit ouvert (Voc), la tension de nominale (Vmpp) et enfin la puissance nominale (Pmpp). Donc lorsqu'un module affiche une puissance au flash test de 200 Wc et un rendement de 14 %, il s'agit des performances en conditions STC, qui permettent de le comparer aux concurrents. Dans nos zones géographiques, il faut savoir que ces conditions correspondent à moins de 1% du temps de vie du module (en conditions réelles, à 1000W/m<sup>2</sup> la température du module est rarement de 25°C).

La performance d'un système PV est donnée par deux indicateurs principaux :

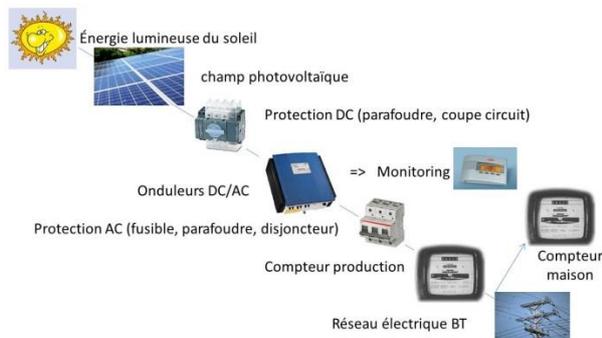
- **Le productible** ou yield (journalier, mensuel, annuel...) défini par le rapport entre l'énergie produite par la centrale en kWh ( $E_{reel\_pv}$ ) sur la puissance nominale ( $P_{stc\_pv}$ ) de la centrale PV en conditions STC (soit des kWh/kWc, que l'on peut traduire par des heures équivalentes à pleine puissance).

$$Yield = E_{reel\_pv} / P_{stc\_pv}$$

- **L'indice de performance ou performance ratio**, est le rapport entre l'énergie réelle produite et l'énergie théoriquement produite dans les conditions STC, d'implantation et d'irradiation du site. Sa valeur est généralement comprise entre 0,75 et 0,90.

$$Pr = E_{reel\_pv} / E_{th\_pv\_stc}$$

D'où viennent les pertes, comment sont-elles générées, comment améliorer le Pr ? Toutes ces questions sont évidemment le quotidien des exploitants, bureaux d'études et chercheurs du domaine du photovoltaïque puisqu'elles traduisent directement une optimisation du retour sur investissement. Un système PV est une association de plusieurs composants schématisés par la figure 1. Du soleil au compteur EDF se succèdent les modules, les diodes, les connecteurs, les câbles, les parafoudres, les disjoncteurs, l'onduleur et de nouveau les parafoudres et les disjoncteurs. Sans oublier les éléments extérieurs comme le bâti, les capteurs de mesure ou encore le réseau. Au final, autant d'éléments qui sont sources de pertes et d'incertitudes.

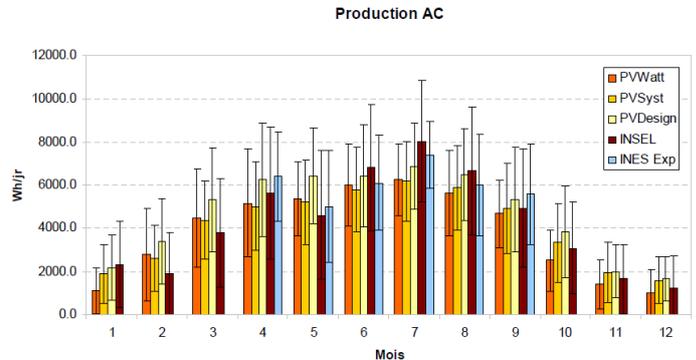


**Fig.1 :** Éléments constituant un système PV

## 2.2. Les outils de simulation

Pour estimer le potentiel d'un projet photovoltaïque, les spécialistes utilisent des outils de simulation tels que PVSyst, PVWatt, PVDesign ou encore INSEL. Certains intègrent une bibliothèque de modules PV et d'onduleurs ou permettent de paramétrer ses propres modèles en fonction des caractéristiques constructeurs. Les données météorologiques sont issues de bases spécialisées de type Meteonorm, la NASA ou PVGIS. La figure 2 montre une comparaison des résultats de simulation de plusieurs logiciels avec un système réel à l'INES (1,5 kWc de type polycristallin). Les traits

verticaux montrent les écarts min et max par mois. Le constat est qu'aucun ne donne la valeur juste mais que tous sont dans une fourchette comprise entre 5 et 20% de la réalité (avec parfois des erreurs plus importantes). Il est primordial pour des investisseurs de réduire ce manque de précision.



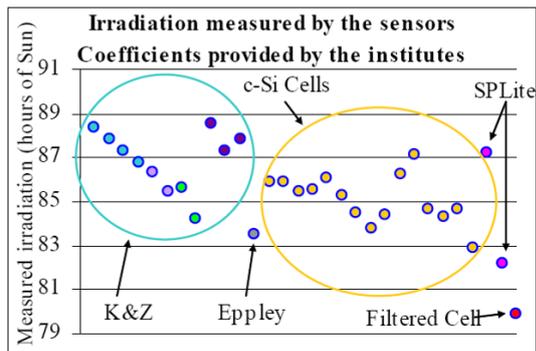
**Fig. 2.** Comparaison du productible annuel simulé avec plusieurs logiciels et comparé avec le système réel.

Il n'est pas question ici de faire une critique des outils de simulation qui sont d'ailleurs de plus en plus performants mais bien de montrer toute la difficulté de garantir, à priori, des performances, en plus sur une durée de 20 ans. Voyons quelles sont les raisons d'une telle difficulté.

## 3. Pertes liées aux propriétés intrinsèques des composants

### 3.1. Soleil, dis-moi combien tu brilles ?

La donnée de base pour le calcul de performance d'un système PV est évidemment la mesure d'irradiation en  $W/m^2$ . De nombreux sites internet donnent la valeur intégrée par jour/semaine/mois/année et par zone géographique. Cependant, pour une mesure précise du Pr il faut instrumenter localement l'installation. Deux principales familles de capteurs existent pour mesurer l'irradiation : les pyranomètres et les cellules de référence. Les premiers mesurent l'irradiation globale sur une large longueur d'onde alors que les seconds mesurent uniquement l'irradiation dans le spectre de la technologie utilisée (ex : poly ou mono cristallin). Lors d'un projet européen regroupant plusieurs laboratoires [2], une expérience a été faite au CEA de Cadarache avec, sur un même châssis, dans exactement les mêmes conditions, plusieurs capteurs précédemment cités mesurant l'irradiation du site. L'ensemble de ces matériels ont été préalablement étalonnés par chaque laboratoire. La figure 3 montre le nombre d'heures cumulées issues des capteurs sur la période de test considérée. On aperçoit un écart qui atteint 4 % pour des capteurs d'une même technologie (K&Z) et jusqu'à 7% entre un pyranomètre K&Z et une cellule de référence c-Si ou un autre pyranomètre (SP-Lite).



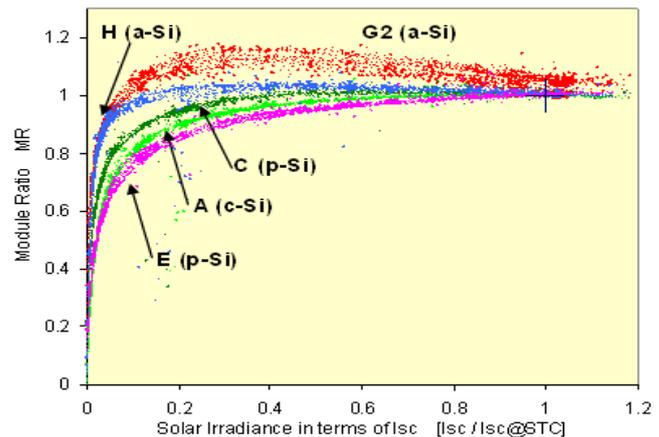
**Fig. 3.** Heures équivalentes de soleil cumulées mesurées par plusieurs capteurs. K&Z= pyranomètres. c-Si= cellule de référence. SP-Lite pyranomètre de K&Z mais de technologie différente

Cet écart se traduira directement par 4 à 7 % de différence sur le Pr entre deux systèmes identiques instrumentés avec des capteurs différents.

### 3.2. Module dis-moi quelle est ta puissance ?

Autre élément clé dans l'estimation des performances, le module PV est de loin le composant du système qui génère le plus d'incertitudes. Aujourd'hui les datasheets constructeurs donnent la puissance crête avec une précision comprise entre 0 et 5 % et le rendement du module en conditions STC et NOCT (800 W/m<sup>2</sup>, vent d'1m/s). Cependant, très peu donnent le rendement à plusieurs irradiations. Or celui-ci n'est pas constant.

Dans la même approche que l'étude des capteurs d'irradiation, un banc de test a été développé à l'INES où plusieurs modules sont caractérisés en extérieur dans les mêmes conditions (orientation, inclinaison etc...). La figure 4 montre le rendement de chaque module normalisé à 1 (pour les intercomparer) en fonction du rapport  $I_{sc}/I_{scSTC}$  qui est une image de l'éclairement intégrant la réponse spectrale de chaque module [3]. La croix bleue de coordonnées [1,1] correspond aux conditions STC (dit autrement aux Wc vendues). On voit que le rendement n'est pas constant et qu'il diffère en fonction des technologies. Sur une même courbe ; il peut chuter de 20% pour des irradiations inférieures à 200W/m<sup>2</sup>. Certains logiciels cités tiennent compte de la courbe de rendement. Cependant, ils considèrent une seule courbe par technologie, or on voit pour une même technologie, mais de marques différentes, que la courbe n'est pas la même (p-Si violet et p-Si vert foncé). L'écart dans cet exemple est environ de 10% à 200W/m<sup>2</sup> et de 7% à 400W/m<sup>2</sup> pour deux technologies identiques. On peut noter au passage qu'à faible irradiation, le silicium amorphe (a-Si) possède de meilleures performances que les technologies p-Si.



**Fig. 4.** Performance de plusieurs technologies de modules en fonction de l'irradiation (représentée par le courant de court-circuit  $I_{cc}$  ramené à 25°C

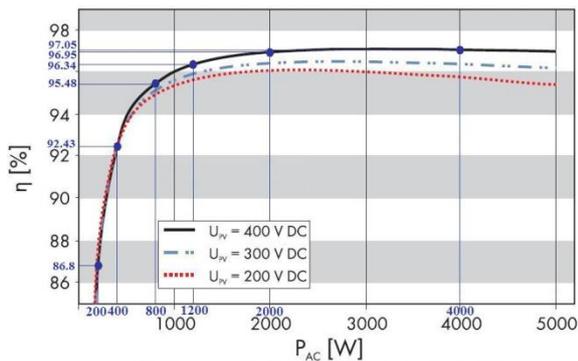
### 3.3. Onduleur dis-moi quel est ton rendement ?

#### Rendement statique de conversion

Les fabricants d'onduleurs PV ont rapidement été contraints d'afficher le rendement max de l'onduleur et le rendement européen [4, 6]. Cette notion de rendement européen est une pondération sur plusieurs points de la courbe (à 5, 10, 20, 30, 50 et 100% de  $P_{nom}$ ), correspondant à la distribution moyenne d'ensoleillement en Europe. Il existe également un rendement Californien. Le calcul est donné par la formule suivante :

$$\eta_{\text{euro}} = 0.03 \times \eta_5 \% + 0.06 \times \eta_{10} \% + 0.13 \times \eta_{20} \% + 0.10 \times \eta_{30} \% + 0.48 \times \eta_{50} \% + 0.20 \times \eta_{100} \%$$

La figure 5 montre les courbes de rendement d'un onduleur de 4 kW pour trois niveaux de tension DC. Le rendement max est de 97,05% et le rendement européen de 96,2% pour une tension de 400V. Il est intéressant de voir que le rendement n'est pas le même en fonction de la tension. Et qu'ici il faut privilégier une tension élevée. Ce n'est pas le cas de tous les onduleurs et dépend directement de la topologie du convertisseur. Comme les courbes sont connues, les outils de simulation intègrent ces données. Cependant, il n'y a pas d'études qui montrent la variation de la courbe de rendement en fonction de la température. Or en conditions réelles, notamment pour les systèmes intégrés aux bâtis, les onduleurs sont rarement dans un endroit ventilé. Prochainement des tests seront menés à l'INES en enceinte climatique afin de quantifier les pertes de rendement liées à la température.

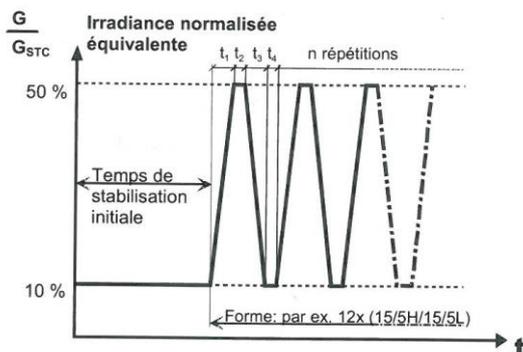


**Fig. 5.** Courbes de rendement d'un onduleur de 4 kW en fonction de la puissance AC

### Rendement dynamique du MPPT

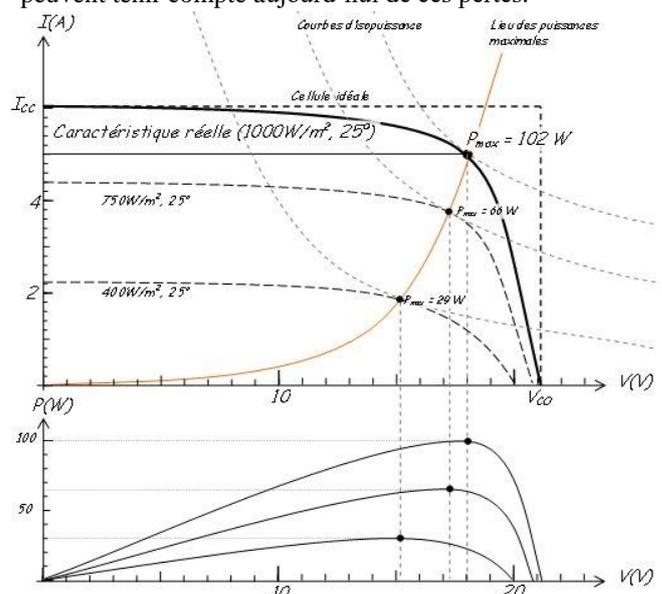
Il faut rappeler qu'un panneau solaire est caractérisé par des courbes courant/tension et puissance/tension à plusieurs niveaux d'irradiation (Fig 7). Le point de puissance maximale évolue donc en permanence dans la journée. Pour garantir le bon positionnement sur la courbe, les onduleurs possèdent un algorithme de tracking (Maximum Power Point Tracking). Dans la littérature il existe une multitude d'algorithmes de MPPT, tous annonçant être meilleurs que les autres [7]. Afin d'évaluer le rendement du MPPT, les tests types de PHOTON Magazine [5] correspondent à faire un échelon en puissance à l'entrée de l'onduleur avec un simulateur de module PV puis à mesurer la réponse finale à l'échelon. Si on garde l'exemple de la figure 7 on aurait un simulateur de courbe I/V qui passerait de 400 W/m<sup>2</sup> à 750 W/m<sup>2</sup> ou de 750 W/m<sup>2</sup> à 1000 W/m<sup>2</sup> et calculerait si le MPPT s'est bien calé sur le lieu des puissances maximales (sans limite de temps). Dans ces conditions statiques, la valeur est toujours très proche de 99,9% pour tous les onduleurs du commerce.

Depuis juillet 2010 une nouvelle norme européenne (EN 50530) impose de calculer le rendement dynamique du MPPT sur plusieurs séquences d'essais. Sans les détailler, elles consistent à faire un grand nombre de fois une succession de rampes à vitesse variable (de 7 s et 30 s) pour plusieurs niveaux d'irradiations. La figure suivante montre une des séquences de 10% à 50% d'irradiation. Le calcul du rendement énergétique se fait sur le cycle complet.



**Fig. 6.** Séquence d'essai pour les petites et moyennes intensités de rayonnement, norme EN 50530

Pour l'instant aucuns constructeurs n'annoncent sa valeur (car la norme est récente ?). Nous avons commencé des tests à l'INES qui montrent que le rendement n'est plus de 99,9%. L'onduleur testé avait un rendement de 93% sur cycle normalisé contre 99,9% en statique. D'autres études confirment ces différences [8]. Le rendement global réel d'un onduleur est donc le produit entre le rendement statique de conversion et le rendement dynamique du MPPT. On comprend logiquement pourquoi les outils de simulation ne peuvent tenir compte aujourd'hui de ces pertes.



**Fig. 7 :** Caractéristiques courant/tension et puissance/tension d'un panneau solaire. Évolution en fonction de l'irradiation.

## 4. Pertes liées à la phase de conception de la centrale

Nous venons de voir les pertes liées aux propriétés de certains composants d'un système PV, mais il en existe d'autres, notamment celles liées à l'étape de mise en œuvre de la centrale qu'elle soit sur le toit du bâti ou au sol.

### 4.1. Système, vois-tu des ombres ?

Il n'est pas rare, pour ne pas dire courant, de voir des installations PV intégrées au bâti qui sont partiellement ombragées à un moment de la journée. Cheminée, antenne, arbre, acrotère, garde-corps...les obstacles ne manquent pas. Dès 2007, le Laboratoire des Systèmes Solaires a mené des campagnes de test pour quantifier l'impact de l'ombrage sur les performances d'un système PV. Sans reprendre l'ensemble des résultats que l'on retrouve dans [9], la figure 8 montre un cas d'école. Elle illustre la production de deux champs PV de 1500 Wc chacun, exactement dans les mêmes conditions. Un

piquet de 2 m de haut a été planté devant l'un des deux champs (Fig 8 & 9).



Fig. 8. Photo du piquet devant le champ PV.

De 8h à 13h l'ombre du piquet est projetée sur le champ PV puis, au passage à l'ouest du soleil, l'ombre se projette hors du champ PV. La perte ainsi occasionnée par le piquet est représentée par courbe verte, différence de la courbe rouge (sans ombrage) et bleue (avec ombrage), soit 7% d'énergie en moins pour un simple piquet... Bien évidemment on ne peut pas conclure que la perte annuelle est de 7% puisque l'ombre varie dans l'année mais on voit clairement que l'impact ne sera pas négligeable.

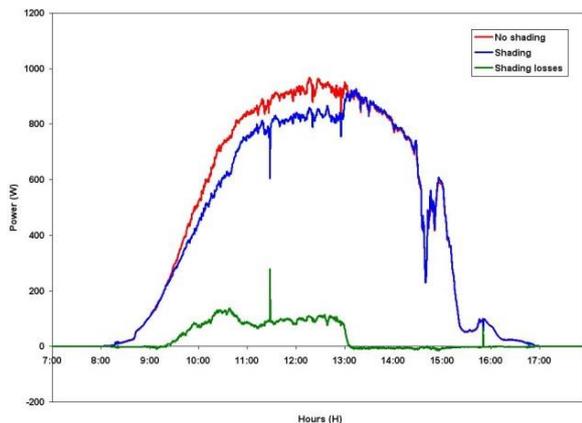


Fig. 9. Puissance produite par deux champs PV dont un avec un piquet devant.

Certains outils de simulation comme PVSys tiennent compte de l'ombrage. Il faut dessiner les masques solaires proches et lointains autour la centrale puis le logiciel calcul les pertes par ombrage suivant deux hypothèses. La première est conservatrice et suppose que le module perd toute sa production dès qu'il voit une ombre. La seconde est optimiste, puisqu'elle considère que seule la surface ombrée ne produit plus. Or, avec la présence de diodes de bypass toutes les 18 cellules dans un module et avec des diodes de blocage en tête de rangée, la réalité se situe entre les deux.

#### 4.2. Système, dis-moi si tu chauffes ?

Les contraintes thermiques influencent significativement les performances du module PV.

Logiquement, les performances des panneaux baissent quand la température augmente. Par transparence, les constructeurs fournissent les coefficients de pertes en courant, tension et puissance par degré Celsius. Le Tableau 1 synthétise les coefficients par technologie et la dernière colonne donne un exemple de pertes pour une température de module de 65°C (soit autour de 35°C ambiant). Les variations ne sont pas négligeables puisqu'elles sont comprises entre 7 et 15 % selon la technologie. Autrement dit, le mode d'intégration des modules PV au bâti joue un rôle important. Dans la continuité des expériences précédemment cités, le Laboratoire Énergétique du Bâtiment du CEA/INES a mis en place des bancs BIPV (Building Integration PhotoVoltaic) dans le cadre du projet ANR Habisol « Performance BIPV ». Chaque banc représente un toit de maison avec un mode d'intégration différent et des technologies PV différentes (Fig 10).



Fig. 10. Photo des bancs BIPV au CEA/INES, Le Bourget du Lac

La figure suivante illustre le performance ratio de 6 bancs BIPV où l'on voit clairement une baisse en fonction de la température prise sous les modules, et donc en fonction du mode d'intégration et de ventilation. Les bancs A, B, et D sont des systèmes en intégration simplifiée alors que les bancs C, E et F en intégration complète avec une fine lame d'air sous les modules. Le constant est net, il peut y avoir près de 10% d'écart.

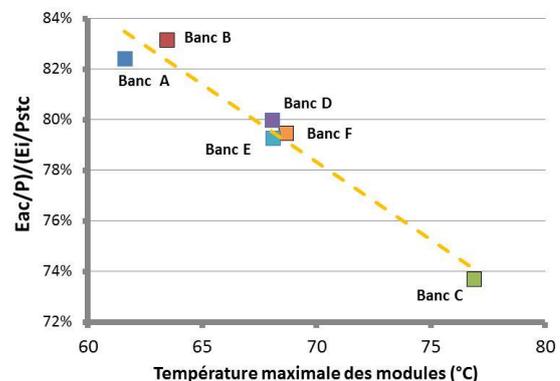


Fig. 11. Performance ratio de chaque banc en fonction de la température des modules.

Le logiciel PVSys propose 3 modes de ventilations différents. Cela a le mérite d'exister mais on comprend facilement qu'en fonction du kit d'intégration et du

savoir-faire de l'installateur, les modules PV peuvent être différemment ventilés et ne pas produire la même énergie annuelle.

Technologie	Coeff. $T^{\circ} I_{sc}$ (%/°C)	Coeff. $T^{\circ} V_{oc}$ (%/°C)	Coeff. $T^{\circ} P_{max}$ (%/°C)	Exemple perte $P_{max}$ si $T^{\circ} mod = 65^{\circ}C$ (%)
Polycristallin	+0.028	-0.37	-0.43	-14.7
a-Si simple jonction	+0.1	-0.3	-0.25	-9.1
a-Si triple jonction	+0.1	-0.38	-0.21	-7.7
CdTe	+0.04	-0.25	-0.25	-9.1
CIS	+0.05	-0.29	-0.36	-12.6

**Tableau 1.** Coefficients de pertes de puissance par technologie

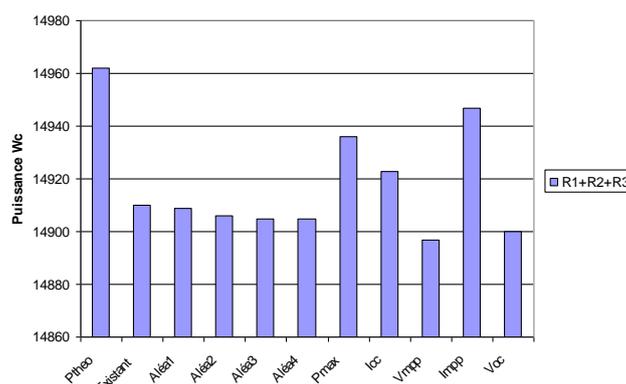
#### 4.3. Champ PV, es-tu homogène ?

Une question s'est toujours posée dans le domaine du photovoltaïque ; faut-il trier les modules avant de les installer pour optimiser les performances [10,11,12,13] ? Comme les modules sont assimilables à des sources de courant et qu'ils sont connectés en série/parallèle, le plus faible impose sa valeur aux autres et diminue le rendement global. Dans les années 80/90, les modules étaient garantis à +/- 10% de leur puissance, voire plus. Aujourd'hui la tolérance est bien plus faible, notamment pour les technologies polycristallines où les constructeurs garantissent la puissance à 0/+3%. Le gain a été apporté par des techniques de tri évoluées, faites en usine sur chaque cellule. Les pertes par appariement (ou mismatch) semblent donc de plus en plus réduites au fur et à mesure que les technologies sont matures.

L'INES possède une centrale de 120 kWc sur 3 bâtiments. Les modules sont des PW1400 de chez Photowatt. Pour chaque module nous avons obtenu le flash test ( $I_{sc}$ ,  $I_{mpp}$ ,  $V_{oc}$ ,  $V_{mpp}$  et  $P_{mpp}$ ) qui montrait un écart type de moins de 3 Wc. Après l'installation, nous avons créé un outil de simulation avec Matlab pour quantifier l'intérêt ou non de trier les modules (*a posteriori* !). Nous avons intégré chaque courbe I/V de chaque module dans l'outil et simulé une partie de la centrale soit 3 châssis de 5 kWc composés chacun de 33 modules (au total 99 modules et 15 kWc). Grâce à la simulation, plusieurs techniques de tri ont pu être testées. La figure 12 reporte les résultats. En théorie la puissance idéale est de 14961 Wc (soit la somme de chaque module). Ensuite, nous avons simulé le calepinage existant sur le toit puis 4 cas aléatoires, un tri sur  $P_{max}$ , un sur  $I_{cc}$ ,  $V_{mpp}$ ,  $I_{mpp}$  et  $V_{oc}$ . La technique de tri sur le critère  $I_{mpp}$  s'avère la plus efficace.

Cependant on voit que les pertes par mismatch sont de 0,4% sans faire de tri contre 0,1% après tri (car faible écart type à la base). Le gain est à mettre en regard du surcout engendré par un tri de plusieurs centaines de modules (soit par le fournisseur soit par l'installateur sur site). Enfin, le tri sera imposé sur la durée de vie de la centrale (+ de 20 ans), et rien de garanti que les modules vieilliront dans les mêmes proportions.

Pour conclure, les pertes par mismatch ne sont pas prises en compte par les logiciels du commerce mais ne représentent qu'une faible part comparées aux autres causes précédemment cités, si les modules sont de bonne qualité !



**Fig. 12.** Simulation de la puissance équivalente de la centrale de l'INES en fonction de plusieurs techniques de tri.

### 5. Pertes liées à la phase d'exploitation de la centrale

Après les pertes liées aux composants et les pertes liées à la conception, vient s'ajouter les pertes lors de la phase d'exploitation de la centrale. La liste des causes peut être longue mais nous aborderons ici celles liées à la salissure, au vieillissement ou encore au réseau électrique. Nous pourrions ajouter les pannes mais il existe peu d'éléments précis dans la littérature. Les retours d'expérience mentionnent cependant des sources de panne liées :

- à l'onduleur
- aux diodes de bypass
- aux diodes de blocage
- aux connectiques (à l'intérieur du module ou entre module)
- aux animaux (rongeurs, fourmis, araignées...)

#### 5.1. Salissures, grave ou pas ?

Faut-il nettoyer les modules ? Si oui à quelle fréquence ? Sinon quelles conséquences ? Ces trois questions nous sont posées très souvent et malheureusement la réponse n'est pas scientifique : « Ca dépend, faites l'expérience » ! Mais que dire d'autre ? Depuis 6 ans il a été possible de voir sur le

terrain de multiples cas mais l'état de l'art reste maigre [14,15,16]. De la centrale à l'INES avec peu de poussière, à la centrale Suisse recouverte de suie (sans que l'exploitant ne le sache) en passant par les centrales Californienne et la centrale allemande de Burgdorf suivie depuis 1994, les effets sont différents. Dans ce dernier cas on voit nettement l'effet de la salissure (Fig 13) qui fait perdre 7 % sur 5 ans. L'étude en climat sec de Californie montre une perte entre 1.5 et 6 % par an, alors qu'à l'INES nous avons estimé la perte à moins de 2% depuis 4 ans. Généraliser ces résultats serait hasardeux, par contre on ne peut que préconiser à l'exploitant d'instrumenter sa centrale avec une cellule de référence (en la maintenant propre !) et de suivre l'évolution du Pr. Seul ces résultats permettront d'engager ou non un nettoyage qui peut s'avérer coûteux, surtout pour des centrales intégrées au bâti.

Là encore comment un logiciel de simulation peut-il tenir compte de ces éléments ?

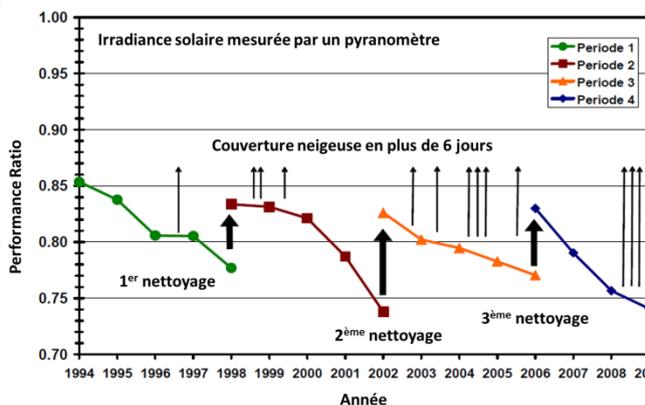


Fig. 13. Suivi de la performance ratio sur la centrale de Burgorf en Allemagne depuis 1994 [16].

## 5.2. Et le réseau dans tout ça ?

Un système PV connecté au réseau dépend de la qualité du réseau en amont. Les micros coupures, les sur/sous tensions, les harmoniques sont des perturbations générées par le réseau et peuvent se traduire directement par des pertes de production. Plus discrètement, on peut trouver des pertes liées à des réglages trop sensibles des onduleurs. En effet, pour se prémunir des risques d'îlotage du réseau, les onduleurs doivent répondre à la norme DIN VDE 0126-1.1 qui spécifie, entre autre, les niveaux de tension et de fréquence au-delà desquels l'onduleur doit se déconnecter. Typiquement les fréquences inférieures à 47,5 Hz et supérieures à 50,2 Hz doivent provoquer un déclenchement en moins de 0,2 seconde. Les tensions aux bornes de l'onduleur qui sont supérieures à 115 % ou inférieures à 80 % fois la tension nominale provoquent un déclenchement en moins de 0,2 seconde aussi. Mais comme sur l'autoroute, rien ne vous empêche de rouler à 120 km/h au lieu de 130 km/h ! Dit autrement un onduleur peut avoir des seuils plus

« sensibles » (et rester un très bon onduleur). A l'INES nous avons fait l'expérience, sans le vouloir, de déconnexions répétées d'un onduleur. La figure 14 montre la tension aux bornes de deux onduleurs de 5 kW connectés sur le même réseau. L'impédance des câbles entre le transformateur de l'INES et les onduleurs n'est pas négligeable (plus de 200m) et génère naturellement des surtensions en période diurne (entre 8h et 18h). Malgré une tension qui évolue au-delà de 250 V, l'onduleur X reste connecté sans problème. En revanche, l'onduleur Y déconnecte souvent à partir de 247,5V (108% fois la tension nominale). Chaque déconnexion (une douzaine) engendre plus de 2 minutes de pertes de production soit au final 2,5 % d'énergie en moins sur la journée par rapport à l'onduleur X (sans compter l'usure accélérée si le phénomène se répète tous les jours).

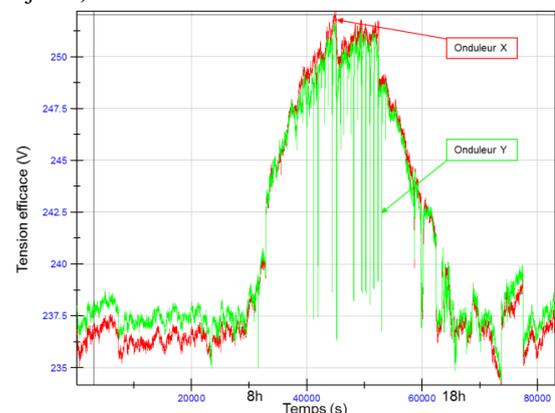


Fig. 14. Tensions aux bornes de deux onduleurs connectés sur une même phase.

Il est évident qu'aucun logiciel de simulation n'est capable de prendre en compte de telles causes de pertes.

## 5.3. Quel vieillissement en 20 ans ?

Enfin, l'impact du vieillissement des modules est aujourd'hui encore très méconnu. Cependant les constructeurs n'hésitent pas à garantir 80% de la puissance au bout de 20 ans. Il est concevable que les « vieux » fabricants aient accumulé un retour d'expérience riche et peuvent s'avancer sur de tels chiffres mais que dire des tout récents fabricants, et encore plus, pour des nouvelles technologies comme les couches minces ?

Le vieillissement n'est pas que l'affaire des modules mais concerne aussi l'onduleur, la connectique, les capteurs de mesure, etc. Et là aucune étude n'existe (à ma connaissance !).

## 6. Conclusion

Cet article a présenté les multiples causes de pertes qui grèvent les performances des systèmes PV. Malgré des outils de simulation de plus en plus élaborés, nous avons souhaité mettre en avant qu'il était engageant de

garantir aujourd'hui une production annuelle précise, et encore plus sur 20 ans.

Cependant, sans faire d'idéalisme nous allons rapidement voir apparaître les courbes de rendement des modules PV comme obligatoires, ainsi que la notion de rendement dynamique du MPPT. De plus, l'expérience et le savoir-faire des installateurs grandissants, les impacts des ombrages et des mauvaises intégrations seront de mieux en mieux connus et mieux pris en compte lors de la conception. Enfin, les premiers « smart » modules pointent sur le marché en embarquant de l'électronique pour monitorer, diagnostiquer et protéger l'installation et permettront une meilleure exploitation et maintenance.

Prédire précisément la production photovoltaïque est un des enjeux des chercheurs s'ils veulent que cette source de production d'électricité prenne une part active dans le mix énergétique de demain, non comme une source de revenu rentable mais bien comme une source de production d'énergie.

#### PRÉCISIONS ET REMERCIEMENTS

L'auteur souhaite préciser qu'il n'est pas à l'origine de tous les résultats présentés dans l'article. Ils sont issus des nombreux travaux faits depuis 2006 par les chercheurs du CEA/INES et notamment du Laboratoire des Systèmes Solaires et du Laboratoire Énergétique du Bâtiment.

Enfin, depuis plus de 3 ans la « philosophie » de cet article est enseignée tous les mois à des professionnels du PV en formation à INES Education avec l'aide précieuse de Sébastien Gréhan.

#### RÉFÉRENCES

- [1] <http://www.enr.fr>
- [2] A. Guérin de Montgareuil, J.L. Martin, F. Mezzasalma, J. Merten, "Main results of the first intercomparison campaign of european irradiance sensors at INES Cadarache", 22nd EU PVSEC, Milan, 2007.
- [3] J. Merten, L. Sicot, Y. Delesse, A.Guérin de Montgareuil, "Outdoor evaluation of the energy production of different module technologies", 25<sup>nd</sup> EU PVSEC, Valencia, 2010.
- [4] <http://photovoltaïque.guidenr.fr/>
- [5] <http://www.photon-magazine.com/>
- [6] V. Didiersous, B. Gaidon, « Les Onduleurs pour Systèmes Photovoltaïques », rapport Hespul 2007
- [7] Trishan Eram, Patrick L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques", IEEE energy conversion 2007.
- [8] H. Häberlin «Rendement total et rendement MPPT dynamique, Rendement des onduleurs photovoltaïques », [www.pvtest.ch](http://www.pvtest.ch).
- [9] N.Chaintreuil, F. Barruel, "Effects of shadow on grid connected PV system" 23<sup>rd</sup> EU PVSEC, Valencia, 2008.
- [10] F. Iannone, G. Noviello, A. Sarno "Monte Carlo Technique to analyse the electrical mismatch losses in large-scale photovoltaic Generator" Solar Energy, 62, No 2, page 85-92, 1998
- [11] M.C. Alonso-Gracia, J.M. Ruiz, F. Chenlo: "Experimental study of mismatch and shading effects in the I-V characteristic of a photovoltaic module", Solar Energy Material & Solar Cell, 90, pages 329-340, 2006
- [12] Filippo Spertino, Jean Sumaili Akilimali, Are Manufacturing I-V Mismatch and Reverse Currents key factors in Large Photovoltaic Arrays, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 56, No 11, 2009
- [13] Charles E. Chamberlin, Peter Lehman, James Zoellick, Gian Pauletto, "Effects of mismatch losses in photovoltaic arrays", Solar Energy, Vol 54. N. 3, 165-171, 1995
- [14] M.Ibrahim, B. ZinBer, H.El-Sherif, E.Hamouda, G.Makrides Advanced Photovoltaic Test Park in Egypt for Investigating the Performance of Different Module and Cell Technologies, 24. Symposium Photovoltaische Solarenergie, edited by Bad Staffelstein, 318 (2009)
- [15] Kimber, A., L. Mitchell, S. Nogradi, and H. Wenger, "The Effect of Soiling on Large Grid-Connected Photovoltaic Systems in California and the Southwest Region of the United States" Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Volume 2, 2391-2395, May 2006.
- [16] H. Häberlin, « Sur les traces du rayonnement solaire », La revue Polytechnique N1725, <http://www.polymedia.ch/>.

## Impacts environnementaux de bâtiments : Comparaison du poids respectif des équipements techniques et du bâti

Luc FLOISSAC \*, Lucie FELIX, Guillaume MILESI, Hans VALKHOFF

LRA - Laboratoire de recherche en Architecture – Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Toulouse,

\* : Auteur correspondant : luc.floissac@wanadoo.fr

**Résumé :** L'estimation des impacts environnementaux de la construction, de l'entretien et de la fin de vie des bâtiments est généralement réalisée à partir d'une analyse des éléments du bâti (gros œuvre, second œuvre), de la vie du chantier et la déconstruction de l'édifice. Les éléments plus « discrets » comme les équipements techniques (câbles, interrupteurs, gaines de ventilation, réseaux...) plus complexes à modéliser sont fréquemment omis car considérés comme négligeables. L'analyse réalisée par le LRA du bâtiment tertiaire à énergie positive « 6ENERGY+ » de la société Gamba acoustique montre que l'impact environnemental des équipements techniques est du même ordre que celui du bâti..

**Mots clés :** Qualité environnementale, impacts, FDES, PEP

Cet article a également été publié dans *ECOBAT Sciences & Techniques 2012*

### Introduction

L'estimation des impacts environnementaux de la construction, de l'entretien et de la fin de vie des bâtiments repose aujourd'hui en France sur des données qui couvrent essentiellement les matériaux au travers de FDES (Fiches de Déclaration Environnementales et Sanitaires). Des données fragmentaires commencent en outre à être disponibles dans le domaine des équipements et systèmes techniques intégrés dans les bâtiments au travers de PEP (Profils Environnementaux de Produits). A l'étranger des données sont disponibles sous forme d'EPD (Environmental Product Declarations) ou dans des bases de données comme celle de EcoInvent. Bien que basés sur des normes identiques, le périmètre des ACV, les impacts environnementaux mesurés et la présentation des résultats obtenus varient sensiblement

selon les documents (FDES, PEP, EPD, données ECOBILAN...). La réalisation exhaustive du bilan environnemental d'un bâtiment et de ses équipements est donc rendue délicate à la fois par l'absence de certaines données et/ou par leur hétérogénéité.

Pour palier ces problèmes nous avons rassemblé des données qui contiennent les informations environnementales publiques disponibles sur plusieurs milliers de matériaux et composants tout en en corrigeant autant que faire se peut leurs biais méthodologiques. Pour cela le logiciel « QEB data extractor » conçu pour alimenter la base de données MATHIERES du logiciel COCON a été utilisé. Ceci a permis de disposer de l'ensemble des FDES publiées au 31/07/2011, de la majorité des PEP disponibles à ce jour ainsi que des informations complémentaires issues de la base de données EcoInvent.



Photo 1 : Photo du bâtiment 6ENERGY+

Le bâtiment « 6ENERGY+ » a ensuite été modélisé à partir des quantitatifs très précis issus des devis des entreprises qui ont participé à sa construction. Selon les ouvrages, ceci a permis de « descendre » à un niveau de granulométrie très fin afin de comptabiliser l'impact de la très grande majorité des éléments de l'édifice, des plus grossiers (béton de fondation, poutres...) aux plus fins (interrupteurs, prises de courant, bouches d'aération...).

### Matériels et Méthodes

#### *RECUEIL DES IMPACTS DES MATERIAUX, DES PRODUITS ET DES EQUIPEMENTS*

La première étape de cette recherche a consisté à recueillir les impacts environnementaux des produits, matériaux et équipements de construction à partir de 3 sources principales (cf. Tableau 1).

- 1<sup>ère</sup> source : les informations contenues dans la base de données MATHIERES du logiciel COCON ont été utilisées afin de connaître les impacts environnementaux des matériaux et produits de

construction. Elles sont issues très majoritairement de FDES et présentent l'avantage de s'appliquer strictement au produit effectivement mis en œuvre.

- 2<sup>ème</sup> source : les impacts des équipements techniques ont été majoritairement déterminés à partir de leurs PEP. Pour cela l'outil « QEB data extractor » développé pour l'alimentation dans la base de données MATHIERES du logiciel COCON a permis d'extraire semi automatiquement les informations contenues dans les 700 PEP collectées sur les sites Internet des fabricants. En effet, disponibles uniquement (au moment de la réalisation du projet) sous forme de fichier PDF, les PEP ont été numérisés puis traités afin d'en extraire les impacts environnementaux. Cette opération s'est avérée longue car le format et la présentation des données n'y sont pas complètement standardisés.

- 3<sup>ème</sup> source : pour certains équipements, il a été impossible de disposer de données mises à disposition par les fabricants. Dans ce cas, des informations génériques (valeurs moyennes pour une famille d'équipements) contenues dans la base de données Ecoinvent ont été utilisées.

Ouvrages	Source des données		
	Logiciel COCON (FDES – Fiches de Déclarations Environnementale et Sanitaire)	PEP (Profil Environnementaux de Produits)	EcoInvent
Matériaux de construction du bâti	X		
Interrupteurs, prises de courant et prises informatiques		X	
Appareils d'éclairage		X	
Equipement de sécurité (repérage des sorties de secours, alarme, ...)		X	
Armoire électrique et accessoires, alimentations		X	
Câbles et fils électriques (circuits d'éclairage), terre		X	
Alimentation en eau pour sanitaires et plancher chauffant	X	X	
Sanitaires (WC, ...)	X		
Conduits pour la ventilation	X		X
Centrales double et simple flux (ventilation)			X
Calorifugeage des circuits d'eau, de ventilation et de chauffage	X		
Panneaux photovoltaïques			X
Pompes à chaleur			X

*Tableau 1 : Sources de données utilisées en fonction des ouvrages*

*MISE EN PLACE D'UNE BASE DE DONNEES DES IMPACTS DES MATERIAUX, DES PRODUITS ET DES EQUIPEMENTS*

La deuxième étape de cette recherche a consisté à mettre en place une base de données de produits, matériaux et équipements de la construction. La représentation des impacts environnementaux a été uniformisée (cf Tableau 2 et Tableau 3) afin de permettre de comparer les résultats issus des trois

sources de données utilisées. Les indicateurs de la norme NF P-01-010 ont été sélectionnés. Lorsque nécessaire des conversions ont été réalisées afin d'exprimer l'ensemble des résultats dans des unités identiques. Les périmètres des ACV utilisées pour chaque type de documents sont différents (cf. Tableau 4) ce qui peut compliquer la comparaison de leurs contributions respectives à l'impact environnemental de l'ensemble d'un bâtiment.

Indicateurs	Unités utilisées par source de données		
	FDES Norme NF P 01-010	PEP (Profil Environnementaux de Produits)	EcoInvent
Epuisement des ressources	kg~Sb	année <sup>-1</sup>	kg~Sb
Energie totale consommée	MJ	MJ	MJ
Consommation d'eau	L	dm <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
Participation à l'effet de serre	kg~CO <sub>2</sub>	g~CO <sub>2</sub>	kg~CO <sub>2</sub>
Participation à la destruction de la couche d'ozone	kg~CFC-11	g~CFC-11	kg~CFC-11
Participation à la création d'ozone photochimique	kg~C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	g~ C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	kg~ C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
Pollution de l'eau	m <sup>3</sup>	dm <sup>3</sup>	-
Pollution de l'air	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	-
Potentiel d'acidification de l'air	kg~SO <sub>2</sub>	g~H <sup>+</sup>	kg~SO <sub>2</sub>
Production de déchets dangereux	kg	kg	-

**Tableau 1** : Indicateurs et unités employées selon les sources de données

Indicateurs	Coefficient de conversion		
	FDES Norme NF P 01-010	PEP (Profil Environnementaux de Produits)	EcoInvent
Epuisement des ressources	1	7,3.10 <sup>10</sup>	1
Energie totale consommée	1	1	1
Consommation d'eau	1	1	10 <sup>3</sup>
Participation à l'effet de serre	1	10 <sup>-3</sup>	1
Participation à la destruction de la couche d'ozone	1	10 <sup>-3</sup>	1
Participation à la création d'ozone photochimique	1	10 <sup>-3</sup>	1
Pollution de l'eau	1	10 <sup>-3</sup>	-
Pollution de l'air	1	1	-
Potentiel d'acidification de l'air	1	3,13.10 <sup>-5</sup>	1
Production de déchets dangereux	1	1	-

**Tableau 3** : Facteurs de conversion utilisés pour se conformer aux unités de la norme NF P-01-010

**Tableau 4 : Périmètres des ACV relatifs aux données utilisées par type de document**

Base de données	Production	Transport	Vie en oeuvre	Utilisation	Fin de vie
FDES	X	X	X		X
PEP	X	X		X <sup>(1)</sup>	
ECOINVENT	X				

<sup>(1)</sup> Les consommations d'énergie des équipements durant leur utilisation n'ont pas été prises en compte à la fois afin de faciliter la comparaison avec les matériaux et en tenant compte du fait que les consommations d'énergie des équipements sont intégrées dans les simulations thermiques.

*DESCRIPTION ET MODELISATION DU BATIMENT AFIN DE QUANTIFIER LES MATERIAUX ET EQUIPEMENTS QUI LE COMPOSENT*

**GROS-ŒUVRE / SECOND ŒUVRE**

L'étude du gros et second œuvre (que nous appellerons "bâti" par la suite) a été réalisée à l'aide du logiciel COCON ainsi que des plans et devis du bâtiment. Dans un premier temps les différents types de parois ou autres éléments du bâtiment ont été modélisés à partir des informations contenues dans la base de données de COCON (majoritairement des FDES de produits de construction). Les plans et devis ont permis d'obtenir des métrés et quantitatifs qui ont aboutis au calcul des impacts pour le bâti.

**EQUIPEMENTS TECHNIQUES**

L'étude des équipements a été réalisée à partir de quelques FDES et surtout de PEP. Les devis des entreprises ont permis dans un premier temps de connaître la majeure partie des équipements inclus dans le bâtiment étudié. Pour chacun, lorsque des informations environnementales n'étaient pas disponibles, un produit équivalent a été sélectionné et les informations le concernant ont été utilisées dans les calculs. Ceci a permis de couvrir la majeure partie des éléments constitutifs du bâtiment (cf. Tableau 5).

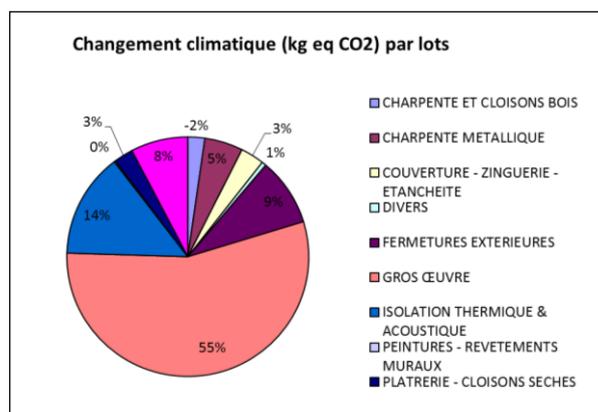
Indicateurs	Complétude des données	
Gros œuvre	100%	
Second œuvre	100%	
Installation électrique	50%	
Chauffage	60%	
Ventilation mécanique	60%	
Plomberie et sanitaires	90%	
Pompes à chaleur	80%	
Panneaux photovoltaïques	80%	

**Tableau 5 : Pourcentage des équipements et du bâti modélisés lors de l'étude**

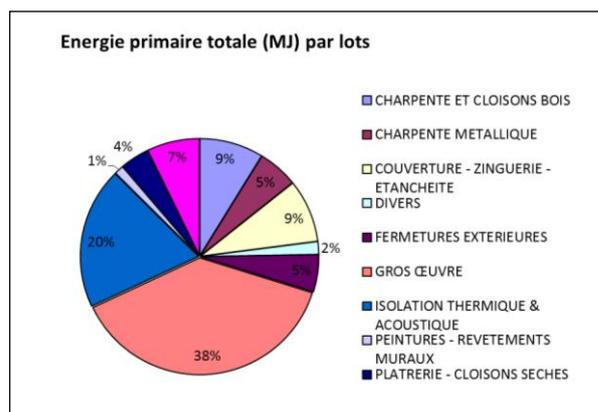
**Résultats et discussion**

**RESULTATS**

Les résultats obtenus sur le bâtiment « 6ENERGY+ » au niveau du « bâti » (gros œuvre et second œuvre) pour les indicateurs changement climatique et énergie totale consommée sont présentés pour le bâti sur la Figure 1, Figure 2, Figure 3 et la Figure 4 pour les équipements.



**Figure 1 : Bâti - Répartition des émissions de GES par lot de mise œuvre (total 316 kg~CO2 / m² SHON)**



**Figure 2 : Bâti - Répartition de l'indicateur énergie primaire totale par lots de mise œuvre (total 1437 kWh / m² SHON)**

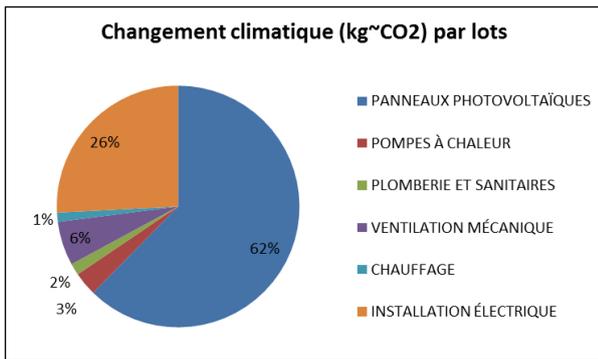


Figure 3 : Equipements techniques - Répartition des émissions de GES par lot de mise œuvre (335 kg-CO<sub>2</sub> / m<sup>2</sup> SHON)

La comparaison des impacts respectifs du bâti et des équipements techniques montre que ces derniers contribuent de manière non négligeable (50% en moyenne environ) aux impacts environnementaux

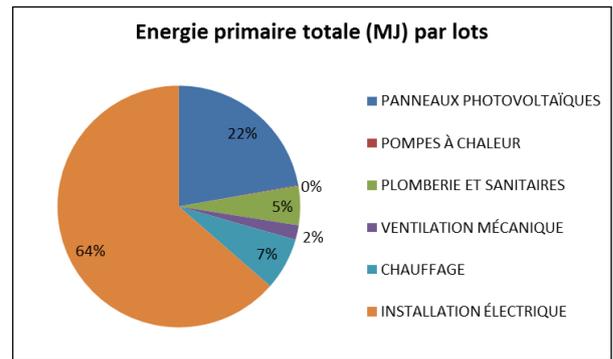


Figure 4 : Equipements techniques - Répartition de l'indicateur énergie primaire totale par lots de mise en œuvre (total 640 kWh / m<sup>2</sup> SHON)

(cf. Figure 5), en particulier en ce qui concerne la pollution de l'air (cf Figure 6) et la participation à la destruction de la couche d'ozone (cf. Figure 7)

### Comparaison des impacts

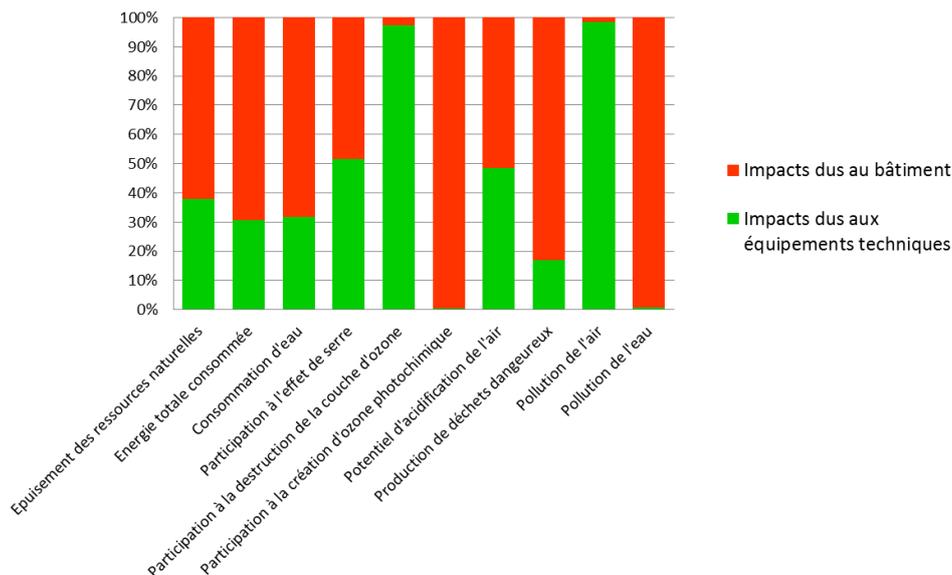


Figure 5 : part relative des impacts du bâti et des équipements pour chaque indicateur

La part des équipements (par rapport au bâti) dans la participation à la destruction de la couche d'ozone et la pollution de l'air est étonnamment importante. La Figure 7 et la Figure 8 montrent une corrélation assez importante entre le poids des équipements et leurs impacts environnementaux. En revanche elles ne permettent pas de mettre en évidence une anomalie flagrante dans les résultats obtenus. Il en est de même au niveau de l'indicateur de pollution de l'air.

Du point de vue de la participation à la destruction de la couche d'ozone, l'équipement "pompes à chaleur" se distingue des autres (Figure 7). Ceci est à relier avec l'utilisation d'hydrochlorofluorocarbures (HCFC) dans les fluides frigorigènes <sup>(2)</sup>. Pour ce qui est de la participation au changement climatique et de l'énergie primaire totale, l'ensemble des équipements présente encore une relative homogénéité entre GES émis et poids (cf. Figure 8)

<sup>(2)</sup> Une fois relâché dans l'atmosphère, le chlore contenu dans les HCFC catalyse des réactions conduisant à la destruction de l'ozone. La production des HCFC est interdite depuis 2010, et leur utilisation le sera en 2015. Ils seront alors remplacés par des gaz de type hydrofluorocarbures (HFC) inoffensifs pour la couche d'ozone mais ayant un impact sur le réchauffement climatique.

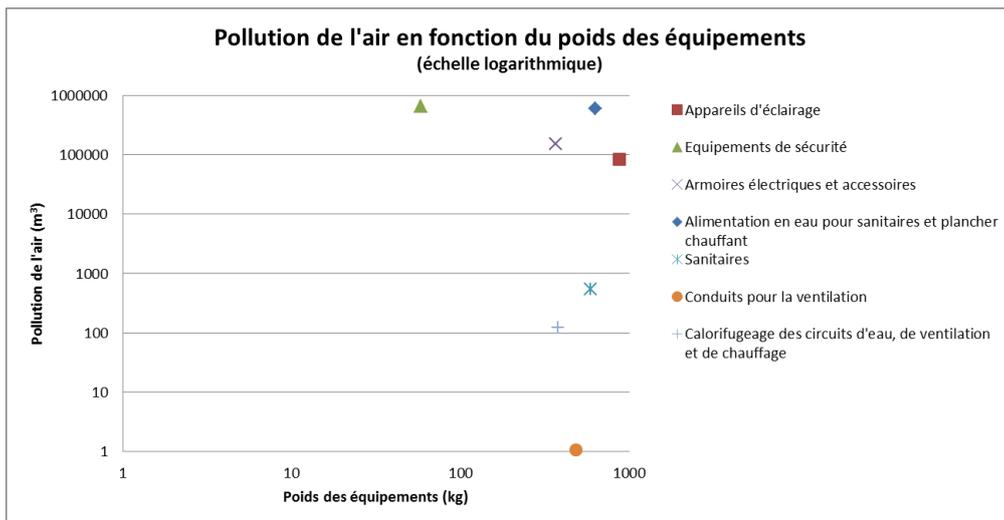


Figure 1: Pollution de l'air liées aux différents types d'équipements en fonction de leur poids

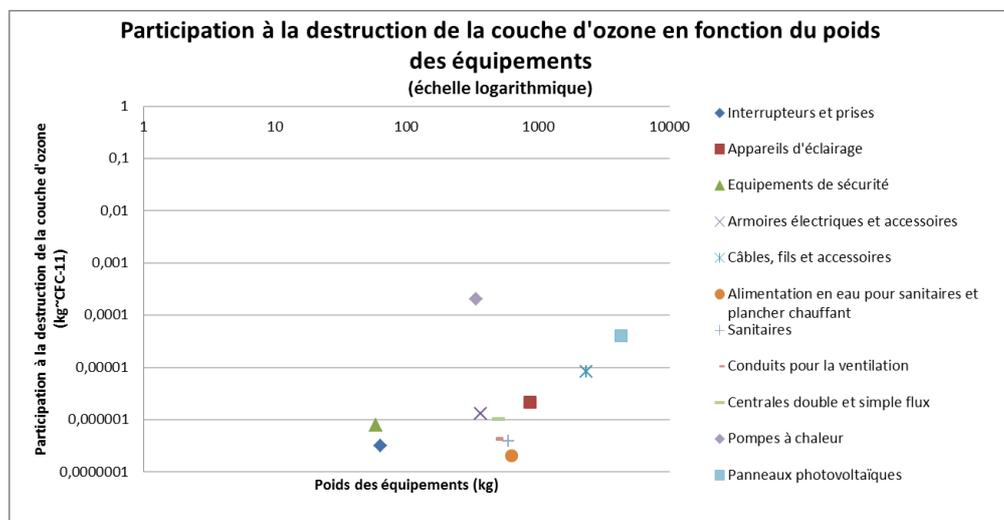


Figure 2: Participation des différents types d'équipement à la destruction de la couche d'ozone en fonction de leurs poids

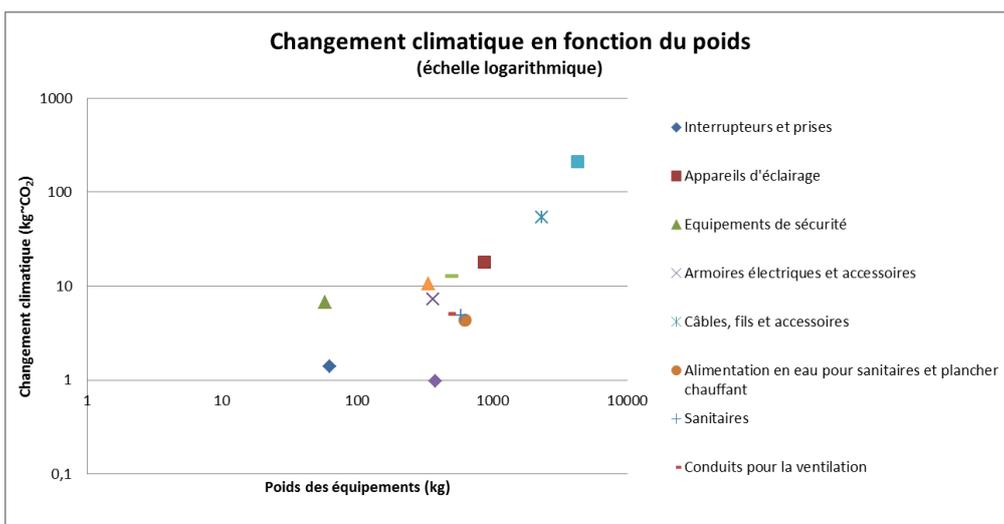


Figure 3 : Participation des différents types d'équipements au changement climatique en fonction de leur poids

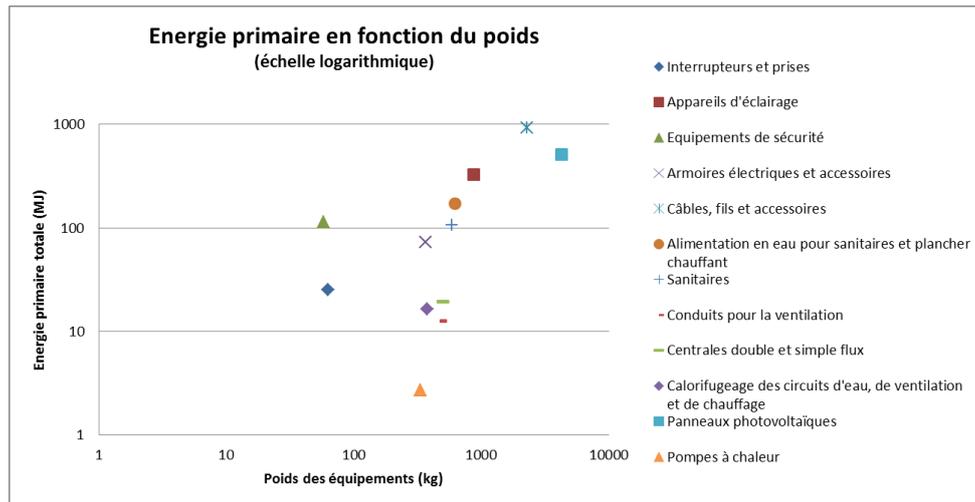


Figure 4: Energie primaire totale contenue dans les différents types d'équipements en fonction de leur poids

## DISCUSSION

L'étude présentée pourrait être affinée. En effet, le mobilier n'a pas été modélisé alors que celui-ci possède un impact environnemental fort (projet PEREN) encore renforcé par son rythme de renouvellement souvent élevé dans les bâtiments tertiaires. Il est probable que les équipements techniques vont aussi voir leur rythme de renouvellement augmenter du fait de l'accélération de l'innovation technologique.

De plus, il existe plusieurs incertitudes liées aux:

- Données manquantes (manque de précision des devis, absence de données sur le produit etc...)
- Equivalences entre produits lorsque certaines références sont manquantes.
- ACV (Analyses en Cycle de Vie) réalisés sur les matériaux et équipements qui peuvent varier selon les bases de données de références utilisés, les logiciels employés, les conditions de réalisation etc.

Malgré ces incertitudes, les résultats obtenus permettent de mettre en valeur l'importance du poids des équipements techniques par rapport à celui du bâti.

## Conclusions et perspectives

Du fait de ses performances thermiques intrinsèques (conception bioclimatique, étanchéité à l'air isolation), le bâtiment étudié ici intègre des équipements techniques relativement légers. Pourtant, l'impact de ces derniers est significatif. Cet impact relatif serait beaucoup plus important dans un bâtiment similaire aux performances thermiques médiocres car les équipements devraient alors compenser les défauts de l'enveloppe. Cette étude montre que l'impact des équipements techniques de la construction devrait être mieux pris en compte dans les analyses de QEB (Qualité Environnementale des Bâtiments). La difficulté actuelle

d'obtention de données rend ceci pour l'instant difficile, et nous ne pouvons qu'encourager la production de déclarations environnementales ainsi que la création de bases de données de référence relatives à tous les aspects du bâtiment. Une harmonisation des indicateurs et de leurs unités serait aussi souhaitable afin de faciliter l'utilisation de ces données aussi bien par les scientifiques que par les éditeurs de logiciels, les maîtres d'ouvrages et les équipes de maîtrise d'oeuvre. Ces améliorations contribueraient à faire évoluer l'architecture vers un mode de construction plus responsable d'un point de vue environnemental (cf. Figure 10).

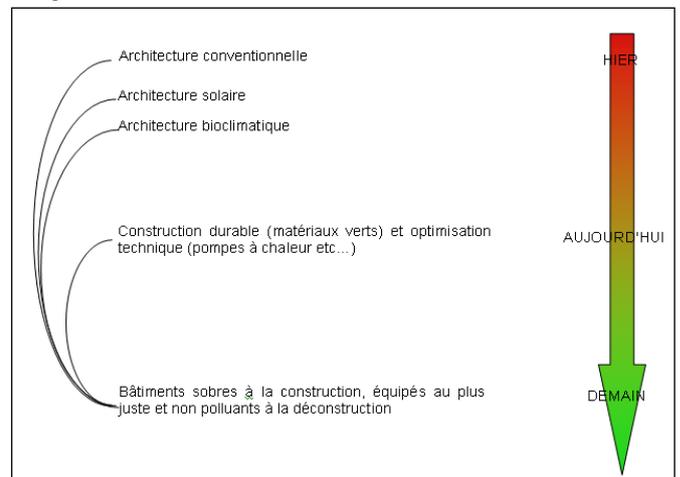


Figure 10 : Evolution de l'architecture et de la construction vers des bâtiments plus confortables, sobres et respectueux de l'environnement.

## Remerciements

Nous tenons à remercier la société Gamba acoustique et ses salariés pour leur disponibilité lors de la récolte des données ainsi que le Ministère du Développement Durable qui finance le projet de recherche DISPERSION.

## Références bibliographiques

AFNOR (2004) Norme NF P01-010, Qualité environnementale des produits de construction, 48 p.

AFNOR (2008) Protocole relatif à la structure provisoire de gestion de la base de données sur les déclarations environnementales et sanitaires des produits de construction (INIES) - Conseil de surveillance CSIB 45, 8 p.

CEN (2010) prEN 15804 - Sustainability of construction products - Environmental product declarations - Product category rules, 47 p.

Chevalier J, Lebert A, Ravel P, et Lasvaux S. (2009) Préparation des évolutions des référentiels pour les bâtiments à énergie positive: Lot Energie Grise. Rapport interne CSTB, 14 p.

Ecoinvent centre (2010) Ecoinvent database <<http://www.ecoinvent.ch>>, consulté le 04/11/2011.

Ferries B., Floissac, L, et al. (2009) - Guide pour la conception d'immeubles de bureau économes en énergie, sobres en carbone et compétitifs – Projet PEREN -, Toulouse : ENSA (pp. 18).

Floissac L, Marcom A., Colas AS, Buic QB, Morel JC (2009) " How to assess the sustainability of building construction processes ?" , in 5th Urban Research Symposium, (éd.), Cities and Climate Change: Responding to an Urgent Agenda, Marseille : Banque mondiale

Floissac L, (2009) Logiciel COCON, in EOSPHERE(éd.), <http://www.eosphere.fr/COCON>

INIES (2011) Base de données INIES <[www.inies.fr](http://www.inies.fr)>

ISO (2006) Environmental management - Life Cycle Assessment - Framework and principles - EN ISO 14040. Genève: International Organization for Standardization (ISO), 31 p.

ISO (2006) ISO 14025 - Environmental labels and declarations — Type III environmental declarations — Principles and procedures, 35 p.

ISO (2007) ISO 21930 - Sustainability in building construction - Environmental declaration of building products, 35 p.

Kellenberger D, Althaus H-J, Jungbluth N, Künniger T, Lehmann M, et Thalmann P. (2007) Life Cycle Inventories of Building Products: ecoinvent report No. 7. Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 914 p.

Lasvaux S (2010) Etude d'un modèle simplifié pour l'ACV des bâtiments. Thèse de doctorat, Spécialité: Energétique, MINES ParisTech, 396 p.

Lasvaux S, Chevalier J et Peuportier B. (2011) A data analysis tool to compare two LCA databases used in buildings LCA applications. Proceedings of LCA XI: Instruments for Green Future Markets, Chicago, Octobre 2011, 9 p.

Lasvaux S, Schiopu N, Peuportier B et Chevalier J (2011) Relevance of simplification in Life Cycle Inventory databases used in buildings LCA applications. Submitted to LCA Construction 2012, Nantes, Juillet 2012, 8 p.

Milési G (2011) Etude de la dispersion des impacts environnementaux des matériaux de construction, Rapport de stage ingénieur, 72 p.

## Liens internet

<http://bau-umwelt.de/hp481/Environmental-Product-Declarations-EPD.htm>

<http://fdes.ecobilan.com/fr/Fiches-de-declaration-environnementales-et-sanitaires-Textes-normatifs.php>

<http://www.aclec.fr/>

<http://www.aldes.fr/portail-aldes.htm>

<http://www.cooperfrance.com/>

<http://www.deltadore.com/>

<http://www.environdec.com/>

<http://www.e-catalogue.legrandgroup.com/france/index.html?showTarif=true>

<http://www.groupe-atlantic.com/>

<http://www.hager.fr/hager/developpement-durable/actions-environnementales/pep-profil-environnementaux-produits/14529.htm>

<http://www.inies.fr>

<http://www.pep-ecopassport.org/>

<http://www.sarlam.com/fr/services-pro/catalogue-guides.html>

<http://www.schneider-electric.fr/sites/france/fr/produits-services/produits-services.page?>

# Comptage d'énergie sur une Pompe à Chaleur

**GUILLAUME LEGUERN & SYLVAIN GRENAILLE**

Lycée Viollet Le Duc, 1 route de Septeuil  
78640 Villiers Saint Frédéric

## Résumé :

Les activités proposées dans cet article s'adressent à des élèves de première STI2D, dans le cadre de l'enseignement transversal de technologie. Elles font référence aux chapitres portant sur le comportement énergétique et informationnel des systèmes. L'objet technique choisi pour l'étude est le système « habitat » qui peut s'étudier grâce à une approche MEI. Notre étude se focalise sur les vérifications de performance d'une Pompe à Chaleur et sur le conditionnement de l'information issue du compteur d'énergie (débit et température).

## 1. Introduction

Le lycée Viollet Le Duc est le lieu de formations dans le domaine du développement durable, à la fois à travers son BTS Fluides Energies et Environnements (FEE) ou son BAC STI2D spécialités EE et AC. Les activités proposées dans cet article concernent l'enseignement technologique de tronc commun en première STI2D. Elles s'appuient sur les matériels technologiques actuels répondant aux problématiques de développement durable dans le domaine de l'habitat dont dispose le lycée (chauffe-eau solaire, pompe à chaleur).

## 2. Mise en situation

La diminution de l'impact environnemental du secteur bâtiment pendant la phase « utilisation » du cycle de vie,

se passe par la réduction des besoins et des consommations énergétiques des bâtiments. Les Réglementations Thermiques (RT) sont les outils permettant de faire évoluer la conception des bâtiments afin de les rendre plus efficaces d'un point de vue énergétique en fixant des exigences de résultat. Cependant il ne suffit pas de construire des bâtiments efficaces et performants, il faut aussi avoir les moyens de les contrôler, de les suivre afin de conduire le bâtiment de la manière la plus efficace possible.

Ainsi, une des grandes nouveautés introduite par la RT 2012, à l'instar de la Garantie de Résultat Solaire dans le domaine du chauffage et de la production d'ECS Solaire, est de fixer des exigences de moyen en imposant le comptage énergétique par usage afin d'en informer les utilisateurs (usagers et gestionnaires).

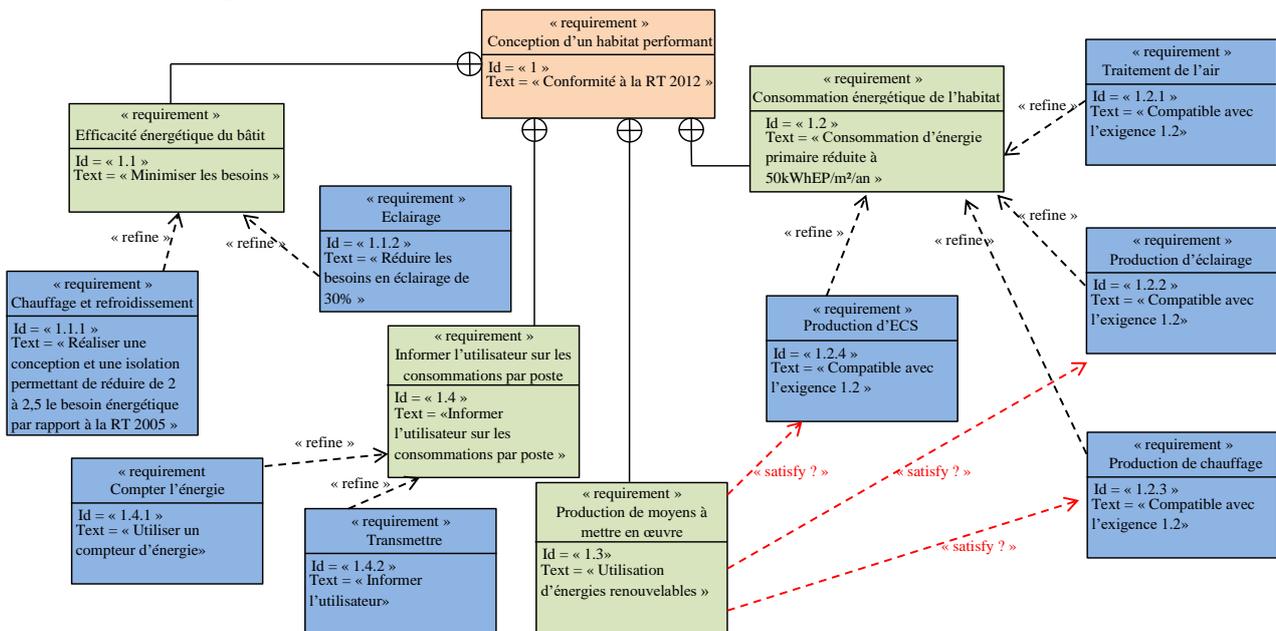


Figure 1. Diagramme des exigences d'un habitat en langage SysML

La figure 1 présente un diagramme des exigences (langage SysML) énergétiques d'un habitat actuel. L'exigence principale est le respect de la RT 2012. Afin de la satisfaire, il est nécessaire de travailler sur l'efficacité énergétique du bâti (Matériaux), sur la l'efficacité des systèmes énergétique (Energie) et sur les informations à collecter pour informer l'utilisateur (Information). Ainsi le système technique « habitat individuel » peut être abordé par une approche MEI et s'intègre donc parfaitement à l'enseignement transversal de technologie en STI2D.

Les activités proposées dans cet article consistent dans un premier temps en la vérification des performances d'une PAC afin de contrôler la satisfaction des exigences d'un cahier des charges. Dans un deuxième temps, il s'agit de caractériser unesolution technologique permettant de réaliser un compteur d'énergie sur cette PACau travers de l'acquisition et l'exploitation de signaux analogiques du débit et de la température du fluide caloporteur.

### 3. Activité n°1 – Performances de la PAC

#### 3.1. Contexte

Le lycée Viollet Le Duc dispose d'une PAC AIRWELL®<sup>1</sup>didactisée (voir Figure 2) permettant de mener des activités pratiques avec les élèves.



Figure 2. Photo de la PAC

Afin de situer l'étude proposée dans cette activité on considère un bâtiment équipé d'une PAC valorisant la ressource énergétique portée par l'air extrait de ce bâtiment. Ce contexte permet d'utiliser la PAC en

intérieur (l'énergie est récupérée sur l'air de la salle de cours). La PAC doit par ailleurs répondre aux exigences du cahier des charges illustré par le digramme SysML de la figure N°4.

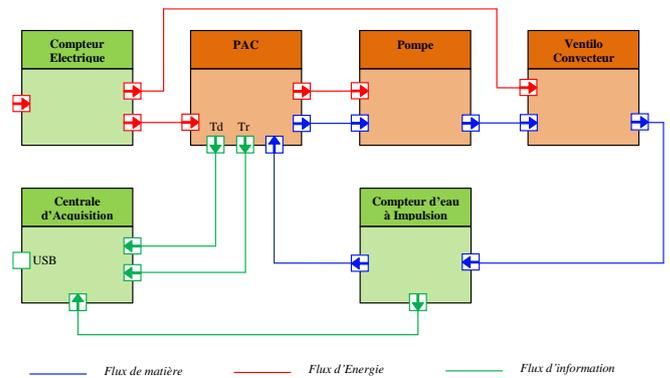


Figure 3. Diagramme bloc de la PAC didactisée en langage SysML

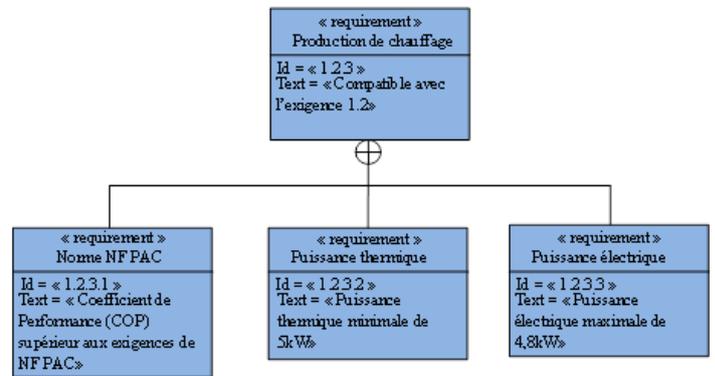


Figure 4. Diagramme des exigences de la PAC

#### 3.2. Objectifs :

L'objet de cette première activité est de vérifier par la mesure les performances de la PAC et la satisfaction aux exigences du cahier des charges :

- Délivrer une puissance de 5 kW
- Consommer une puissance électrique limitée à 4800 W
- Vérifier les exigences de performance de la norme NF PAC : COP > 3

#### 3.3. Ressources et matériels

- PAC AirWell®
- Centrales d'acquisition Labview®
- Applicatif VISUPAC fonctionnant sous Labview® (figure 5)
- Formulaire de calcul des puissances
- Documentation technique et pédagogique (figure diagramme d'exigence NF PAC, et diagramme de bloc interne PAC (figure 3)

<sup>1</sup> Fabricant CREA TECHNOLOGIE

### 3.4. Déroulement de l'activité et illustration, procédure à suivre :

- Configurer le banc (circulation au travers du ballon tampon, consigne de température  $T = 40^{\circ}\text{C}$  à régler)
- Mettre en place les sondes de tension et de courant
- Lancer l'appliquet VISUPAC (période d'acquisition toutes les secondes)
- Lancer l'acquisition
- Mettre en marche la PAC

### 3.5. Exploitation des mesures :

Exploiter les mesures affichées sur la face avant de VISUPAC afin de déterminer :

- La puissance transmise au fluide caloporteur par la PAC
- Le COP instantané de la PAC

Exploiter les mesures enregistrées pendant l'essai avec un tableur afin de tracer l'évolution des températures, du débit d'eau et de la puissance électrique absorbée durant l'essai. A partir de ce tracé :

- Identifier la phase de montée en régime (régime transitoire) et la phase de fonctionnement nominal (régime établi périodique).
- Donner la valeur de la période d'un cycle marche-arrêt en régime établi périodique.
- Que peut-on dire de la valeur du débit d'eau pendant la phase de fonctionnement?

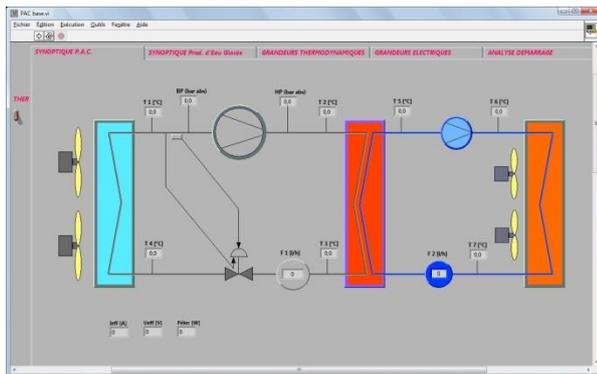


Figure 5. Appliquet VISUPAC

Exploiter les mesures enregistrées pendant l'essai avec Excel :

- Extraire dans une autre feuille les valeurs d'une période de fonctionnement
- Calculer pour chaque instant de mesure :
  - la puissance utile portée par le débit de fluide caloporteur
  - le COP instantané de la PAC
  - Les énergies électriques et calorifiques cumulées exprimées en W.h

- Calculer les valeurs moyennes sur un cycle des puissances utiles absorbées et du COP.

Conclure en répondant aux questions suivantes :

- Quelles grandeurs doit-on mesurer pour obtenir l'énergie fournie par la PAC au fluide caloporteur ?
- La puissance électrique absorbée vérifie-t-elle les exigences du cahier des charges ?
- Combien représente la consommation des auxiliaires de la PAC (Pompe et ventilateur) en % de la puissance appelée (figure 3)?
- La valeur du COP vérifie-t-elle les exigences de la Norme NF PAC ?

### 3.6. Bilan de l'activité

Au cœur de cette première activité se trouve la mesure de la puissance électrique et de la puissance thermique portée par un débit de fluide caloporteur. C'est à partir de ces mesures et de leurs intégrations que l'on peut contrôler et suivre les performances de la PAC.

Les élèves doivent au travers de cette activité identifier les grandeurs physiques à mesurer pour évaluer la puissance portée par un débit de fluide caloporteur. C'est le point clé sur lequel vont s'articuler les deux activités suivantes qui visent à faire comprendre l'architecture et le fonctionnement d'un compteur d'énergie thermique.

## 4. Activité n°2 – Mesure de débit

### 4.1. Objectifs

Nous avons vu dans l'activité précédente la nécessité de mesurer le débit et la température du fluide caloporteur. Afin de répondre à cet objectif, deux activités sont proposées aux élèves. Ces deux activités sont menées en parallèle.

La première activité correspond à la mesure du débit par l'utilisation d'un compteur d'eau (voir figure 6). Les informations fournies par ce capteur doivent dans un premier temps être récupérées en vue de déterminer la constante de ce compteur. Dans un deuxième temps, il s'agit de conditionner l'information fournie par le capteur en vue d'un codage de cette dernière.



Figure 6. Photo du compteur étudié

4.2. Ressources et matériels

- PAC AIRWELL®
- Centrale d'acquisition National Instrument®
- Logiciel Labview®
- Une alimentation stabilisée

4.3. Récupération de l'information

Le schéma de câblage de l'installation est représenté figure 7.

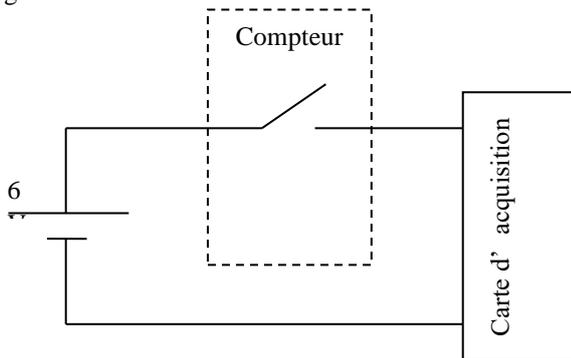


Figure 7. Schéma de câblage de l'installation

Les élèves travaillent à partir d'un fichier Labview® déjà programmé par les enseignants. Ce fichier permet de récupérer les impulsions issues du compteur d'eau de la PAC. L'application permet aux élèves de remplir le tableau suivant pour plusieurs essais correspondants à différentes valeurs de débit. Les essais durent 30 secondes.

ESSAI n°			
Volume d'eau <sup>1</sup>		Nombre d'impulsions <sup>2</sup>	

<sup>1</sup> Le volume d'eau est mesuré directement sur le compteur en prenant la différence de volume au début et à la fin de l'essai.

<sup>2</sup> Le nombre d'impulsions est mesuré à l'aide de l'application.

A partir de ces mesures, calculer :

- La période des impulsions
- La constante du compteur
- Le débit d'eau

4.3.1. Conditionnement de l'information

Le signal issu du compteur est fortement bruité (voir figure 13 en fin d'article). Si l'on désire exploiter ce signal afin de rendre le compteur communicant, il est nécessaire d'effectuer un traitement de ce dernier. Le montage de la figure 8 est alors utilisé dans ce but.

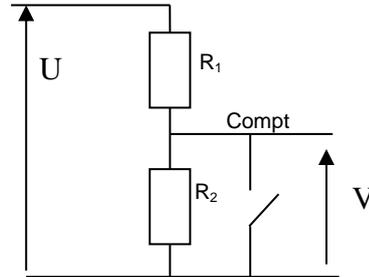


Figure 8. Schéma de câblage du compteur

La PAC dispose de sa propre alimentation 24V continue (ce qui permet de ne pas avoir recours à une alimentation stabilisée extérieure). Afin de récupérer l'information issue du compteur sur la centrale d'acquisition, il faut que le signal V soit compris entre 0 et 5V.

Travail à faire :

- Donner l'expression de la tension V en fonction de U lorsque le compteur est à l'arrêt.
- Donner l'expression de la tension V lorsque le compteur envoie une impulsion.
- Choisir un couple  $R_1/R_2$  respectant le cahier des charges.
- Faire une acquisition du signal et comparer avec l'essai précédent.
- Conclure sur l'utilité d'un tel montage pour le conditionnement de l'information.

4.4. Bilan de l'activité

Cette activité est l'occasion pour les élèves de se rendre compte de l'importance d'un bon conditionnement de l'information pour avoir un traitement efficace de cette dernière. Cette activité est aussi l'occasion de découvrir la technologie des capteurs fréquentiels. Cette activité est menée en parallèle de l'activité suivante dans laquelle le conditionnement de l'information est abordé à travers l'utilisation d'un capteur analogique.

## 5. Mesure analogique de la température

### 5.1. Objectifs

Caractériser expérimentalement le comportement d'une thermistance de type CTN.

Caractériser le comportement de la tension délivrée par cette sonde lorsqu'elle est montée au sein d'un « pont diviseur » de tension.

Caractériser le comportement de la tension délivrée par cette sonde lorsqu'elle est montée au sein d'un « pont de Wheatstone ».

### 5.2. Ressources et matériels

- Un multimètre
- Un thermomètre à alcool
- Un vase
- 3 boîtes à décades
- Une sonde CTN (Coefficient de Température Négatif)

### 5.3. Caractérisation de la sonde de type CTN

Procédure à suivre :

- Brancher la sonde de température sur un multimètre.
- Plonger la partie sensible de la sonde dans un bol rempli d'eau.
- Plonger dans ce même bol un thermomètre à alcool.
- En mélangeant de l'eau chaude et de l'eau froide, faire varier la température mesurée par la sonde et mesurer la résistance de la dite de manière à tracer la caractéristique  $R=f(T)$ . Prendre au moins 10 valeurs entre 0 et 50°C.

Exploitation des mesures :

- Tracer la caractéristique  $R=f(T)$
- Que peut-on dire du comportement de la CTN ?
- Quelles sont les valeurs prises par la thermistance pour les températures extrêmes de 0°C et 50°C ?

### 5.4. Utilisation d'un pont diviseur de tension

Un pont diviseur est un montage de résistances tel que le décrit la figure 9. Ici il s'agit de générer un signal de tension  $V$  qui soit une image de la résistance  $R_{CTN}$  et exploitable par une chaîne de mesure (centrale d'acquisition par exemple).

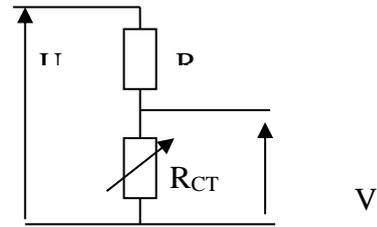


Figure 9. Schéma électrique d'un pont diviseur de tension

Travail à faire :

- Rappeler l'expression qui lie  $V$  à  $U$
- A partir des matériels disponibles proposer un couple tension d'alimentation  $U$  et résistance de charge  $R$ , permettant de générer une tension comprise entre 0 et 5V pour une mesure de température comprise entre 0°C et 50°C
- Remplacer la sonde CTN par une résistance variable. Vérifier que la tension générée par le pont est bien une image de la résistance variable et donc de la température mesurée par la CTN.
- Tracer la caractéristique  $V=f(R_{CTN})$

### 5.5. Utilisation d'un pont de Wheatstone

Un pont de Wheatstone est un montage de résistances tel que le décrit la figure 10. Ici, il s'agit de générer un signal de tension  $V$  qui soit une image de la résistance  $R_{CTN}$  et exploitable par une chaîne de mesure (centrale d'acquisition par exemple).

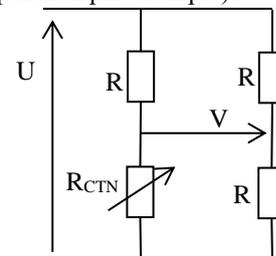


Figure 10. Schéma électrique d'un pont de Wheatstone

La relation qui lie  $V$  et  $U$  est la suivante :

$$V = U \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{1 + \frac{R_{CTN}}{R}} \right)$$

Travail à faire :

- A partir des matériels disponibles, proposer un couple tension d'alimentation  $U$  et résistance de charge  $R$  permettant de générer une tension comprise entre 0 et 5V pour une mesure de température comprise entre 0 et 50°C.
- Régler la valeur des résistances  $R$  à 4kΩ. valider le montage avec le professeur et le tester.

- Simuler la CTN avec une boîte à décade, et vérifier que la tension générée par le pont est bien une image de la résistance variable et donc de la température mesurée par la CTN. Effectuer au moins 10 valeurs.
- Refaire les essais en prenant  $R=6k\Omega$ ,  $R=8k\Omega$  et  $R=10k\Omega$ .
- Tracer les caractéristiques  $V=f(R_{CTN})$

### 5.6. Conclusion

- Tracer intuitivement l'allure de la courbe  $V = f(T)$  pour l'association de la CTN avec un pont de Wheatstone et un pont diviseur.
- Quelles sont les différences de comportement d'un pont de Wheatstone par rapport à un pont diviseur ?

### 5.7. Bilan de l'activité

Le premier intérêt de cette activité est la mise en pratique d'un capteur analogique. Comme dans l'activité précédente les élèves mettent en œuvre des solutions permettant le conditionnement de l'information.

## 6. Conclusion

Les activités proposées dans cet article ont été réalisées avec des élèves de première STI2D. Elles ont permis à ces élèves d'appréhender la nature des informations récupérées par les capteurs mis en œuvre dans un compteur d'énergie thermique. Elles ont par ailleurs mis en évidence la nécessité de conditionner ces informations afin de les adapter à la phase de transcodage.

La suite des activités prévues avec les élèves concerne le transcodage de l'information afin de comprendre comment rendre le compteur d'énergie communicant.

## 7. Eléments de correction

### 7.1. Activité n°1

La puissance fournie au débit d'eau est calculée à partir des mesures des températures de départ (T5) et de retour (T7), ainsi que du débit d'eau (F2) tel que :

$$P_{th} = \rho_{eau} \cdot C_{eau} \cdot Qv_{eau} \cdot (T_d - T_r)$$

$$P_{th} = 1000 \times 4185 \times \frac{1,127}{3600} \times (29,5 - 23,5)$$

$$P_{th} = 6550 \text{ W}$$

Les relevés permettent d'observer un régime transitoire d'une durée de 1800 secondes correspondant à la montée en température de la boucle d'eau, suivi d'un fonctionnement en régime permanent établi périodique.

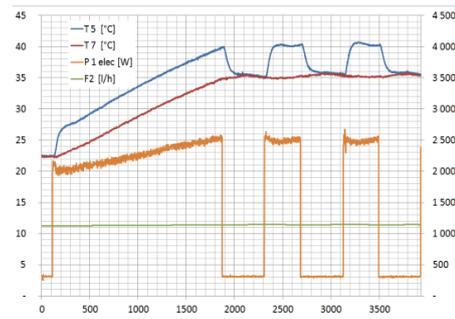


Figure 11. Relevés expérimentaux

La période des cycles marche-arrêt liée à la régulation TOR du compresseur est de l'ordre de 800 secondes.

On observe par ailleurs que le débit de fluide caloporteur est quasi constant, la pompe fonctionnant de manière continue.

La puissance électrique absorbée par les auxiliaires (pompe et ventilateur du ventilo-convecteur) s'élève à près de 13% de la puissance nominale. Ce qui a une incidence directe sur le coefficient de performance de l'installation (COP).

Une exploitation des mesures sur un cycle de fonctionnement permet de déterminer les performances de la PAC. On observe pendant la phase de fonctionnement du compresseur que le COefficient de Performance instantané, calculé comme suit, est de l'ordre de 2,75.

$$COP = \frac{P_{th}}{P_{elec}} \cong \frac{6600}{2400} = 2,75$$

Une analyse énergétique permet de déterminer sur un cycle de fonctionnement l'énergie apportée au fluide caloporteur (~758 W.h) ainsi que l'énergie électrique absorbée (~277 W.h). Ceci permet d'établir un COP de 2,74.

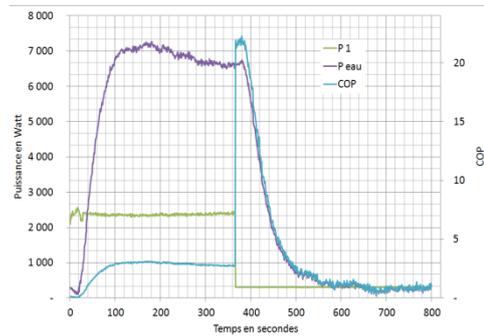


Figure 12. Relevés expérimentaux

La PAC testée dans le contexte fixé ne vérifie donc pas toutes les exigences. On observe en particulier l'impact non négligeable des auxiliaires sur les consommations d'énergie électrique. L'usage de circulateur basse consommation et d'émetteurs statiques (plancher chauffant) permettrait d'économiser près de 44 W.h sur un cycle, ce qui permettrait alors d'atteindre les objectifs.

## 7.2. Activité n°2 et n°3

## 7.2.1. Mesure analogique d'un débit

Le relevé d'un essai est donné sur la figure 13. Cet essai a été réalisé pendant 30s. Le volume indiqué par le compteur est de 10l.

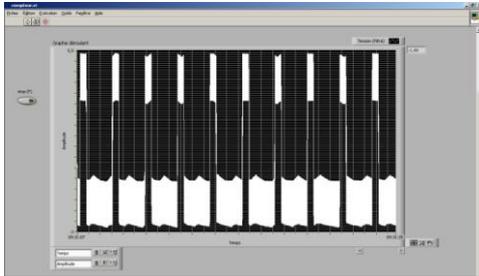


Figure 13. Relevé d'un essai pour un volume de 30l

Les mesures et les calculs permettent d'obtenir les résultats suivants :

Essai n°1.		Durée : 30s	
Volume d'eau	10l	Période des impulsions	3s
Nombre d'impulsions	10	Fréquence	0,33Hz
Constante	1l/impulsion	Débit	0,33l

Conditionnement de l'information :

Lorsque le compteur est à l'arrêt :

$$V = U \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)$$

Lorsque le compteur envoie une impulsion :

$$V = 0V$$

Un couple possible choisit est le suivant :  $R_1=1k\Omega$  et  $R_2=4k\Omega$ . Ces valeurs de résistances, permettent d'obtenir un signal carré plus propre (en effet, même si la tension autour de 5V reste relativement bruitée, le court-circuit permet d'obtenir un signal propre en 0V).

## 7.2.2. Mesure analogique d'une température

- Caractérisation de la sonde de type CTN

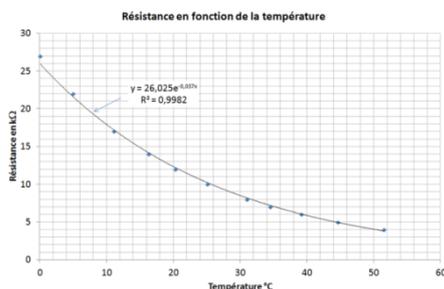


Figure 14. Résistance en fonction de la température

La CTN se comporte de manière non linéaire. Le modèle de comportement est tel que :

$$R = Ce^{-bT}$$

La thermistance varie entre  $27,3k\Omega$  (pour une température de  $0^\circ\text{C}$ ) et  $4k\Omega$  pour une température de  $50^\circ\text{C}$ .

- Utilisation d'un pont diviseur de tension

La relation qui lie les tensions  $V$  et  $U$  et les résistances est la suivante :

$$V = U \left( \frac{R_{CTN}}{R + R_{CTN}} \right)$$

Si la tension de l'alimentation continue «  $U$  » est de  $6,35V$ , il faut prévoir une résistance de charge  $R$  d'une valeur de  $7,271 k\Omega$  de manière à avoir une tension de  $5V$  quand la résistance de la CTN vaut  $27,3 k\Omega$ .

La résistance de la CTN variant entre  $4$  et  $27,3 k\Omega$ , la tension variera entre  $2,23$  et  $5$  Volts.

- Utilisation d'un pont de Wheatstone

On observe que si les résistances de charge  $R$  prennent les valeurs extrêmes prises par la CTN c'est-à-dire  $4$  et  $27,3 k\Omega$ , on aura une valeur de tension nulle. Exemples :

Si  $R = 4 k\Omega$  et  $T = 50^\circ\text{C}$  alors,  $R_{CTN} = 4 k\Omega$ , soit d'après la formule proposée :  $V = 0$  Volts

Si  $R = 27,3k\Omega$  et  $T = 0^\circ\text{C}$  alors,  $R_{CTN} = 27,3 k\Omega$ , soit d'après la formule proposée :  $V = 0$  Volts

- Conclusion

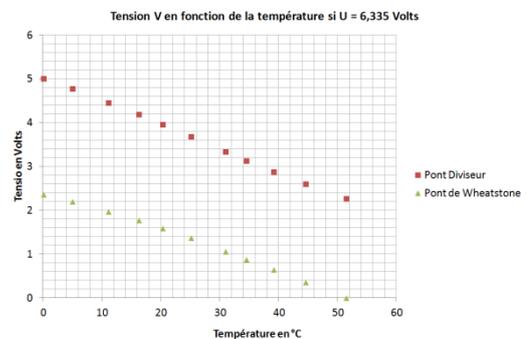


Figure 15. Allure de la courbe  $V=f(t)$  pour  $U=6,335V$

Le pont de Wheatstone permet de générer une tension nulle pour une valeur de la résistance de la CTN égale à la valeur de la résistance de charge. On observe que dans les deux cas la tension obtenue a un comportement beaucoup plus proportionnel.

## Mieux connaître sa consommation électrique

### Michel OURY

Professeur honoraire agrégé de génie électrique  
Association ANTEC  
135 Allée de Champlong, 38430 Moirans  
[michel.oury@tpline.fr](mailto:michel.oury@tpline.fr)

### Gil AUBERT

Professeur certifié de génie électrique  
Lycée de l'Essouriau, Les Ulis,  
Académie de Versailles  
[aubert.cgil@free.fr](mailto:aubert.cgil@free.fr)

**Résumé :** le projet TPLine (« des TP sur des systèmes distants en temps réel ») est porté par des enseignants avec l'aide de partenaires du monde de l'entreprise. Il permet aujourd'hui à des élèves du secondaire et des étudiants d'exploiter des données issues de mesures sur des systèmes et installations en exploitation (bras manipulateur chez Schneider Electric et station anémométrique de mesure du Mistral le long de la ligne de TGV Lyon-Marseille).

Les nouveaux programmes de STIDD et de Ssi ont permis le développement d'un nouveau TP autour de la notion d'efficacité énergétique active dans le domaine domestique. Nous décrirons, tout d'abord, le matériel de mesure mis en œuvre et son association avec le serveur TPLine, puis nous présenterons les activités proposées à l'élève : estimation de la consommation énergétique d'un réfrigérateur en fonctionnement en temps réel et analyse concernant l'opportunité d'en changer pour un modèle moins énergivore.

### 1. Sciences de l'ingénieur et développement durable : enfin !

Contrairement à ce que pensait Jean-Baptiste Say, les ressources naturelles ne sont pas inépuisables. La plupart des scientifiques sont aujourd'hui d'accord pour reconnaître que les ressources fossiles sont en quantité limitée. Leur seule divergence concerne maintenant la date limite de leur disparition.

De nombreux ouvrages traitent aujourd'hui de ce sujet et l'on s'y reportera pour une analyse détaillée. Les documents d'accompagnement des nouveaux programmes des baccalauréats STIDD introduisent ainsi ce qui relève du domaine de l'énergie :

«Le Développement Durable suppose, entre autre, une **utilisation optimale et réfléchie des ressources énergétiques disponibles. Au cours de l'étude de systèmes techniques, un regard critique sera porté sur leur efficacité énergétique...**Un des enjeux essentiels est d'améliorer le rendement.»

L'utilisation réfléchie, sortant du cadre de l'enseignement des STI, n'est pas réellement abordée dans les programmes et pourtant c'est bien grâce à cette réflexion que les japonais ont pu réduire leur consommation d'énergie après l'accident de Fukushima, au point d'arrêter brusquement 52 réacteurs nucléaires sur 54. Il ne leur a pas été possible, dans un laps de temps aussi court, d'optimiser à ce point l'utilisation de l'énergie.

L'essentiel du programme de STIDD, pour sa partie énergétique, va donc se pencher essentiellement sur les moyens d'optimiser les divers flux énergétiques, de l'extraction à la consommation et au recyclage. On peut citer une fois de plus le document d'accompagnement du programme :

«L'Efficacité Énergétique Passive intègre l'utilisation de produits performants qui tendent à limiter les pertes ou consommer moins d'énergie (l'isolation

des bâtiments, l'utilisation d'ampoules basse consommation, d'appareils technologiques économes...). L'Efficacité Énergétique Active propose des solutions pour réduire la facture énergétique (intégration de systèmes de régulation, d'automatismes, de mesures et contrôles...).

L'efficacité énergétique passive pourra donc être analysée, estimée, et critiquée, alors que **l'efficacité énergétique active pourra de plus être mesurée**. Le consommateur final, particulier ou entreprise, s'intéressera à la consommation des bâtiments, des moyens de transports, etc., tout système qu'il n'est pas si simple d'instrumenter.

La plateforme TPLine ([www.tpline.fr](http://www.tpline.fr)) propose des travaux pratiques en ligne pour permettre aux élèves d'effectuer des mesures à distance et en temps réel sur des systèmes réels. Les professeurs et les entreprises qui participent à TPLine vont donc instrumenter ces systèmes souvent inaccessibles ou d'accès difficile, voire dangereux et coûteux, et transmettre les résultats de ces mesures sur le serveur internet de TPLine où les élèves et leurs professeurs auront accès aux données brutes et à des travaux pratiques clés en main.

### 2. Mesure de l'énergie

Afin de pouvoir développer des Tps d'efficacité énergétique active sur des systèmes variés, nous avons retenu, après quelques essais, le matériel d'une entreprise anglaise, *CurrentCost*, pour les possibilités de gestion vers l'internet qu'il offre et son très faible coût. La mesure de l'énergie électrique consommée est en fait une mesure du courant appelé par une ligne d'alimentation. L'énergie qui en découle est obtenu par une simple multiplication de la valeur efficace de l'intensité IL de ce courant, par la tension efficace VL entre cette ligne et le neutre et par le temps écoulé  $\Delta t$ . On obtient ainsi l'énergie consommée en kWh.

Nous entendons d'ici les puristes nous rétorquer que la tension efficace entre ligne et neutre n'est pas réellement tout à fait constante ni la même partout, et que, dans le cas d'un appareil réactif, le  $\cos\phi$  n'est pas égal à 1. Nous considérerons donc qu'en première approximation les appareils grand public ne consomment que de l'énergie active. Dans le cas où un appareil aurait un  $\cos\phi$  inférieur à 1, il sera possible de modifier les paramètres du calcul sur le site internet, ce que ne permet pas le matériel de CurrentCost et que nous avons donc ajouté.

2.1. Constitution de la sonde.



Figure 1 : pince ampèremétrique

La partie acquisition du matériel CurrentCost est constituée de pinces ampèremétriques (figure 1) pouvant se fixer autour d'un câble de Ø12 mm maximum, parcouru par un courant alternatif sinusoïdal maximal de 80 A. La sensibilité de cette sonde est de 50 mA (données du fabricant).



Figure 2 : constitution de la pince ampèremétrique

Cette sonde est constituée (figure 2) :

- ▲ d'un **circuit magnétique** fermé autour du câble (voir ses dimensions figure 3),

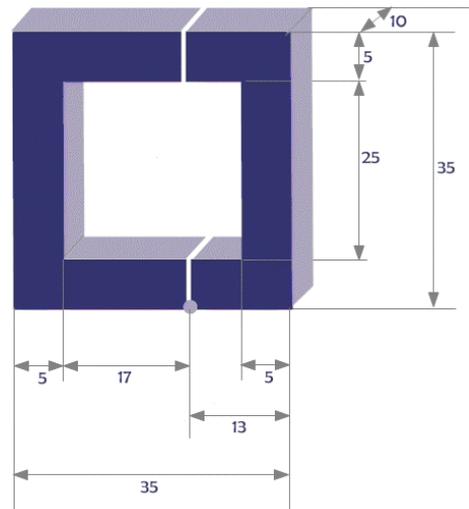


Figure 3 : dimensions du circuit magnétique

- ▲ d'une **bobine de fil** de 0,1 mm de diamètre placée autour du circuit magnétique dans un support rectangulaire en bakélite. Cette bobine a une dimension de 17,58 × 12,58 × 11,58 mm (L×l×h). Le passage du circuit magnétique rectangulaire se faisant à travers une surface de 10,48 × 5,33 mm.
- ▲ d'une **résistance R1** en parallèle avec la bobine marquée du code couleur suivant : orange, bleu, noir, noir, marron, soit 360 Ω à ±1% (figure 4).



Figure 4 : une résistance R1 est placée en parallèle aux bornes de la bobine

2.2. Fonctionnement de la sonde.

Le courant électrique à mesurer **IL** qui circule dans le câble crée un champ magnétique **H** dans le circuit en terre rare de la sonde (figure 5).

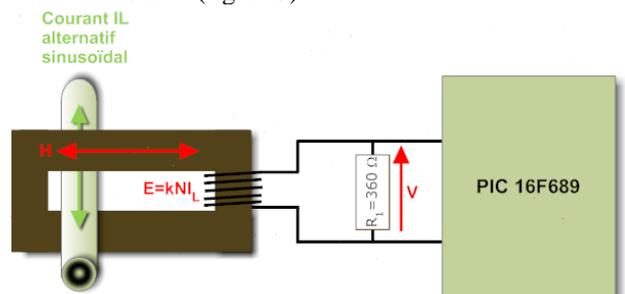


Figure 5 : association sonde et PIC

Ce champ magnétique est sinusoïdal, comme le courant qui l'a créé. En traversant les **N** spires de la bobine, il induit dans celle-ci une force-électromotrice **E** proportionnelle au courant **IL** et au nombre de spires **N**. La bobine agit donc comme un générateur de courant de résistance interne **Rg** (résistance de la bobine) qui débite dans la résistance **R1** placée en parallèle aux bornes de la bobine. Il apparaît donc aux bornes de cette résistance **R1** une tension **V** qui résulte du rapport du pont diviseur **Rg, R1** soit environ 1/2.

C'est cette tension **V** qui est mesurée par le transmetteur, dont la résistance d'entrée est suffisamment grande pour ne pas dérriver de courant et donc ne pas perturber le fonctionnement du pont diviseur **Rg, R1**.

### 3. Transmission de l'information mesurée

L'image en tension du courant efficace est transmise par deux fils à un boîtier nommé transmetteur. Ce transmetteur a pour fonction :

- ▲ de collecter les tensions mesurées par une, deux ou trois sondes placées sur des lignes distinctes,
- ▲ de convertir ces grandeurs analogiques en valeurs numériques à l'aide d'un processeur PIC (figure 5),
- ▲ de piloter par modulation un émetteur haute fréquence qui va transmettre les trois mesures à l'interface homme-machine (figure 6). Le boîtier d'interface permet de capter les informations en haute fréquence modulée en provenance au maximum de 10 transmetteurs différents, soit un maximum de 30 sondes.



Figure 6 : la chaîne d'information

#### 3.1. Constitution du transmetteur

Le transmetteur TRANSM7S intègre un émetteur RF (Bande SRD 433MHz). L'émetteur est alimenté par une batterie de 3V avec une durée de vie de sept ans. Il a été conçu pour être aussi facile et sûr à installer que possible. L'émetteur envoie les informations à plus de 30 mètres et dispose de plus de 4.000 variantes de code pour assurer la sécurité des informations (notice du fabricant).

Les données reçues des sondes sont filtrées et mises en forme avant d'être envoyées sur les entrées d'un microprocesseur PIC16F689.

Le transmetteur dispose d'un bouton de réinitialisation et d'une diode électroluminescente rouge, placés tous deux en face avant. La diode clignote

à chaque mesure de courant, soit toutes les 6 secondes. C'est donc à ce rythme périodique de 6 secondes que chaque transmetteur lit les trois tensions en provenance des trois sondes qui peuvent lui être connectées et les envoie au récepteur.

Pour des informations complètes sur le PIC voir le site de microchip :

<http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en023113>

#### 3.2. Fonctionnement du transmetteur

Le transmetteur lit ses trois entrées toutes les 6 secondes. Les tensions **V1, V2** et **V3** lues sont des tensions alternatives sinusoïdales proportionnelles aux courants dans les lignes correspondantes, soit **I1, I2** et **I3**. Le microprocesseur PIC admet sur ses entrées de conversion analogique-numérique des tensions continues d'amplitude maximale comprise entre 0V et sa tension de référence **Vref**, ici égale à 2,5V (compte tenu de l'alimentation de 3V réalisée avec les deux piles de 1,5 V en série).

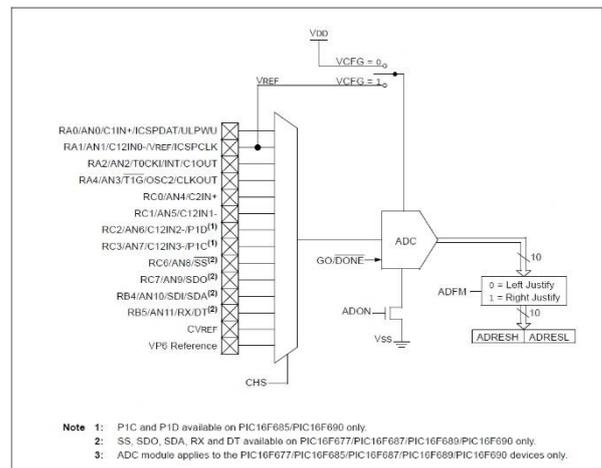


Figure 7 : la partie CAN du microprocesseur PIC

La conversion se fait de façon multiplexée (figure 7) :

- ▲ chaque tension d'entrée  $V_i$  est envoyée, au travers du multiplexeur, vers un dispositif d'échantillonnage et de blocage,
- ▲ la tension ainsi lue et bloquée est alors convertie en une valeur numérique sur 10 bits, à l'aide d'un convertisseur à approximations successives. Il faut dans tous les cas 11 périodes de l'horloge **TAD** utilisée par le convertisseur pour réaliser une conversion complète de l'une des tensions d'entrée. Selon le choix de la période d'horloge utilisée pour cette conversion (**TAD** est un sous multiple de la fréquence du quartz utilisé), une conversion totale prendra entre 1 et 700  $\mu$ s environ. Soit pour nos trois tensions d'entrée un grand maximum de 3 ms, tout inclus.

Le microprocesseur va donc pouvoir lancer des conversions analogiques-numériques pour traiter les informations d'entrée, puis s'en servir pour moduler le signal radio fréquence. Ce dernier est réalisé à l'aide

d'un module intégré qui exploite le protocole Wireless M-Bus.

Wireless M-Bus est le standard de communication pour l'AMR (Automatic Meter Reading), permettant d'optimiser la lecture automatique et le contrôle à distance des compteurs (smart metering). C'est une norme radio à l'intérieur des systèmes M-Bus pour la lecture des compteurs d'eau, d'électricité et de gaz. La transmission des données se fait dans les bandes SRD 868 MHz ou ISM 433 MHz. Le module CurrentCost travaille donc dans la bande 433 MHz ISM (Industriel, Scientifique, Médical) dont l'un des principaux avantages est, outre le fait d'être autorisé sans obligation administrative, pour les modules qui l'utilisent, une très faible consommation d'énergie.

### 3.3. Fonctionnement du récepteur EnviR

Les informations transmises par radio sont collectées par le récepteur EnviR qui va afficher sur son écran à cristaux liquides la totalité des énergies consommées par chaque émetteur ainsi que le coût qu'elle représente. Pour arriver à ce résultat, il faut lui indiquer :

- ▲ la valeur efficace de la tension monophasée d'alimentation (par exemple 230 V),
- ▲ les horaires des tarifs jour et nuit. Ce boîtier mesure également la température de l'endroit où il est posé, et indique sous la forme d'un graphe à barres la somme des énergies consommées suivant certaines plages horaires (nuit, jour, soir), etc. (voir figure 8).



Figure 8 : le boîtier EnviR d'interface homme-machine

Le principal inconvénient de cette interface homme-machine est la grande difficulté à exploiter toute la précision des informations reçues et l'impossibilité de remonter dans le temps sur plusieurs jours, plusieurs semaines ou plusieurs mois.

En effet, un écran n'indique que la somme des énergies des sondes connectées à chaque émetteur pour les trois zones temporelles, nuit, jour et soir. Il est donc impossible de connaître la consommation énergétique d'une ligne d'un émetteur, à moins qu'elle ne soit la seule reliée à celui-ci. En outre le réglage de la tension efficace du réseau ne peut se faire que par pas de 10 volts.

Heureusement, ce boîtier est communicant : un cordon permet de le relier à un ordinateur. Côté EnviR, on dispose d'un connecteur RJ45 et côté ordinateur d'une entrée USB/RS232. Il est donc nécessaire d'installer sur l'ordinateur le pilote USB/RS232 qui fera apparaître cette liaison USB comme s'il s'agissait d'une entrée RS232 (pilote Prolific 2303). Toutes les informations nécessaires au téléchargement et à la mise en place du pilote sont disponibles sur le site de CurrentCost : <http://currentcost.com/software-downloads.html>

Une notice complète concernant l'installation de ce pilote est également téléchargeable (en anglais : [InstallingthedriverfortheCurrentCostDataCable.pdf](#))

Un logiciel disponible en ligne permet alors de collecter les informations en provenance de tous les émetteurs et de les envoyer en mode ftp vers le serveur de votre choix.

L'ensemble ainsi installé permet la récupération des données de mesure de chaque ligne, mesures faites toutes les 6 secondes, avec un intervalle de collecte re-définissable, et que nous avons fixé à une minute (figure 9).

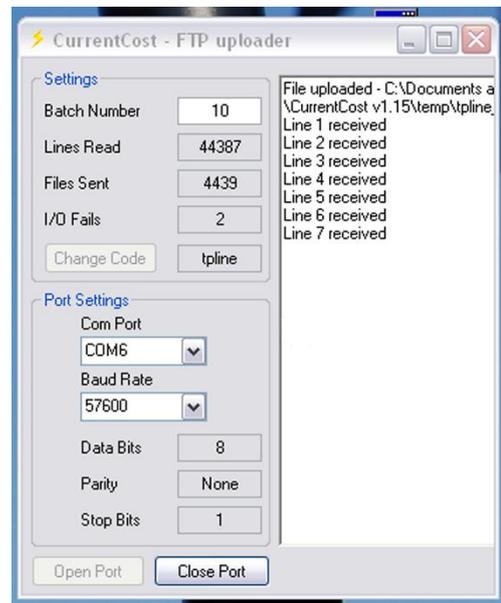


Figure 9 : collecte des informations toutes les 6 secondes via un port RS232 (COM6) à 57600 Bauds et envoi vers le serveur toutes les minutes en mode ftp.

Les données collectées sont des fichiers xml. Elles sont analysées par un programme php sur le serveur qui va ranger ces mesures dans une table accessible par

MySQL. Il est alors possible de mettre au point des pages de travaux pratiques pour internet qui utilisent ces mesures. On peut tracer une ou plusieurs lignes de mesures, dans un intervalle de temps modifiable, récupérer des données issues des journées précédentes, effectuer des bilans, etc (figure 10 par exemple).

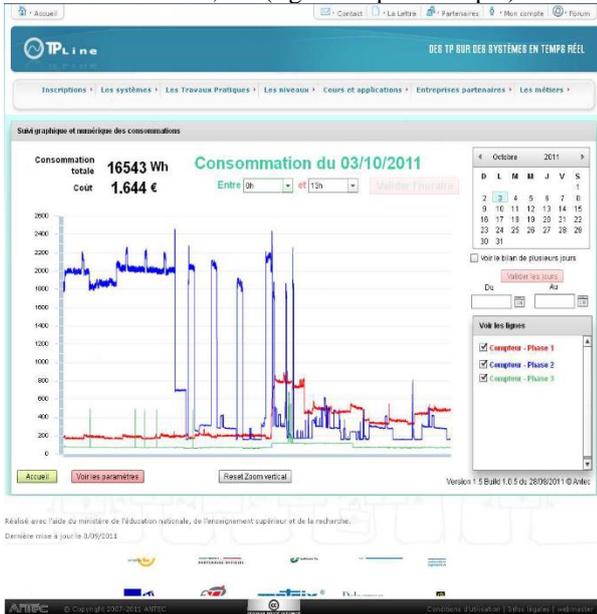


Figure 10 : exemple de tracé de plusieurs relevés sur un système avec alimentation triphasée

Un premier TP est d'ores et déjà disponible sur TPLine : <http://www.tpline.fr/fr/CC/tp9/index.php> L'objectif est ici de permettre aux élèves de mesurer en ligne, en temps réel, la consommation électrique d'un réfrigérateur afin de déterminer s'il est énergivore et s'il est économiquement rentable d'en changer.

#### 4. TP « Ce réfrigérateur est-il énergivore ? »

Un particulier, domicilié dans un appartement au sud de l'Ile-de-France, souhaite savoir ce que lui coûte l'utilisation de son réfrigérateur afin d'envisager éventuellement son remplacement. Il installe donc sur la ligne d'alimentation de ce réfrigérateur une pince ampèremétrique *CurrentCost* reliée à un émetteur qui envoie les informations au transmetteur *EnviR*.

Ce dernier transmet par une liaison ftp (File Transfert Protocol) les données lues au serveur de TPLine. Il est alors possible au propriétaire du réfrigérateur de suivre, en temps réel, la consommation électrique de cet appareil et de récupérer les données archivées sur le serveur de TPLine les jours précédents.

Les mesures sont effectuées toutes les 6 secondes, regroupées dans le bloc *EnviR*, et envoyées au serveur de TPLine toutes les minutes (figure 11).

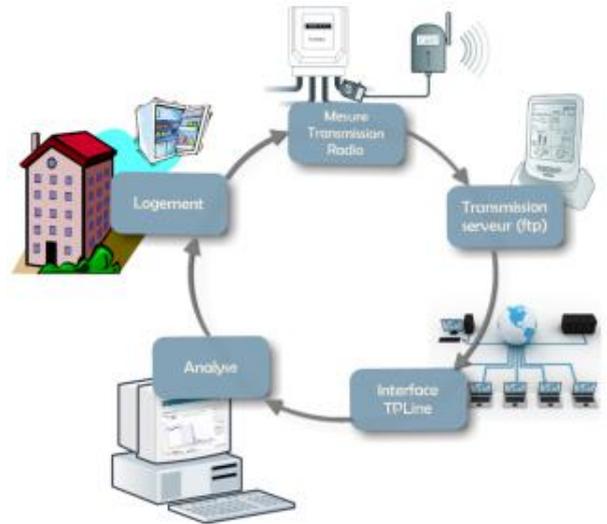


Figure 11 : transmission des données

L'utilisateur dispose également de la documentation technique de cet appareil, fournie par son fabricant.

On se propose donc d'analyser les performances du réfrigérateur, puis à partir des mesures faites en temps réel et en temps différé, d'estimer son coût d'usage et ainsi d'envisager son remplacement par comparaison avec des appareils plus récents.

**ATTENTION**

Ligne 2 : PC/A-Cuillère + réfrigérateur

Depuis le 27/10/2011, le réfrigérateur est sur la ligne 2 avec des prises 16A et une cafetière.

3.3. Analysez ci-dessous la différence entre votre calcul et la valeur donnée par le système de mesure le 25/09/2011. (donc vous négligez et excluez dans votre compte-rendu).

Commentez votre réponse ici.

Figure 12\_1 : exemple de page d'écran du TP en ligne.

Chaque page permet à l'élève de progresser dans ce travail pratique mis au point par un professeur de la spécialité. Après avoir analysé la consommation périodique du réfrigérateur distant, il doit calculer sa consommation moyenne annuelle et la comparer à celle indiquée sur la fiche technique du fabricant pour en tirer une conclusion.

**TP : Maîtrise de la consommation électrique**

**Détermination de la consommation électrique annuelle du réfrigérateur.**

Vous devez maintenir du moyen à long terme de façon assez précise les consommations, mesurer ponctuellement, et annuellement, en énergie du réfrigérateur.

4.1 Finissez appuyant sur les relevés des jours précédents, par exemple celui-ci vous indique la consommation par le réfrigérateur durant le mois de mai 2011 (20 et le 30 septembre 2011), ou bien en vous appuyant sur les relevés de ces jours-ci, donnez une valeur moyenne approximative de l'énergie consommée chaque jour par le réfrigérateur.

4.2 Du lundi 26/09 au jeudi 26/09, les mesures révèlent une utilisation particulière du réfrigérateur. Quelle en est la justification ?

4.3 Calculez l'énergie totale consommée sur une année par le réfrigérateur (hors période de congélation). Exprimez cette énergie en kWh (Wh/Année).

Valider vos choix

Voir les courbes de consommation

Figure 12\_2 : exemple de page d'écran du TP en ligne.

Puis en se basant sur des comparatifs de consommation énergétique, il lui faut décider de remplacer ou non ce réfrigérateur par un modèle plus récent et moins énergivore, après avoir fait un calcul de retour sur investissement (figures 12\_1, 2 & 3).

**TP : Maîtrise de la consommation électrique**

**Recherche d'un réfrigérateur de remplacement**

Touten est un site qui rassemble par axes les appareils les plus performants (en termes d'efficacité énergétique). Pour chaque catégorie, les produits sont comparés à un produit non référencé, c'est à dire l'énergie qui serait consommée en mode de fonctionnement standard. Le réfrigérateur étudié dans cette activité, acheté en 2008, avec 272 kWh/an est l'un des plus performants disponibles.

5.1 Choisissez sur ce site 3 réfrigérateurs pouvant assurer le même service que le réfrigérateur actuel.

Référence	CAT (kWh)	CARP (kWh)
1er choix	...	...
2ème choix	...	...
3ème choix	...	...

Indice d'efficacité énergétique: 21,9 vs 29,3  
 Étiquette énergie: A+++ vs A++  
 Consommation électrique (kWh/an): 160 vs 201

6.2 Que signifie selon vous l'indice d'efficacité énergétique qui apparait dans cette classification ?

Valider vos choix

Voir les courbes de consommation

Figure 12\_3 : exemple de page d'écran du TP en ligne.

Si l'élève n'a pas le temps de terminer ce TP pendant la séance en classe, il peut le finir chez lui ou à la bibliothèque puisque tout son travail reste enregistré dans la base de données de TPLine.

A la fin du TP, dès qu'il validera son travail, il recevra un compte-rendu de celui-ci, ainsi qu'un corrigé type. Son professeur recevra également par courriel le compte-rendu de son travail.

Ce TP est disponible, gratuit, et sera sans doute amélioré grâce aux remarques de ses utilisateurs.

Un autre TP est en phase d'étude et portera sur l'analyse comparative d'un chauffage central mixte bois/fioul (figure 13). L'élève pourra accéder en temps réel au fonctionnement de la chaudière : consommation de la pompe de fioul, température de l'eau du circuit de chauffage en trois points, sortie chaudière, retour du

circuit de chauffage et sortie de la vanne mélangeuse vers les radiateurs. Il aura également accès à toutes les informations météorologiques en temps réel à proximité de ce pavillon, ainsi qu'à la température d'une pièce témoin.

**TP : Etude d'un chauffage central mixte Fioul/Bois**

**Etude d'un chauffage central mixte, Fioul/Bois.**

Présentation du système. Travail pratique : Présentation. Liste des documents.

1. Réglage de la vanne mélangeuse  
 2. Réglage de la température de l'eau de chauffage  
 3. Mesure de la température de l'eau de chauffage  
 4. Mesure de la température de l'eau de chauffage en trois points  
 5. Mesure de la température de l'eau de chauffage en trois points

Figure 13 : un nouveau TP se met en place pour les élèves de terminale STIDD.

Si vous souhaitez participer à l'élaboration de ce scénario pédagogique pour les classes de première et de terminale STIDD, contactez : [pedago@tpline.fr](mailto:pedago@tpline.fr)

D'autres scénarios sont également à l'étude pour les élèves du cycle primaire (deux écoles et une ferme pédagogique y travaillent) afin de sensibiliser les élèves aux problèmes d'économie d'énergie.

**5. En savoir un peu plus sur TPLine**

TPLine est géré par une équipe de professeurs et de partenaires industriels au sein de l'association ANTEC (loi de 1901 à but non lucratif).

TPLine a pu fonctionner grâce à deux aides financières successives du Ministère de l'Education Nationale (Sous-Direction des TICE) et à celles de ses divers partenaires industriels (SNCF, Schneider-Electric, Chauvin-Arnoux, CampBell Scientific, etc.).

Plusieurs établissements lui apportent chaque année leur soutien en devenant partenaires (89 €/an).

Vous trouverez également sur le site de TPLine des cours de SI interactifs, sous forme de fiches avec animations, de e-book au format pdf et de séances de formation enregistrées (Labview et ingénierie des systèmes). Un applicatif sur les asservissements est également téléchargeable.

TPLine est membre de UNIT et de e-OMed et participe au projet d'initiative d'excellence uTop Montagne (création de formations sur les métiers techniques de la Montagne) déposé par UNIT. Le projet uTop (Université de Technologie Ouverte Pluripartenaire) est un démonstrateur d'université de technologie ouverte pour la formation à distance des ingénieurs et techniciens supérieurs. Si vous souhaitez vous associer à TPLine pour travailler sur ces projets contactez Michel Oury : [michel.oury@tpline.fr](mailto:michel.oury@tpline.fr).

## L'électricité pas toujours maîtrisée

**Lionel SIMONOT**

École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers

Spécialité "Energie" / Parcours "Éclairage, acoustique, thermique"

1, rue Marcel Doré - 86022 POITIERS CEDEX

lionel.simonot@univ-poitiers.fr

**Résumé :** Des notions de base d'électricité ne sont pas toujours maîtrisées par des étudiants pourtant en école d'ingénieurs. L'objectif de cet article est, dans un premier temps, de lister quelques unes des erreurs les plus fréquentes commises par les étudiants, et d'en comprendre l'origine afin de mieux les prévenir. Dans un deuxième temps, nous montrerons que quelques grands principes de dimensionnement et de transport électrique se déduisent à l'aide de schémas et calculs relativement simples.

Il en est de l'enseignement de l'électricité comme de d'autres domaines, les sujets qui semblent les plus communs ne sont pas forcément ceux qui sont enseignés en priorité. Ainsi, les notions de base de transport et de dimensionnement électrique sont peu abordées dans les premières années d'études scientifiques. Par exemple, ces aspects ne constituaient pas une compétence spécifiquement exigée à l'école nationale supérieure d'ingénieurs de Poitiers avant que des anciens élèves nous signalent des lacunes de la formation dans ce domaine. Ce constat nous a amenés à proposer depuis 2010 un enseignement sur « la distribution et la conversion de l'énergie électrique » en 2<sup>ème</sup> année pour le diplôme « énergie » de l'école. Les TD, que nous avons assurés dans cette matière, nous ont révélé quelques « grosses » erreurs inattendues de la part d'étudiants de ce niveau. Ce ne sont ni les connaissances, ni l'habileté calculatoire – parfois remarquable pour les meilleurs étudiants – qui sont à remettre en cause. Les origines de ces erreurs sont davantage liées à de fausses intuitions, à des représentations erronées, à des formules connues mais non maîtrisées...

Le but de cet article est double : mettre l'accent sur ces erreurs afin de mieux les prévenir, et présenter de manière très simple quelques grands principes concernant le transport et le dimensionnement de l'électricité<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> De nombreuses références traitent de ces thématiques de manière beaucoup plus approfondie. On peut citer :

- sur le transport électrique : Luc Lasne, *Electrotechnique*, ed. Dunod 2008 dont le chapitre sur les réseaux électriques est accessible sur le web : [www.dunod.com/document/9782100507207/50720\\_ChapSu\\_ppl.pdf](http://www.dunod.com/document/9782100507207/50720_ChapSu_ppl.pdf)

### 1. Valeurs moyennes et valeurs efficaces

La première question posée aux étudiants concerne la tension que le distributeur d'électricité nous fournit et que nous pourrions mesurer aux bornes d'une prise électrique. Il n'y a aucun doute chez les étudiants : cette tension est alternative, de fréquence<sup>2</sup> 50Hz. En revanche, lorsque nous leur demandons la valeur moyenne de cette tension, la quasi-totalité des réponses est 230V (ou parfois 220V voire 380V) ! Il y a certainement là un effet « âge du capitaine » qui consisterait à donner comme réponse la première valeur « crédible » (la réponse 0V est forcément un peu suspecte). Mais cela témoigne aussi de la mauvaise appréhension par les étudiants, même en 2<sup>ème</sup> année d'école d'ingénieurs, des notions de valeurs moyennes et efficaces pourtant essentielles pour quantifier l'amplitude d'un signal alternatif.

La confusion peut se produire dans l'autre sens, lorsque nous demandons aux étudiants la nature de la puissance de 18W affichée par exemple pour un tube fluorescent. La plupart des étudiants associent bien cette puissance consommée à une puissance active. Par contre, rares sont ceux qui savent la calculer (ou la mesurer) en considérant la valeur moyenne de la puissance instantanée. Certains sont même tentés de répondre qu'il s'agit d'une « puissance effective » alors que cette grandeur n'a pas de sens physique (sans doute l'aspect quadratique est plus facilement associé à la notion de puissance ?).

- sur le dimensionnement électrique : Schneider électrique (Christophe Prévé, Robert Jeannot), *Guide de conception des réseaux électriques industriels*, 1997.

<sup>2</sup> La période du signal  $T=20\text{ms}$  est beaucoup moins connue et mériterait à l'être davantage car elle offre un repère utile dans l'échelle de temps.

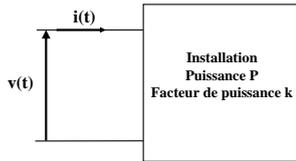


Schéma en monophasé (encadrés A, B et C)

Tension $v(t)$ et courant $i(t)$ alternatifs de période $T$			A
On peut définir les grandeurs suivantes :			
Valeur efficace de la tension	$V = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt}$	(en V)	
Valeur efficace du courant	$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}$	(en A)	
Puissance instantanée	$p(t) = v(t)i(t)$		
Puissance active	$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt$	(en W)	
Puissance apparente	$S = VI$	(en VA)	
Facteur de puissance	$k = \frac{P}{S}$		

## 2. L'alternatif n'est pas toujours sinusoïdal...

Une autre grande confusion existe entre signal alternatif et signal sinusoïdal. Il faut bien le reconnaître cette confusion est savamment entretenue par nous, enseignants en électricité, mais aussi dans les livres de cours, d'exercices... Notre message est le suivant : en électricité, tous les signaux alternatifs sont sinusoïdaux... sauf si l'on vous dit le contraire !

De fait, il est difficile de reprocher aux étudiants d'avoir oublié que, derrière la formule  $V_{max} = \sqrt{2}V$ , il y a l'hypothèse sinusoïdale<sup>3</sup>. De même, pour adopter une écriture complexe ou pour effectuer un diagramme de Fresnel, les signaux considérés doivent être sinusoïdaux. Pour ces formalismes (écriture complexe, diagramme de Fresnel) s'ajoute une convention spécifique à l'électricité : ce sont les valeurs efficaces (et non les valeurs maximales) qu'il faut utiliser !

<sup>3</sup> A la question « quelle est l'amplitude maximale d'une tension de valeur efficace  $V=230V$  ? », il est étonnant de noter que, même lorsque la formule  $V_{max} = \sqrt{2}V$  est connue, la

En outre, alors que la puissance active  $P$  peut se calculer directement à partir de la puissance instantanée quelle que soit la nature des signaux (sinusoïdaux ou non), ce n'est pas le cas pour la puissance réactive  $Q$ . Cette dernière n'est strictement définie que lorsque  $v(t)$  et  $i(t)$  sont sinusoïdaux par l'expression  $Q=VI \sin \varphi$  ( $\varphi$  étant le déphasage entre  $i(t)$  et  $v(t)$ ). Enfin, le terme «  $\cos \varphi$  » est très couramment employé par les professionnels pour désigner le facteur de puissance d'une installation alors qu'il n'y a strictement égalité que lorsque  $v(t)$  et  $i(t)$  sont sinusoïdaux.

Tension $v(t)$ et courant $i(t)$ sinusoïdaux de période $T$ (et donc de pulsation $\omega = 2\pi/T$ )		B
On considère généralement la tension pour l'origine des phases.		
	$v(t) = V\sqrt{2} \sin(\omega t)$	
	$i(t) = I\sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi)$	
V et I sont les valeurs efficaces de la tension et du courant et $\varphi$ , le déphasage de $i(t)$ par rapport à $v(t)$ . Les relations ci-dessous peuvent se calculer à partir des expressions données dans l'encadré A (à l'exception de la puissance réactive Q définie dans le cas sinusoïdal).		
Puissance instantanée	$p(t) = VI(\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi))$	
Puissance active	$P = VI \cos \varphi$	(en W)
Puissance réactive	$Q = VI \sin \varphi$	(en VAR)
Puissance apparente	$S = VI = \sqrt{P^2 + Q^2}$	(en VA)
Facteur de puissance	$k = \cos \varphi$	
<b>Écriture complexe</b>	<b>Diagramme de Fresnel</b>	
$\underline{V} = V$ $\underline{I} = Ie^{-j\varphi}$	 Exemple d'une charge inductive ( $\varphi < 0$ - courant en retard de phase)	
On peut également définir une puissance complexe :		
	$\underline{S} = \underline{V} \cdot \underline{I}^* = Se^{+j\varphi} = P + jQ$	
<b>Théorème de Boucherot</b> : La puissance active d'un système est la somme des puissances actives des éléments le constituant. Il en est de même pour la puissance réactive et pour la puissance complexe (mais ce n'est généralement pas le cas pour la puissance apparente).		

L'exemple suivant (tension sinusoïdale mais courant non sinusoïdal) permet de formaliser par des calculs relativement simples l'influence des harmoniques sur les puissances.

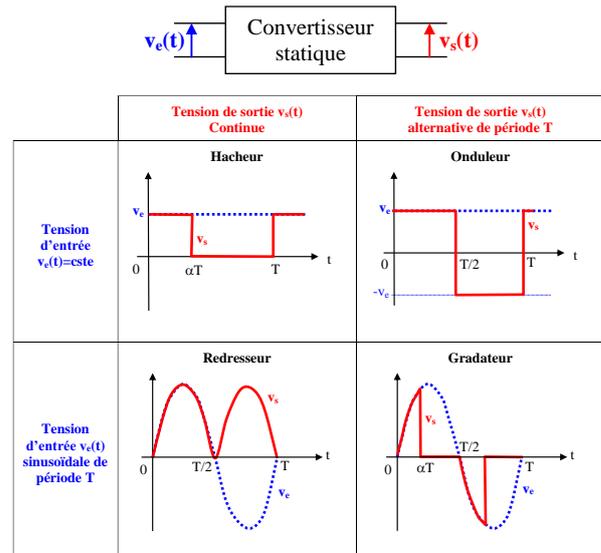
réponse donnée de manière instinctive, est très souvent  $380V (= \sqrt{3} \cdot 220V)$  ou  $400V (= \sqrt{3} \cdot 230V)$ . Sans calculatrice, la véritable valeur 325V est véritablement méconnue.

Tension sinusoïdale $v(t)$ et courant $i(t)$ alternatif mais non sinusoïdal de même période $T$		C
$v(t) = V\sqrt{2} \sin(\omega t)$ $i(t) = \sum_{n=1}^{+\infty} I_n \sqrt{2} \sin(n\omega t - \varphi_n)$ <p><math>i(t)</math> est décomposé en série de Fourier avec <math>I_n</math>, la valeur efficace et <math>\varphi_n</math>, le déphasage par rapport à la tension, de l'harmonique <math>n</math> de pulsation <math>n\omega</math>.  <math>n=1</math> correspond au fondamental de pulsation <math>\omega</math>.                      On appelle THD (Total Harmonic Distorsion), la grandeur suivante :</p> $THD = \sqrt{\sum_{n=2}^{+\infty} I_n^2} / I_1$ <p>Les relations ci-dessous peuvent se calculer à partir des expressions données dans l'encadré A (à l'exception de la puissance réactive <math>Q</math> dont la définition est généralisée ici au cas non sinusoïdal).</p>		
Valeur efficace du courant	$I = \sqrt{\sum_{n=1}^{+\infty} I_n^2}$	(en A)
Puissance active	$P = VI \cos \varphi_1$	(en W)
Puissance réactive	$Q = VI \sin \varphi_1$	(en VAR)
Puissance apparente	$S = VI$	(en VA)
Facteur de puissance	$k = \frac{\cos \varphi_1}{\sqrt{1 + THD^2}}$	
Contrairement au cas sinusoïdal, $S^2 \neq P^2 + Q^2$ , c'est pourquoi est définie la puissance déformante $D$ telle que $S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$ .		
Puissance déformante	$D = VI_1 THD$	(en VAD)

### 3. ...et le continu n'est pas toujours constant

Dans le même esprit, une autre ambiguïté existe entre signal continu et signal constant (indépendant du temps). Le terme français « continu » est pour le moins ambivalent, le terme « unidirectionnel » (ou le terme anglais « direct current ») serait davantage adapté. Un courant continu est donc un courant qui ne change pas de sens mais dont l'amplitude peut varier périodiquement au cours du temps. Un courant constant n'est finalement qu'un cas particulier de courant continu.

Ces définitions sans restrictions d'un signal alternatif et d'un signal continu sont indispensables pour aborder les 4 fonctions principales des convertisseurs statiques (hacheur, redresseur, onduleur et gradateur). Ces éléments permettent d'adapter la nature du signal d'alimentation à un récepteur donné (à titre d'exemples, transformation du courant continu produit par des panneaux photovoltaïques en courant alternatif 50Hz, transformation de la tension secteur en tension continue pour alimenter des appareils à composants électroniques...).



Représentations de  $v_e(t)$  et  $v_s(t)$  pour les convertisseurs statiques les plus classiques. Dans les cas du hacheur et du gradateur, le choix de  $\alpha$  permet de contrôler respectivement la valeur moyenne et la valeur efficace de la tension de sortie

### 4. La formule magique du triphasé

Bien que le triphasé soit évidemment plus complexe à formaliser que le monophasé, il faut noter une assez bonne connaissance par nos étudiants des définitions comme celle d'un système triphasé équilibré (système de trois tensions ou courants sinusoïdaux, de même fréquence, même amplitude et déphasés entre eux de  $2\pi/3$ ). En revanche, l'application de la formule  $P = \sqrt{3}UI \cos \varphi$  se révèle souvent bien plus hasardeuse. Il faut déjà savoir que  $P$  est la puissance active totale sur les trois phases, que  $U$  et  $I$  sont des valeurs efficaces (cf. paragraphe 1), que  $U$  se rapporte à la tension composée entre phases et  $I$  le courant de ligne. Et contrairement à ce que suggère la formule, le déphasage  $\varphi$  n'est pas entre le courant  $i(t)$  et la tension composée  $u(t)$  mais entre le courant de ligne  $i(t)$  et la tension simple  $v(t)$ . Enfin les hypothèses masquées derrière cette formule sont que les tensions  $v(t)$  forment un système triphasé équilibré mais aussi les courants  $i(t)$ , c'est-à-dire que la charge triphasée est également équilibrée. Dans la plupart des exercices, le terme « équilibré » concerne implicitement et les sources et les charges ce qui permet de simplifier le problème à l'aide d'un schéma monophasé équivalent. Là encore, il serait judicieux de bien préciser cette hypothèse d'autant plus que l'étude des déséquilibres (généralement sur la charge) fait partie des exercices classiques d'électrotechnique.

**Système de tension triphasé équilibré** D

$$\begin{cases} v_1(t) = V\sqrt{2} \sin(\omega t) \\ v_2(t) = V\sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_3(t) = V\sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases}$$

On montre que les tensions composées forment également un système de tensions équilibré (cf. diagramme de Fresnel associé) :

$$\begin{cases} u_{12}(t) = v_1(t) - v_2(t) = U\sqrt{2} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) \\ u_{23}(t) = v_2(t) - v_3(t) = U\sqrt{2} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6} - \frac{2\pi}{3}\right) \\ u_{31}(t) = v_3(t) - v_1(t) = U\sqrt{2} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6} - \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases}$$

avec  $U = \sqrt{3}V$

**Si la charge triphasée est équilibrée** E

La charge triphasée est dite équilibrée lorsque les impédances sont les mêmes sur les trois phases. Les courants de ligne, appelés  $i_{1,2,3}(t)$ , forment alors un système de courants triphasé équilibré.

Il en est de même pour les courants de phase, appelés  $j_{12,23,31}(t)$ , et définis pour un couplage triangle. Les valeurs efficaces des courants de ligne I et de phase J sont reliées par l'expression :  $I = \sqrt{3}J$ . Les puissances totales actives et réactives peuvent être déterminées en utilisant le théorème de Boucherot selon le couplage choisi :

**Couplage étoile**

$$\begin{aligned} P &= 3VI \cos \varphi \\ Q &= 3VI \sin \varphi \\ S &= 3VI \end{aligned}$$

**Couplage triangle**

$$\begin{aligned} P &= 3UJ \cos \varphi \\ Q &= 3UJ \sin \varphi \\ S &= 3UJ \end{aligned}$$

**Formules générales** (ne nécessitant pas de préciser le couplage choisi)

Puissance instantanée	$p(t) = \sqrt{3}UI \cos \varphi$	
Puissance active	$P = \sqrt{3}UI \cos \varphi$	(en W)
Puissance réactive	$Q = \sqrt{3}UI \sin \varphi$	(en VAR)
Puissance apparente	$S = \sqrt{3}UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$	(en VA)
Facteur de puissance	$k = \cos \varphi$	

**5. Notions de base sur le dimensionnement électrique**

A partir des notions évoquées dans les paragraphes précédents (souvent étiquetés comme « rappels » dans les livres), il est possible d'aborder très simplement quelques aspects d'un dimensionnement électrique. Le premier calcul à faire est souvent de déterminer la valeur

efficace I du courant qui circule dans les conducteurs connaissant généralement la valeur efficace de la tension d'alimentation (V pour la tension monophasée ou U pour la tension composée en triphasé), la puissance active consommée P et le facteur de puissance k de l'installation :  $I = P / V k$  en monophasé ou  $I = P / \sqrt{3} U k$  en triphasé avec tensions et charges équilibrées.

Une fois la valeur efficace du courant déterminée, il faut minimiser d'abord les pertes en ligne, puis la chute de tension. Pour cela, les étudiants acceptent très bien que le modèle d'un câble électrique d'impédance nulle ne soit pas satisfaisant lorsque les longueurs en jeu dépassent la centaine de mètres.

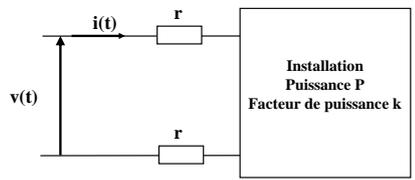


Schéma en monophasé pour le calcul des pertes en ligne (encadré F)

**Pertes en ligne** F

On considère une alimentation monophasée :  $I = \frac{P}{V k}$ .

Pour le calcul des pertes en ligne, il faut tenir compte de la résistance r des conducteurs. On peut alors exprimer les pertes en ligne (le facteur 2 correspond aux pertes en ligne pour la phase et pour le neutre) :

$$P_{\text{ligne}} = 2rI^2 = 2 \frac{rP^2}{V^2 k^2}$$

Cette formule très simple permet de comprendre comment diminuer les pertes en ligne

- **au niveau de la distribution** : il faut avoir une très grande tension V. C'est pourquoi on utilise des lignes haute tension pour transporter l'électricité (jusqu'à 400kV – tension composée en triphasé – en France pour le HTB) mais il faut ensuite revenir à des tensions raisonnables à l'aide de transformateurs pour distribuer localement l'électricité.
- **au niveau des câbles**, il faut avoir une faible résistance r. Pour un conducteur métallique de résistivité  $\rho$ , de longueur L et de section S :  $r = \rho L / S$

Il faut donc choisir un métal de faible résistivité (en pratique, le cuivre ou l'aluminium), minimiser la longueur du trajet, et augmenter le cas échéant la section des fils (toutefois le poids, le coût et les risques de rupture augmentent).

- **au niveau de l'installation**, il faut avoir un facteur de puissance k maximal. Les distributeurs d'électricité pénalisent d'un point de vue tarifaire les installations présentant des faibles facteurs de puissance.

Un point qui peut paraître évident mais qui n'est peut-être pas inutile à rappeler : dans un but d'économiser la puissance totale consommée – pertes en ligne comprises – il est important de ne pas perdre le sens des priorités. Par exemple, les lampes à incandescence sont purement résistives et offrent donc un facteur de puissance égal à 1, meilleur que celui des lampes fluocompactes ... mais leur efficacité lumineuse est aussi 4 fois plus faible. Il faut donc d'abord trouver le système le plus efficace c'est-à-dire celui qui

consomme le moins de puissance active P pour le même service rendu et, dans un deuxième temps, optimiser si nécessaire le facteur de puissance. La plupart des installations étant plutôt inductives, la façon la plus simple de compenser la puissance réactive est de placer un condensateur en tête de l'installation.

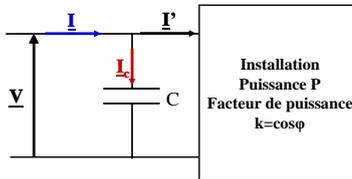


Schéma pour le calcul de la capacité pour compenser la puissance réactive (cas monophasé sinusoïdal - encadré G)

**Compensation de la puissance réactive** G

On considère une alimentation monophasée sinusoïdale et le cas très fréquent d'une charge inductive : le courant  $i(t)$  est déphasé de  $\varphi > 0$  par rapport à  $v(t)$ .

Il faut noter (cf. encadré B) que l'installation sans condensateur appelle un courant de valeur efficace  $I = P / (V \cos \varphi)$  et consomme une puissance réactive  $Q = P \tan \varphi$ . Si le facteur de puissance  $\cos \varphi$  est trop faible, la puissance réactive peut être compensée en ajoutant un condensateur en parallèle à cette charge. Le facteur de puissance peut alors être amené vers une valeur  $\cos \varphi'$  plus acceptable (EDF recommande, par exemple, la valeur 0,92). En amont, l'installation appelle un courant de valeur efficace  $I' = P / (V \cos \varphi')$  et consomme une puissance réactive totale  $Q' = P \tan \varphi'$ . La puissance active P reste inchangée.

Un courant  $i_c(t)$  circule dans le condensateur tel que  $i_c(t) = C \frac{dV}{dt}(t) \rightarrow I_c = C \omega V$

Le condensateur produit une puissance réactive  $Q_c = -C \omega V^2$ .

La valeur de la capacité peut être trouvée

- soit à l'aide du diagramme de Fresnel, par projection de la loi des nœuds :  $I_c = C \omega V = I \sin \varphi - I' \sin \varphi'$
- soit en faisant le bilan des puissances réactives (théorème de Boucherot) :  $Q_c = -C \omega V^2 = Q' - Q$

$$C = \frac{P}{\omega V^2} (\tan \varphi - \tan \varphi')$$

NB : on se contente généralement d'une compensation partielle et non totale ( $\cos \varphi' = 1$ ) de la puissance réactive afin de ne pas surdimensionner les condensateurs de correction.

En pratique, la section minimale des conducteurs peut être déterminée de manière tabulée (ou à l'aide de logiciels) à partir du courant nominal qui y circule et de différents paramètres dont le type de pose des câbles ou la température. Cette section minimale assure des pertes en ligne acceptables tout en limitant la masse totale de conducteur mise en jeu. L'autre aspect à vérifier est que, pour la section de conducteur choisie, la chute de tension soit raisonnable (généralement inférieure à 5% de la tension nominale). Une formule est donnée dans la

norme NFC15-100 mais il nous semble indispensable que les étudiants comprennent d'où vient cette formule d'autant que la démonstration est très simple.

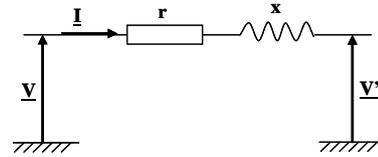


Schéma pour le calcul de la chute de tension sur une phase en régime alternatif sinusoïdal (encadré H)

**Chute de tension** H

Pour le calcul de la chute de tension, le modèle de ligne tient compte de la résistance  $r$  et de la réactance  $x$  du tronçon de conducteur considéré. On suppose en outre que les signaux sont sinusoïdaux avec  $\varphi$ , le déphasage entre  $i(t)$  et  $v'(t)$  et  $\alpha$ , le déphasage entre  $v'(t)$  et  $v(t)$ .

Diagramme de Fresnel associé (exemple d'une charge inductive -  $\varphi > 0$ )

Par projection :

$$\begin{cases} V \cos \alpha = V' + rI \cos \varphi + xI \sin \varphi \\ V \sin \alpha = -rI \sin \varphi + xI \cos \varphi \end{cases}$$

Le déphasage  $\alpha$  étant très petit, on obtient l'expression de la chute de tension :

$$\Delta V = -(V' - V) = (r \cos \varphi + x \sin \varphi) I$$

L'expression donnée dans la norme NFC15-100 fait intervenir la résistivité  $\rho$ , la réactance linéique  $\lambda$ , la longueur L et la section S des conducteurs et un facteur b :

$$\Delta V = bL \left( \frac{\rho}{S} \cos \varphi + \lambda \sin \varphi \right) I$$

$b=2$  en monophasé car il faut tenir compte de la chute de tension sur la phase et sur le neutre

$b=1$  en triphasé équilibré avec une charge équilibrée car il n'y a pas de courant qui circule sur le neutre (NB : si l'on considère les tensions composées, on a  $\Delta U = \sqrt{3} \Delta V$ )

Valeurs numériques données dans la norme :  $\rho = 0,023 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$  pour le cuivre et  $0,037 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$  pour l'aluminium -  $\lambda = 0,08 \text{ m}\Omega/\text{m}$  en l'absence d'autres indications.

## 6. Les 3 « calibres » du disjoncteur différentiel

Le choix des protections est une partie importante d'un dimensionnement électrique. Si tous les étudiants ont déjà entendu parler de disjoncteur différentiel, ils sont souvent perplexes devant les 3 valeurs de courants affichées sur l'appareil d'autant que les ordres de grandeur sont différents - à titre d'exemple : 30mA, 16A, 10kA. Cette perplexité est due à une méconnaissance des fonctions de protection et tout d'abord au fait que le disjoncteur différentiel corresponde à deux appareils en un.

Il s'agit d'abord d'un interrupteur différentiel, qui détecte une différence d'intensité entre le courant de la phase et le courant du neutre. Le dispositif différentiel assure la protection des personnes car limite les risques

d'électrocution<sup>4</sup> en détectant les fuites de courant à la terre de l'installation électrique. La sensibilité différentielle du différentiel est dans la plupart des cas de 30mA (on trouve aussi 300mA pour l'éclairage public ou 500mA pour le comptage général EDF).

Il s'agit également d'un disjoncteur « classique » qui permet de protéger contre les surintensités à la fois de surcharge et de court-circuit et assure ainsi plutôt la protection des biens. Les intensités de surcharge sont détectées par un relai thermique. Les valeurs des calibres les plus communs sont : 10A (éclairage), 16A (prise de courant), 20A, 32A... Ces valeurs correspondent à l'intensité maximale à partir de laquelle le relai thermique s'enclenche. Ce calibre se choisit donc en fonction du courant nominal sans oublier les surintensités « normales » des systèmes (lampes à décharge, moteurs...) en particulier à l'allumage. Les intensités de court-circuit peuvent être très élevées<sup>5</sup> et sont détectées par un relai magnétique assurant une coupure très rapide. Le pouvoir de coupure, par exemple 10kA, correspond à l'intensité maximale que le relai magnétique peut interrompre sans se détériorer. Ce pouvoir de coupure doit bien sûr être supérieur au courant de court-circuit calculé.

### 7. Quelques notions de base sur le transport d'électricité

Là encore, l'objectif est de montrer qu'avec des calculs très simples, on arrive à saisir quelques grands principes concernant le transport d'électricité.

#### 7.1. Le triphasé plutôt que le monophasé

Pourquoi le transport électrique se fait en triphasé et non en monophasé ? Pour répondre à cette question, nous comparons une alimentation monophasée en tension sinusoïdale de valeur efficace **V** et un système triphasé équilibré de tension composée de même valeur efficace  $U = \sqrt{3}V$ . Dans les deux cas, la charge totale est caractérisée par sa puissance active **P** et son facteur de puissance **k** (dans le cas triphasé, la charge est supposée répartie de manière équilibrée sur les trois phases).

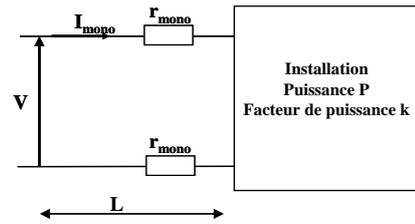


Schéma pour le transport en monophasé

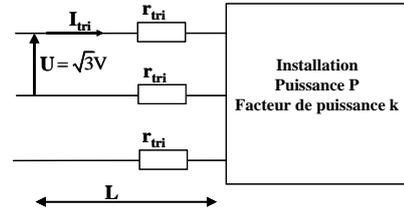


Schéma pour le transport en triphasé équilibré avec une charge équilibrée

On considère une longueur **L** de câbles constitués du même conducteur de résistivité  $\rho$  ( $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ ) et de masse volumique  $\mu$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ). Les câbles sont dimensionnés pour respecter une densité de courant donnée  $j_s$  ( $\text{A}.\text{mm}^{-2}$ ).

Le tableau ci-dessous permet de montrer que la masse totale des conducteurs est deux fois plus faible en triphasé (tension et charge équilibrées) qu'en monophasé pour une même puissance **P** à fournir et pour une même densité de courant  $j_s$  donnée. On économise en prime sur les pertes en ligne qui sont deux fois moindre en triphasé qu'en monophasé.

		Monophasé	Triphasé (tension et charges équilibrées)
Courant de ligne (A)		$I_{\text{mono}} = \frac{P}{V k}$	$I_{\text{tri}} = \frac{P}{3V k}$
Densité de courant $j_s$ ( $\text{A}.\text{mm}^{-2}$ ) donnée	Section des conducteurs ( $\text{mm}^2$ )	$S_{\text{mono}} = \frac{P}{V k j_s}$	$S_{\text{tri}} = \frac{P}{3V k j_s}$
	Masse totale des conducteurs (kg)	$M_{\text{mono}} = 2\mu L \frac{P}{V k j_s}$	$M_{\text{tri}} = \mu L \frac{P}{V k j_s}$
	Pertes en ligne (W)	$P_{\text{ligne/mono}} = 2\rho L \frac{P}{V k} j_s$	$P_{\text{ligne/tri}} = \rho L \frac{P}{V k} j_s$

Autre argument, la puissance instantanée  $p(t)$  fait apparaître une puissance fluctuante à 100Hz en monophasé sinusoïdale (cf. encadré B) ce qui produit des oscillations de couples de l'alternateur. Pour un système triphasé équilibré en tension et en charge, la puissance instantanée  $p(t)$  est constante (cf. encadré E) et n'induit donc pas de phénomènes indésirables.

Un dernier point en faveur du triphasé – important à connaître mais non démontré ici – concerne le rendement des alternateurs triphasés qui est meilleur que leur équivalent monophasé de même puissance.

<sup>4</sup> Un décès par électrocution peut survenir lorsque le courant traversant le corps dépasse 30mA.

<sup>5</sup> Déterminer ces intensités de court-circuit fait partie des exercices classiques de dimensionnement électrique.

**7.2. Triphasé vs continu**

Si les avantages du triphasé l'emportent largement par rapport à ceux du monophasé, le choix d'un régime alternatif sinusoïdal par rapport à un régime continu est moins évident. Cet aspect constitua d'ailleurs ce que l'on a appelé « la guerre des courants » au début de la distribution de l'électricité à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle entre Edison, partisan du continu, et Tesla, ingénieur à la Westinghouse company, promoteur de l'utilisation du courant alternatif.

Il est possible de comparer continu et triphasé en faisant les mêmes hypothèses que précédemment. On suppose que la tension continue  $U_c = \sqrt{2}U$  et que les câbles sont une nouvelle fois dimensionnés pour respecter une densité de courant donnée  $j_s$  ( $A \cdot mm^{-2}$ ).

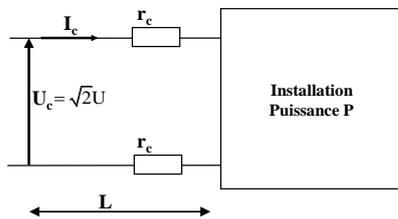


Schéma pour le transport en continu

On peut alors remplir le tableau suivant.

		continu	Triphasé (tension et charges équilibrées)
Courant de ligne (A)		$I_c = \frac{P}{\sqrt{2}U}$	$I_{tri} = \frac{P}{\sqrt{3}Uk}$
Densité de courant $j_s$ ( $A \cdot mm^{-2}$ ) donnée	Section des conducteurs ( $mm^2$ )	$S_c = \frac{P}{\sqrt{2}Uj_s}$	$S_{tri} = \frac{P}{\sqrt{3}Ukj_s}$
	Masse totale des conducteurs (kg)	$M_c = \sqrt{2}\mu L \frac{P}{Uj_s}$	$M_{tri} = \sqrt{3}\mu L \frac{P}{Ukj_s}$
	Pertes en ligne (W)	$P_{ligne/c} = \sqrt{2}\rho L \frac{P}{U} j_s$	$P_{ligne/tri} = \sqrt{3}\rho L \frac{P}{Uk} j_s$

Le bilan dressé dans le tableau (avec les hypothèses considérées) est en faveur du continu. Si le facteur de puissance du triphasé prend la valeur usuelle  $k=0.8$ , la masse totale des conducteurs et les pertes en ligne sont 1,5 fois plus élevées pour le triphasé que pour le continu. Ce qui n'apparaît pas dans le tableau, c'est le coût des terminaisons du réseau : complexe en continu, la conversion électrique est plus intéressante d'un point de vue technique et économique en alternatif, avec des transformateurs. En outre, l'interruption du courant est également plus difficile en continu.

Finalement, le plus faible coût des lignes en continu peut compenser l'investissement lié aux terminaisons plus chères. On estime qu'à partir d'une distance critique (estimée à environ 800km pour une liaison aérienne et 70km pour une liaison sous-marine), une installation électrique est en-effet moins coûteuse au kilomètre en continu qu'en triphasé équilibré. D'autres aspects sont à considérer (effet de « peau », interconnexion de réseaux à des fréquences différentes, nécessité de compenser la puissance réactive sur de grandes distances...) mais nécessiteraient des développements qui sortent du cadre de cet article. Si les bases de l'électricité sont nécessaires pour comprendre les notions principales du transport d'électricité, il reste (heureusement) pour nos étudiants d'autres compétences à acquérir pour en saisir toutes les subtilités.

**Conclusion**

En enseignement, il n'y a malheureusement pas de recette miracle. Néanmoins, il peut être intéressant de mettre les étudiants face à certaines de leurs erreurs afin qu'ils appréhendent par eux mêmes la nécessité de maîtriser quelques notions de base concernant le signal électrique. Il est sans doute important de revenir, même rapidement, sur ces notions que l'on croit acquises... Il faut également veiller à expliciter dans les énoncés d'exercices, les hypothèses habituellement implicites (par exemple, la tension et le courant sont supposés sinusoïdaux..., le système est triphasé équilibré et alimente une charge équilibrée...). Ce ne sont sans doute que des petits détails mais qui permettront à certains étudiants d'aborder plus sereinement les problèmes d'électricité sans se demander à chaque fois s'il faut multiplier leur résultat par  $\sqrt{2}$  ou  $\sqrt{3}$  !

**Remerciements** : je remercie les étudiants de l'ensip qui ont suivi les TD sur la « distribution et la conversion de l'énergie électrique » et dont l'intérêt pour cette matière et la réactivité m'ont aidé pour l'écriture de cet article. Je remercie également mes collègues de l'ensip, en particulier Sandrine Moreau, responsable de cet enseignement.

# La technologie Lithium-ion

Alexandre CHAGNES

ENSCP-LECIME (UMR 7575)

11 Rue Pierre et Marie Curie 75005 Paris

**Résumé :** L'approvisionnement et la gestion de l'énergie sont plus que jamais au centre de nos préoccupations quotidiennes avec l'épuisement progressif des réserves de pétrole et la volonté de réduire les émissions de dioxyde de carbone. Ainsi, un des principaux défis des prochaines décennies est sans aucun doute le développement de nouvelles technologies pour le stockage électrochimique de l'énergie. De nombreux espoirs reposent aujourd'hui sur les accumulateurs lithium-ion qui apparaissent comme étant à court terme le meilleur choix pour les véhicules électriques. La production de batteries lithium-ion performantes repose sur l'optimisation de chaque élément de la batterie (électrodes, séparateur, électrolyte, etc.). Dans cet article, nous décrivons le principe de fonctionnement des batteries lithium-ion actuellement sur le marché et nous détaillerons chaque élément les constituant.

## 1. Introduction

Un des principaux défis des prochaines décennies concerne le développement de nouvelles technologies pour le stockage électrochimique de l'énergie. De nombreux espoirs reposent aujourd'hui sur les accumulateurs aux ions lithium qui envahissent le marché des portables et qui apparaissent comme étant à court terme le meilleur choix pour les véhicules électriques, et peut-être pour les applications réseaux (stockage d'électricité issu des éoliennes ou des cellules photovoltaïques par exemple).

Même si la technologie lithium-ion a connu, durant les deux dernières décennies, des avancées remarquables avec notamment l'arrivée des nanomatériaux qui ont permis de doubler la densité d'énergie, une rupture technologique semble nécessaire pour accroître davantage les densités d'énergie, la vitesse de charge et la longévité [1]. Différentes technologies ont été imaginées ces dernières années comme les batteries lithium-air [2] ou les systèmes tout-solide [3] garantissant la stabilité des matériaux et des interfaces ainsi que la sécurité. Parallèlement aux systèmes lithium-ion, les systèmes au sodium conviennent parfaitement dans le domaine des applications où la densité d'énergie n'est pas critique mais où le prix est une des préoccupations car le sodium est abondant et peu coûteux.

La batterie lithium-ion fonctionne sur l'échange réversible de l'ion lithium entre une électrode positive, le plus souvent un oxyde de métal de transition lithié noté  $\text{LiMeO}$  (dioxyde de cobalt ou de manganèse par exemple) et une électrode négative en graphite (Fig 1):



Dans les équilibres précédents, la charge correspond à la réaction allant de la gauche vers la droite et la décharge correspond à la réaction inverse allant de la droite vers la gauche.

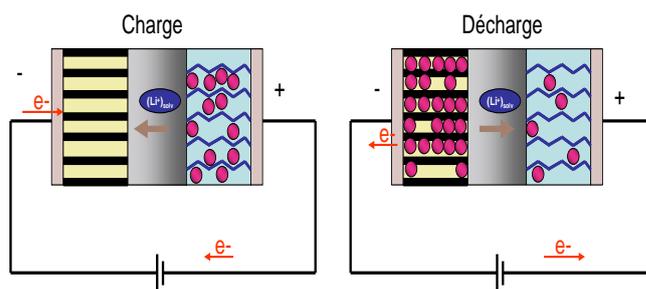


Figure 1 : Fonctionnement d'une batterie lithium-ion.

Les performances des batteries lithium-ion peuvent être améliorées en optimisant l'électrolyte ou en développant des matériaux d'électrodes plus efficaces en termes de densité d'énergie et de cyclabilité. Notamment, la résistance interne d'une batterie doit être minimisée pour assurer une performance optimale de la batterie.

La résistance interne d'une batterie lithium-ion doit être maintenue la plus basse possible au cours de la vie d'une batterie, en particulier si cette dernière doit fonctionner à des régimes de charge élevés. La résistance interne d'une batterie ( $R_b$ ) se décompose en plusieurs termes:

$$R_b = R_{el} + R_{in}(N) + R_{in}(P) + R_c(N) + R_c(P) \quad (3)$$

où  $R_{el}$ ,  $R_{in}$  et  $R_c$  sont respectivement la résistance électrique, la résistance à l'interface électrode-électrolyte et la résistance au collecteur de courant à la positive (P) et à la négative (N).

La résistance au collecteur de courant dépend principalement de la conductivité du matériau utilisé comme collecteur de courant, c'est-à-dire que la conductivité du matériau doit être la plus élevée possible. La résistance électrique dépend de l'épaisseur entre l'électrode positive et l'électrode négative ( $L$ ), de l'aire géométrique de l'électrode ( $A$ ) et de la conductivité de l'électrolyte ( $\kappa$ ):

$$R_{el} = L/(\kappa A) \quad (4)$$

L'équation (4) montre que la résistance électrique peut être abaissée en diminuant l'épaisseur entre les électrodes et en augmentant l'aire géométrique des électrodes et la conductivité ionique de l'électrolyte (mais aussi en diminuant sa viscosité puisque conductivité et viscosité sont liées). Cependant, la surface des électrodes ne doit pas être trop élevée car la résistance interfaciale ( $R_{in}$ ) est proportionnelle à la surface géométrique divisée par l'aire à l'interface électrode/électrolyte qui peut être assimilée à la surface spécifique des électrodes. La résistance interfaciale peut être abaissée en augmentant l'aire spécifique de l'électrode, c'est-à-dire en utilisant des électrodes poreuses formées de nanoparticules à condition qu'un contact électrique optimum soit assuré entre les nanoparticules. De plus, l'utilisation de matériaux nanostructurés dont la surface spécifique est élevée a l'avantage de permettre de cycliser à des régimes de charge élevés en améliorant la répartition du courant et en diminuant localement les densités de courant.

Ainsi, la résistance interne d'une batterie peut être minimisée simplement en optimisant sa géométrie, en utilisant des électrodes poreuses et des électrolytes ayant à la fois une conductivité ionique élevée et une faible viscosité. Cependant, les performances des batteries lithium-ion ne dépendent pas uniquement de la valeur de la résistance interne. Par exemple, la longévité et le régime de charge pouvant être appliqué sont contrôlés par la nature du matériau d'électrode (coefficient de diffusion des ions lithium dans le matériau hôte, résistance mécanique du matériau face aux variations de volume, *etc.*) et par l'interface électrode/électrolyte qui est le résultat de la réactivité de l'électrolyte avec les matériaux d'électrode à l'oxydation et à la réduction. Ces réactions à l'interface jouent un rôle majeur dans la stabilité physique et chimique des électrodes, la stabilité des cycles de charge et de décharge, la longévité et la réversibilité du système.

Dans cet article, nous allons nous focaliser sur chaque élément constituant la batterie (électrolyte, séparateur, électrodes positive et négative) mais également à l'interface électrode-électrolyte.

## 2. Les constituants de la batterie

### 2.1. L'électrolyte

Les électrolytes utilisés dans les batteries rechargeables au lithium sont généralement constitués d'un mélange binaire ou ternaire de solvants organiques dipolaires aprotiques (sans proton en solution) et d'un sel de lithium.

Il est possible d'agir sur la formulation de l'électrolyte de manière à satisfaire le cahier des charges suivant :

- Faible viscosité pour faciliter la mobilité des ions.
- Conductivité élevée à température ordinaire et suffisante à froid pour diminuer la chute ohmique.
- Liquide dans une large gamme de température (température de cristallisation basse et température d'ébullition élevée).
- Résistant à l'oxydation à la cathode.
- Pouvoir solubilisant pour les sels de lithium.
- Formation d'une couche de passivation pour éviter l'exfoliation (explosion des feuillets de graphène conduisant à la destruction irréversible de l'électrode) dans le cas d'une électrode négative en graphite.
- Produit écologiquement acceptable et ne présentant pas de danger de manipulation.

L'électrolyte doit aussi s'adapter aux matériaux utilisés dans la batterie, c'est-à-dire qu'il doit avoir un potentiel d'oxydation élevé si les matériaux d'électrodes positives fonctionnent à des potentiels de l'ordre de 5V par rapport au lithium ou plus, et avoir une faible réactivité avec la surface de l'électrode positive.

#### 2.1.1. Le solvant

Les solvants compatibles avec la technologie lithium-ion sont des solvants organiques dipolaires aprotiques car les molécules dipolaires sont capables de dissoudre des sels inorganiques comme les sels de lithium mais aussi parce qu'ils ont un domaine d'électroactivité large. De plus, ces solvants ne réagissent pas violemment avec le lithium métallique car il n'y a pas de proton en solution.

Généralement, les solvants pour les batteries lithium-ion contiennent des atomes d'oxygène, d'azote ou de soufre pour favoriser la complexation des ions lithium. Les solvants organiques dipolaires aprotiques utilisés dans les batteries lithium-ion sont généralement des carbonates de dialcyle mais d'autres solvants comme les éthers, les lactones, les sulfones ou les nitriles ont fait l'objet d'études [4]. Il est difficile d'atteindre le cahier des charges précédemment cité avec un seul solvant et il est généralement nécessaire d'utiliser un mélange de solvants auquel on ajoute un sel de lithium. Le mélange actuellement le plus utilisé est

constitué de carbonate de diméthyle, de carbonate de propylène et d'hexafluorophosphate de lithium (sel de lithium) [5].

### 2.1.2. Le sel

Les sels de lithium doivent être soluble dans les solvants organiques dipolaires aprotiques jusqu'à une concentration voisine de 1 mol/L. De tels sels de lithium doivent être sûrs, le plus écologique possible et posséder un potentiel d'oxydation le plus élevé possible, en particulier pour les applications nécessitant des hautes densités d'énergie comme le véhicule électrique. Dans la littérature, beaucoup d'études concernent l'utilisation de perchlorate de lithium ( $\text{LiClO}_4$ ), d'hexafluoroarsénate de lithium ( $\text{LiAsF}_6$ ), de tétrafluoroborate de lithium ( $\text{LiBF}_4$ ), de Bis(Trifluorométhanesulfonyl)Imidure de lithium ( $\text{LiTFSI}$ ), de triflate de lithium ( $\text{LiTf}$ ) et d'hexafluorophosphate de lithium ( $\text{LiPF}_6$ ) qui est le sel le plus utilisé dans les batteries [6].

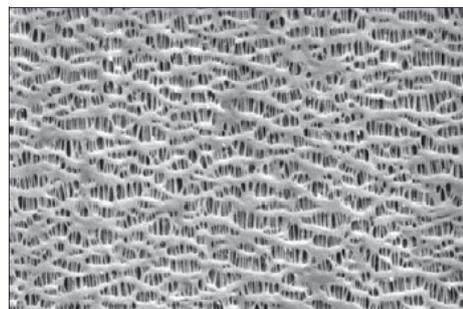
$\text{LiAsF}_6$  et  $\text{LiClO}_4$  ne peuvent pas être utilisés industriellement car ils ne sont pas sûrs ( $\text{LiAsF}_6$  libère des gaz toxiques lorsqu'il est porté à haute température tandis que  $\text{LiClO}_4$  est explosif).  $\text{LiTFSI}$  est un sel intéressant en termes de conductivité ionique dans les solvants organiques dipolaires aprotiques mais il est responsable de la corrosion des collecteurs de courant à haut potentiel tandis que  $\text{LiBF}_4$  a une faible conductivité par rapport aux autres sels.  $\text{LiPF}_6$  a une conductivité ionique intéressante et il permet de former en présence de carbonate d'éthylène une couche de passivation de bonne qualité à la surface de l'électrode négative en graphite permettant de protéger le graphite de sa destruction par co-intercalation du lithium dans les feuillets de graphène (voir paragraphe 2.3)

### 2.2. Le séparateur

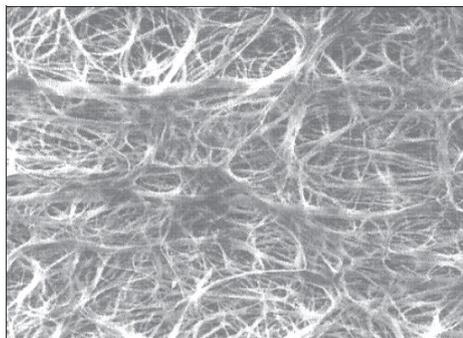
Le séparateur a pour rôle d'isoler le compartiment anodique du compartiment cathodique et d'éviter que les deux électrodes entrent en contact électrique. Le séparateur est constitué de plusieurs feuilles de polymère (polyéthylène et/ou polypropylène) de quelques dizaines de micromètres d'épaisseur dont la porosité et la tortuosité (rapport entre la distance que parcourerait une particule en ligne droite et la distance réellement parcourue à travers les pores) peut varier selon le type de séparateur. La Figure 2 montre deux clichés pris au microscope électronique à balayage de séparateurs dont la morphologie est différente. L'électrolyte doit mouiller parfaitement le séparateur et pouvoir le traverser à travers la porosité. En cas de dysfonctionnement de la batterie entraînant une augmentation de sa température et un risque d'explosion, la porosité du séparateur peut se refermer

et ainsi couper le fonctionnement de la batterie (effet « shut-down ») pour éviter des conséquences dramatiques.

(a)



(b)



**Figure 2 :** Clichés au microscope électronique à balayage d'un éparateur en. (a) Celgard® : polypropylène, porosité=40-60%, épaisseur=20-30  $\mu\text{m}$ , taille des pores=0,1x0,04  $\mu\text{m}$  ; (b) Solupor® : polyéthylène, porosité=40-80%, épaisseur=10-60  $\mu\text{m}$ , taille des pores=0,1-2  $\mu\text{m}$ .

Les séparateurs peuvent également être composés de feuillets de polyéthylène pris en sandwich entre des feuillets de polypropylène afin d'avoir une bonne tenue mécanique (provenant du polypropylène) et un effet « shut-down » (provenant du polyéthylène, température de fusion=135 °C) [7].

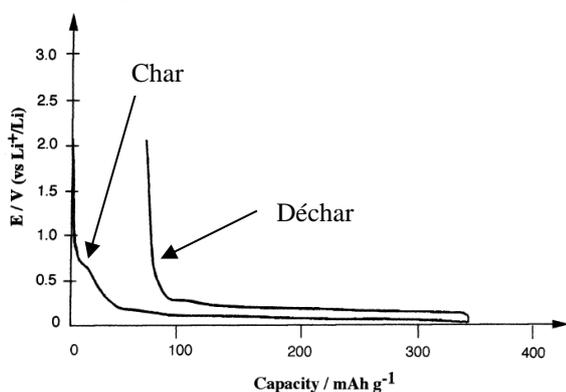
### 2.3. L'électrode négative

Le graphite est le matériau le plus utilisé comme électrode négative dans la technologie lithium-ion car il permet d'atteindre une capacité de charge/décharge théorique de 372 mAh/g sans perte importante sur un grand nombre de cycles. D'autres matériaux d'électrodes négatives sont actuellement à l'étude comme par exemple le silicium qui a l'avantage d'avoir une capacité théorique bien plus élevée que le graphite (4200 mAh/g). Cependant, la cyclabilité du silicium est moins bonne que celle du graphite à cause d'une variation de volume importante lors de la charge et de la décharge responsable de l'apparition de stress mécaniques détériorant le matériau. Une amélioration notable de la cyclabilité du silicium a pu être obtenue en fabricant des électrodes constituées de nanotubes de

silicium permettant de mieux répartir les contraintes sur le matériau et ainsi minimiser le stress mécanique [8].

D'autres matériaux carbonés que le graphite ont été étudiés en tant qu'électrode négative pour les batteries lithium-ion. Il est en effet possible d'obtenir une large variété de matériaux carbonés à partir de carbone naturel ou synthétique (coke, fibre de carbone, noir d'acétylène, *etc.*) en appliquant un traitement thermique. Ces différents matériaux carbonés ont des capacités différentes selon le traitement thermique. Par exemple, un carbone chauffé entre 2700 °C et 3000 °C conduit à la formation de graphite dont la capacité est comprise entre 300 et 370 mAh/g tandis que ce même carbone chauffé entre 800 et 1000 °C conduit à un matériau dont la capacité est comprise entre 500 et 1000 mAh/g. Cependant, malgré la capacité attrayante de ces derniers, leur cyclabilité est encore trop limitante par rapport au graphite pour qu'ils soient utilisés dans les batteries lithium-ion.

Un ion lithium pour 6 atomes de carbone s'insère dans les feuillets de graphène. L'insertion du lithium est responsable d'une légère augmentation de volume du matériau. La Figure 3 montre une courbe de charge et de décharge à courant constant (courbe de charge/décharge en mode galvanostatique) d'un matériau de graphite dans un électrolyte constitué d'un mélange de carbonate d'hexafluorophosphate de lithium à un régime de charge et de décharge de 20h [9].



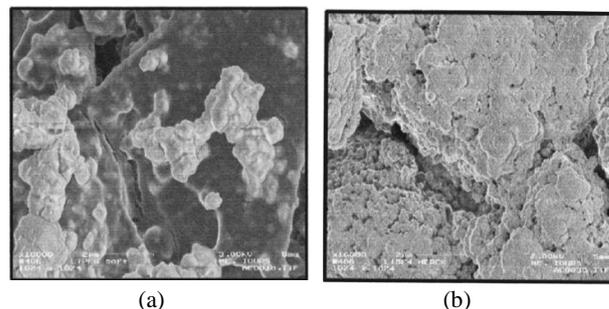
**Figure 3 :** Courbe de charge-décharge en mode galvanostatique à un régime de charge-décharge de 20 heures (1<sup>er</sup> cycle). Matériau : graphite (électrode SAFT), électrolyte : mélange de carbonates en présence d'hexafluorophosphate de lithium (1 mol/L) [9].

Cette courbe est caractérisée par un épaulement vers 0,7 V par rapport au lithium (*vs.* Li/Li<sup>+</sup>) qui correspond à la réduction de l'électrolyte conduisant à la formation d'une couche de passivation à la surface du graphite. Cette couche de passivation, appelée SEI pour *Solid Electrolyte Interphase*, est constituée d'une couche organique (produits de réduction : carbonates organiques, alcoolate de lithium, *etc.*) et d'une couche

minérale (produits de la réduction de l'électrolyte : fluorure de lithium, carbonate de lithium, *etc.*) [10].

La couche de passivation joue un rôle essentiel dans la cyclabilité des électrodes en graphite. En effet, en absence de couche de passivation, les ions lithium peuvent s'insérer dans les feuillets de graphène avec une partie de leur couche de solvation. Les molécules de solvant co-intercalées peuvent alors se réduire à l'intérieur des feuillets de graphène et conduire à la formation de gaz responsable d'une surpression entraînant l'explosion des feuillets de graphène appelée exfoliation. L'exfoliation est une destruction irréversible de l'électrode. La couche de passivation évite l'exfoliation en permettant au lithium de la traverser et d'atteindre les feuillets de graphène sans sa couche de solvation. Il faut donc que la couche de passivation soit suffisamment poreuse, et d'épaisseur optimum afin d'assurer le passage des ions lithium désolvatés avec une résistance minimale.

La Figure 4 montre un exemple de couches de passivation obtenues sur une électrode en graphite (électrode SAFT) après 5 cycles de charge-décharge à un régime de 20 heures pour un électrolyte constitué de  $\gamma$ -butyrolactone (BL) et de carbonate d'éthylène (EC) en présence d'hexafluorophosphate de lithium (LiPF<sub>6</sub>) ou de tétrafluoroborate de lithium (LiBF<sub>4</sub>).



**Figure 4 :** Clichés au microscope électronique à balayage d'une couche de passivation formée sur électrode de graphite après 5 cycles de charge-décharge à un régime de charge et de décharge de 20h en présence de (a) LiPF<sub>6</sub> ; (b) LiBF<sub>4</sub> dans BL-EC.

La Figure 4 montre clairement que la morphologie est fortement influencée par la nature du sel de lithium utilisé dans la formulation de l'électrolyte. En présence de LiPF<sub>6</sub>, la couche de passivation s'apparente à un film compact et lisse qui recouvre la totalité de la surface du graphite (Figure 4a) tandis qu'en présence de LiBF<sub>4</sub>, la couche de passivation apparaît comme beaucoup moins compacte et plus poreuse (Figure 4b). Ces différences de morphologie influencent directement le comportement du graphite en cyclage. En présence de LiPF<sub>6</sub>, il est impossible d'insérer du lithium à l'intérieur des feuillets de graphène car la couche de passivation est trop

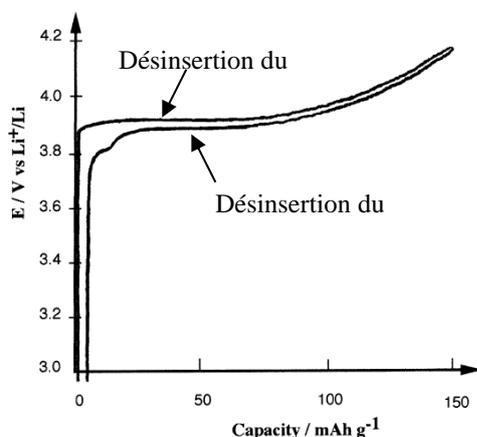
compacte et peu poreuse alors que le lithium peut être inséré et désinséré sans difficulté en présence de  $\text{LiBF}_4$ .

La Figure 3 montre une seconde zone pour des différences de potentiel comprises entre 200 mV et 85 mV vs.  $\text{Li}/\text{Li}^+$ . Cette zone correspond à l'insertion du lithium à l'intérieur des feuillets de graphène.

#### 2.4. L'électrode positive

Les électrodes positives sont généralement élaborées sous forme de film déposé sur une feuille d'aluminium de 200-250  $\mu\text{m}$ . L'encre déposée sur la feuille est constituée de 80-85% de matériau actif (généralement un oxyde métallique lithié), 10% de liant (PVDF) et 5% de noir d'acétylène pour assurer la conductivité et de la N-méthyl-2-pyrrolidone (NMP) qui permet de dissoudre le liant. Après dépôt de l'encre, l'électrode est chauffée afin de polymériser le liant et assurer la tenue mécanique des particules de matériau actif.

Différents matériaux d'électrodes positives ont été développés comme  $\text{LiNiO}_2$ ,  $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  ou encore plus récemment  $\text{LiMPO}_4$  avec  $M=\text{Mn}, \text{Co}, \text{Fe}$  ou  $\text{Ni}$ . Parmi ces matériaux,  $\text{LiCoO}_2$  est celui qui est le plus utilisé pour les batteries lithium-ion, notamment pour les appareils électroniques portables. La Figure 5 montre l'allure d'une courbe de charge et de décharge en mode galvanostatique d'une électrode de  $\text{LiCoO}_2$ .



**Figure 5 :** Courbe de charge-décharge en mode galvanostatique à un régime de charge-décharge de 30 heures (1<sup>er</sup> cycle). Matériau :  $\text{LiCoO}_2$  (électrode SAFT), électrolyte : mélange de carbonates en présence d'hexafluorophosphate de lithium (1 mol/L) [9].

Le besoin de plus en plus marqué en batteries à haute densité d'énergie a conduit récemment les chercheurs à s'intéresser au développement de matériaux d'électrodes à plus haute tension (matériaux 5V) comme  $\text{LiCoPO}_4$ . L'utilisation de tels matériaux nécessitent d'adapter l'électrolyte car les électrolytes actuels ont été développés pour des matériaux 4V et un travail de

recherche doit être réalisé afin de repousser l'oxydation des électrolytes au-delà de 5 V vs.  $\text{Li}/\text{Li}^+$ .

### 3. Conclusion

La technologie lithium-ion est une technologie mature qui doit s'adapter au développement d'un parc automobile électrique. En particulier, les matériaux d'électrodes doivent permettre d'emmagasiner une densité d'énergie plus élevée et de réaliser des cycles de charge en un temps minimum. En parallèle, l'électrolyte doit être reformulé pour être compatible avec les nouveaux matériaux d'électrodes qui fonctionneront autour de 5V par rapport au lithium. De nouveaux challenges voient donc le jour dans ce domaine.

L'accès aux matières premières constituant les prochaines générations de batteries (lithium, cobalt, nickel, *etc.*) est également une problématique importante pour la pérennité de la technologie lithium-ion.

Les batteries devraient évoluer dans les prochaines décennies vers de nouvelles technologies comme les batteries lithium-air ou encore les batteries au sodium car ces dernières ont l'avantage d'utiliser du sodium beaucoup plus abondant (eau de mer) que le lithium.

### 4. Références bibliographiques

1. A. Ritchie, W. Howard, J. Power Sources 162 (2), 809-812 (2005).
2. S.J. Viscoa, E. Nimon, L.C. De Jonghe, Encyclopedia of Electrochemical Power Sources, Elsevier (Eds), 2009, pp. 376-383.
3. K. Murata, S. Izuchi, Y. Yoshihis, Electrochimica Acta, 45 (8-9) 1501-1508 (2000).
4. A. Chagnes, J. Swiatowska, "Electrolyte and solid-electrolyte interphase layer in lithium-ion batteries" in Lithium Ion Batteries - New Developments", InTech Ed. (2012), p. 145-172, ISBN 978-953-307-900-4.
5. A. Chagnes, "Les batteries lithium-ion: formulation de l'électrolyte", Editions Universitaires Européennes, Sarrebruck (Allemagne), 121 pages (2010).
6. D. Lemordant, F. Blanchard, G. Bossier, M. Caillon-Caravannier, B. Carré, A. Chagnes, B. Montigny, R. Naejus, "Physicochemical properties of fluorine-containing electrolytes for lithium ion batteries" in "Fluorinated Materials for Energy Conversion", Tsuyoshi Nakajima et Henri Groult (Ed.), Elsevier, Paris (2005) p.137-171.

7. P. Arora, Z. Zhang, *Chem. Rev.* 104, 4419-4462 (2004).
8. C. Pereira-Nabais, J. Światowska, A. Chagnes, F. Ozanam, A. Gohier, C.-S. Cojocaru, M. Cassir, P. Marcus, soumis à *Electrochimica Acta* (S-12-00586-1), 2012.
9. I. Geoffroy, A. Chagnes, B. Carré, D. Lemordant, P. Biensan, S. Herreyre, "Electrolytic characteristics of asymmetric alkyl carbonates solvents for lithium batteries", *Journal of Power Sources* 112 (1), 191-198 (2002).
10. P. Verma, P. Maire, P. Novák, *Electrochimica Acta*, Vol.55, 6332–6341 (2010).

# Mesure d'énergie et de quantité d'électricité

**Guillaume HERAULT**

Ingénieur d'étude en électronique ENS de Cachan, 94230 CACHAN

**Résumé :** Cet article rend compte de la conception et de la mise en œuvre d'une maquette de mesure d'énergie et de quantité d'électricité absorbée ou fournie par une  $\mu$ -pile à hydrogène. Pour réaliser cette fonction, nous avons utilisé un microcontrôleur de type PSoC (Programmable System on Chip).

## 1. Introduction

Les TP de conversion d'énergie de l'ENS de Cachan, avec des étudiants, mais également lors de séances pour les formations continues, amènent à faire l'étude d'une pile à combustible. L'étude consiste à caractériser une  $\mu$ -pile à combustible réversible, pour cela nous sommes amenés à mesurer la tension ( $\approx 2V$ ), le courant (200mA max) et de calculer l'énergie et la quantité d'électricité fournie ou consommée par la pile à combustible. Afin de réaliser ces mesures, nous avons un appareil d'une grande précision, cependant il est extrêmement cher ( $\approx 4000€$ ) car il est principalement adapté pour fonctionner sur des tensions bien plus élevées (réseau 230V/400V) et des fréquences de plusieurs dizaines de kHz, donc surdimensionné pour notre étude. De plus si nous avons plusieurs TP en parallèle sur la pile à combustible il nous faut acheter plusieurs énergimètres et ainsi le budget devient très important.

Le cahier des charges est donc simple :

- mesurer la tension et le courant fournis ou consommés par la pile à combustible,
- en calculer l'énergie et la quantité d'électricité emmagasinée ou dépensée,
- les afficher sur un écran LCD,
- avec une utilisation simple, une mise en marche, un arrêt et une remise à zéro de la mesure,
- et tout cela à moindre coût.

## 2. Schéma fonctionnel de la carte (figure 1)

La mesure de courant se fait grâce à une résistance de précision de  $1\Omega$  à 1%, cette mesure est adaptée par un AOP câblé en suiveur, de même pour la mesure de tension. Le PSoC est un circuit qui fonctionne entre 0 et 5V, il est donc nécessaire, d'avoir en entrée des signaux adaptés, pour cela nous utilisons un AOP câblé en sommateur. Ainsi nous pouvons, à l'aide d'un potentiomètre, régler le « zéro » de la mesure. Dans le PSoC, nous avons implémenté des gains réglables [2]

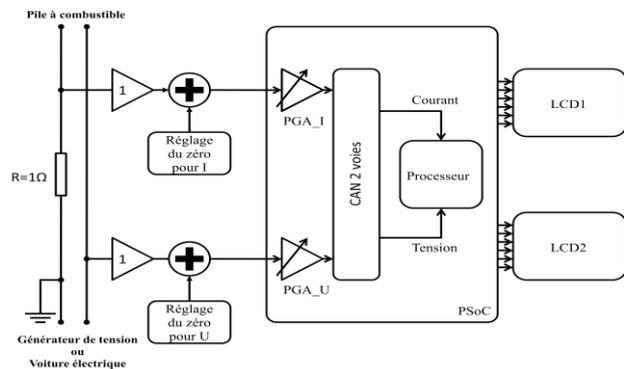


Figure 1 : Schéma fonctionnel de la carte

afin d'exploiter au mieux le CAN intégré au PSoC [3]. Les données ainsi converties, sont traitées puis affichées sur les écrans LCD [4].

## 3. Le microcontrôleur

Pour réaliser la fonction de mesure et d'affichage, nous avons choisi d'utiliser un microcontrôleur de type PSoC (Programmable System on Chip) de référence CY8C27443-24PXI [1], système électronique de Cypress. Les PSoC intègrent des blocs analogiques (principalement à capacités commutées) et numériques configurables par l'utilisateur. Les systèmes analogiques sont paramétrables à la fois statiquement au moment de la création du programme, mais aussi dynamiquement au cours du déroulement du programme. Cette perspective nous a paru intéressante du fait que les grandeurs mesurées sont analogiques et de faibles valeurs. Ainsi nous pouvons les amplifier tout en maîtrisant le gain de l'amplification.

De plus le logiciel de programmation du PSoC est gratuit et la configuration des Entrées/Sorties du microcontrôleur est totalement paramétrable (entrée, sortie, numérique et analogique) par une interface graphique, ce qui est très agréable à l'usage (voir figure 2).

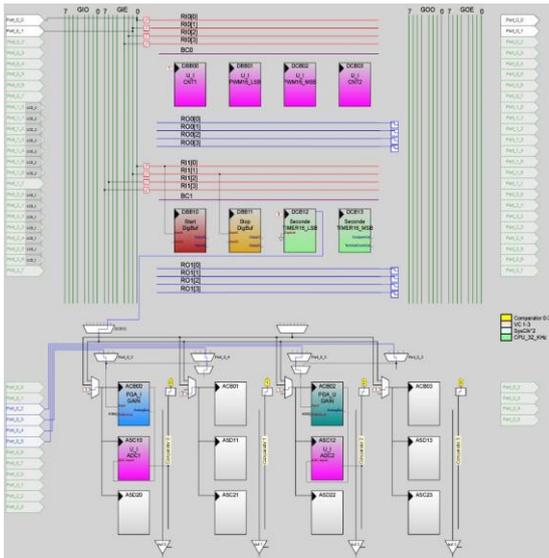


Figure 2 : Interface graphique pour la configuration des entrées/sorties du PSoC

Pour réaliser la fonction de mesure de tension et de courant, nous utilisons un bloc analogique de gain et 6 blocs analogiques et numériques pour la conversion analogique/numérique des signaux. Comme tout système numérique, ce microcontrôleur fonctionne grâce à une horloge. L'horloge système de 24MHz est interne au microcontrôleur et permet, grâce à des diviseurs, d'obtenir les horloges nécessaires aux différents blocs. Pour le convertisseur analogique/numérique nous avons choisi de calculer la valeur binaire des signaux sur 8 bits, nous souhaitons ainsi obtenir une fréquence d'échantillonnage d'environ 1.2kHz, ce qui est suffisant pour les signaux étudiés ici.

#### 4. L'algorithme de calcul

Afin de réaliser l'acquisition de la tension et du courant nous utilisons l'algorithme décrit sur la figure 3.

**Initialisation des variables :** dans ce bloc nous définissons les différentes variables dont nous aurons besoins, notamment les gains des blocs analogiques PGA\_I (GainI) et PGA\_U (GainU) y sont définis à 1, pour commencer.

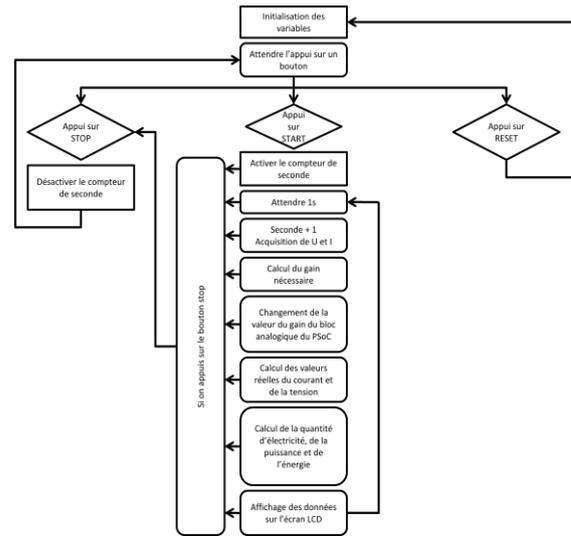


Figure 3 : Algorithme de mesure, de calcul et d'affichage des données

**Attendre l'appui sur un bouton :** la maquette possède trois boutons « START » « STOP » et « RESET », tant que l'on appui pas sur le bouton « START », l'écran LCD affiche « Energiemètre ».

**Activer le compteur de seconde :** une fois le bouton « START » enfoncé, on active le compteur qui va s'incrémenter toutes les secondes, ce compteur va nous permettre d'afficher le temps et de synchroniser nos acquisitions afin de calculer l'énergie et la quantité d'électricité.

**Acquisition de U et I :** on lit les valeurs en sortie du convertisseur analogique numérique deux voies, et on obtient deux valeurs « Tension » et « Courant » comprises entre -128 et +127.

**Calcul des gains :** on calcul les gains « GainU » et « GainI » nécessaire pour que les valeurs de l'acquisition ne soit pas noyé dans le bruit de mesure. Ce calcul se fait de la façon suivante :

- On calcul les deux valeurs A et B avec :

$$A = \frac{127 * GainI}{Courant}$$

$$B = \frac{127 * GainU}{Tension}$$

- Ensuite ces valeurs sont comparées à des plages de valeurs et on en déduit les gains « GainU » et « GainI » (voir figure 4).

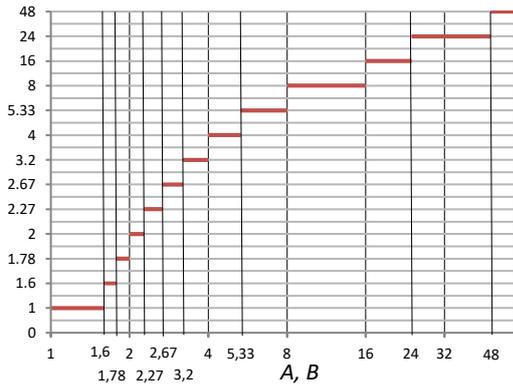


Figure 4 : valeurs de « GainU » et « GainI » en fonction de A et B

**Changement des valeurs de gains :** lors de cette étape nous changeons les valeurs de gains des blocs analogiques PGA\_I (GainI) et PGA\_U (GainU).

**Calcul des valeurs réelles des courants et tension :** lors de cette étape nous multiplions les valeurs de « Tension » et Courant » par 5/255, ce qui correspond à 5V (la valeur maximale en entrée du PSoC) et 255 (la valeur maximale en sortie du CAN) et nous divisons par la valeur du gain « GainU » ou « GainI ». Ce qui donne :

$$dCourant = \frac{5}{255} * \frac{Courant}{GainI}$$

$$dTension = \frac{5}{255} * \frac{Tension}{GainU}$$

**Calcul de la quantité d'électricité, de la puissance et de l'énergie :** la quantité d'électricité est calculée à partir de l'intégration du courant, comme nous faisons la mesure de courant chaque seconde, il suffit de sommer les valeurs de dCourant. La puissance est calculée en multipliant dTension et dCourant en sommant le résultat pour en calculer l'énergie.

**Affichage des données sur l'écran LCD :** pour afficher les données sur l'écran LCD, il faut les convertir en suite de caractères et convertir les secondes en heures:minutes:secondes.

### 5. Résultats obtenus

Afin de tester la maquette nous avons réalisé l'expérience suivante :

- Mesures réalisées avec un énergiemètre du commerce : charge d'une pile à hydrogène pendant 15 minutes. (figure 5)

- Mesures réalisées avec l'énergiemètre étudié : charge de la même pile à hydrogène pendant 15 minutes. (figure 6)

Ces mesures nous montrent que nous avons une erreur de 0,73% sur la mesure de l'énergie et 0,42% d'erreur sur la mesure de la quantité d'électricité.

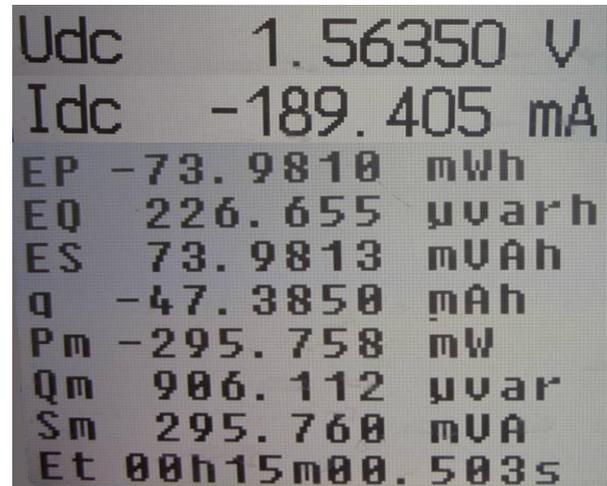


Figure 5 : Résultats obtenus avec l'énergiemètre du commerce

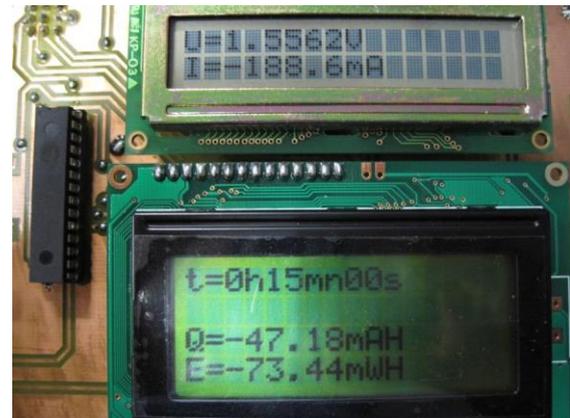


Figure 6 : Résultats obtenus avec l'énergiemètre étudié

### 6. Bilan budgétaire

Le but de cette maquette est de faire des mesures de tension, courant, énergie et quantité d'électricité avec des résultats comparables à un énergiemètre du commerce tout en limitant les coûts de fabrication. Le coût total de la maquette est de 78,17€ en tenant compte du PSoC, des afficheurs, des connecteurs, du boîtier, etc. Bien en dessous du prix d'un énergiemètre du commerce sur dimensionné pour notre application.

## 7. Conclusion

L'énergiemètre réalisé est un appareil qui mesure le courant et la tension aux bornes d'une  $\mu$ -pile à combustible. La mesure de courant est réalisée en mesurant la différence de potentiel aux bornes d'une résistance de  $1\Omega$  à 1%.

Afin de calculer l'énergie et la quantité d'électricité nous utilisons un microcontrôleur de type PSoC. Nous devons adapter les mesures afin qu'elles soient entre 0 et 5V pour que le PSoC les utilise. Dans le microcontrôleur, nous avons implémenté des gains variables afin d'utiliser au mieux les convertisseurs analogique numérique. À l'aide d'un programme nous calculons l'énergie et la quantité d'électricité fournie ou consommée par la pile à combustible et nous affichons les résultats sur des afficheurs LCD.

La comparaison de mesures avec un énergiemètre du commerce nous a montré que nous avons une erreur faible sur la mesure, moins de 1%.

Le prix de la carte est très faible par rapport à l'énergiemètre du commerce, ce qui permet de faire des économies et d'acheter plus de matériel.

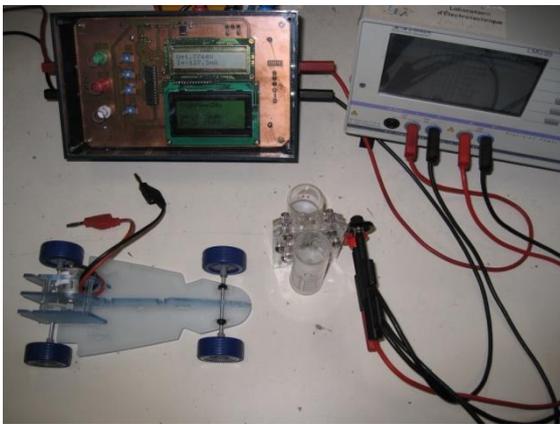


Figure 7 : Energiemètre étudié +  $\mu$ -pile à combustible

## 8. Bibliographie

- [1] – Datasheet - CY8C27443 de Cypress
- [2] – Datasheet - Programmable Gain Amplifier
- [3] – Datasheet - Dual Input 7 to 13-Bit Incremental ADC
- [4] – Datasheet - Character LCD

## Annexes

```

//-----
// C main line
//-----

////////////////////////////////////
// Fonction Main() //
////////////////////////////////////
void main()
{
    M8C_EnableGInt; // Interruptions globales
    LCD_1_Start(); // Demarrage du LCD1
    LCD_2_Start(); // Demarrage du LCD2
    PGA_U_Start(PGA_U_HIGHPOWER); // Demarrage du gain U
    PGA_I_Start(PGA_I_HIGHPOWER); // Demarrage du gain I
    PGA_I_SetGain(PGA_I_G1_00);
    PGA_U_SetGain(PGA_U_G1_00);
    U_I_Start(U_I_HIGHPOWER); // Demarrage du CAN double
    U_I_GetSamples(0); // Conversion en continue
    secondes = 0;
    minutes = 0;
    heures = 0;
    Start_Start();
    Start_EnableInt();
    Stop_Start();
    Stop_EnableInt();
    LCD_2_Position(0,0);
    LCD_2_PrCString("Energiemetre");
    Mesure();
}

////////////////////////////////////
// Fonction Mesure() //
////////////////////////////////////
void Mesure()
{
    while(1)
    {
        if(iStart == 1)
        {
            Seconde_EnableInt(); //
            Seconde_Start(); //
        }
        else
        {
            Seconde_Stop(); //
            Seconde_DisableInt(); //
        }
    }
}

////////////////////////////////////
// Fonction calculs() //
////////////////////////////////////
void calculs()
{
    if(Courant <= 5 && Courant >= -5)
    {
        Courant = 0;
    }
    if(Tension <= 5 && Tension >= -5)
    {
        Tension = 0;
    }
    dCourant = -0.0196 * Courant / GainI;
    dTension = 0.0196 * 2 * Tension / GainU;

    //////////////////////////////////////
    // Calcul de la quantité d'électricité //
    //////////////////////////////////////
    IT = ITp + dCourant * 1;
    ITp = IT;

    //////////////////////////////////////
    // Calcul de la puissance //
    //////////////////////////////////////
    P = dCourant * dTension; // 0.154

    //////////////////////////////////////
    // Calcul de l'énergie //
    //////////////////////////////////////
    E = Ep + P;
    Ep = E;
}

void start()
{
    iStart = 1;
}

void stop()
{
    iStart = 0;
}

void calcul_temps()
{
    secondes = secondes + 1;

    if (OK == 1)

```

```

    {
        mesure_U_I();
    }
}

void mesure_U_I()
{
    double A = 0;
    double B = 0;

    OK = 0;

    //////////////////////////////////////
    // Mesure du courant et de la tension //
    //////////////////////////////////////
    Tension = U_I_iGetData2ClearFlag();
    Courant = U_I_iGetData1ClearFlag();
    B = 127 * GainU / Tension;
    A = 127 * GainI / Courant;

    //////////////////////////////////////
    // Amplification du courant //
    //////////////////////////////////////

    if (A>48)
    {
        PGA_I_SetGain(PGA_I_G48_0); GainI = 48;
    }
    else if (A<=48 && A>24)
    {
        PGA_I_SetGain(PGA_I_G24_0); GainI = 24;
    }
    else if (A<=24 && A>16)
    {
        PGA_I_SetGain(PGA_I_G16_0); GainI = 16;
    }
    else if (A<=16 && A>8)
    {
        PGA_I_SetGain(PGA_I_G8_0); GainI = 8;
    }
    else if (A<=8 && A>5.33)
    {
        PGA_I_SetGain(PGA_I_G5_33); GainI = 5.33;
    }
    else if (A<=5.33 && A>4)
    {
        PGA_I_SetGain(PGA_I_G4_0); GainI = 4;
    }
    else if (A<=4 && A>3.2)
    {
        PGA_I_SetGain(PGA_I_G3_20); GainI = 3.2;
    }
    else if (A<=3.2 && A>2.67)
    {
        PGA_I_SetGain(PGA_I_G2_67); GainI = 2.67;
    }
    else if (A<=2.67 && A>2.27)
    {
        PGA_I_SetGain(PGA_I_G2_27); GainI = 2.27;
    }
    else if (A<=2.27 && A>2)
    {
        PGA_I_SetGain(PGA_I_G2_00); GainI = 2;
    }
    else if (A<=2 && A>1.78)
    {
        PGA_I_SetGain(PGA_I_G1_78); GainI = 1.78;
    }
    else if (A<=1.78 && A>1.6)
    {
        PGA_I_SetGain(PGA_I_G1_60); GainI = 1.6;
    }
    else if (A<=1.6 && A>1)
    {
        PGA_I_SetGain(PGA_I_G1_00); GainI = 1;
    }
    }

    //////////////////////////////////////
    // Amplification de la tension //
    //////////////////////////////////////

    if (B>48)
    {
        PGA_U_SetGain(PGA_U_G48_0); GainU = 48;
    }
    else if (B<=48 && B>24)
    {
        PGA_U_SetGain(PGA_U_G24_0); GainU = 24;
    }
    else if (B<=24 && B>16)
    {
        PGA_U_SetGain(PGA_U_G16_0); GainU = 16;
    }
    else if (B<=16 && B>8)
    {
        PGA_U_SetGain(PGA_U_G8_00); GainU = 8;
    }
    else if (B<=8 && B>5.33)
    {
        PGA_U_SetGain(PGA_U_G5_33); GainU = 5.33;
    }
    else if (B<=5.33 && B>4)
    {
        PGA_U_SetGain(PGA_U_G4_00); GainU = 4;
    }
    else if (B<=4 && B>3.2)
    {
        PGA_U_SetGain(PGA_U_G3_20); GainU = 3.2;
    }
    else if (B<=3.2 && B>2.67)
    {
        PGA_U_SetGain(PGA_U_G2_67); GainU = 2.67;
    }
    else if (B<=2.67 && B>2.27)
    {
        PGA_U_SetGain(PGA_U_G2_27); GainU = 2.27;
    }
    else if (B<=2.27 && B>2)
    {
        PGA_U_SetGain(PGA_U_G2_00); GainU = 2;
    }
    else if (B<=2 && B>1.78)
    {
        PGA_U_SetGain(PGA_U_G1_78); GainU = 1.78;
    }
    else if (B<=1.78 && B>1.6)
    {
        PGA_U_SetGain(PGA_U_G1_60); GainU = 1.6;
    }
    else if (B<=1.6 && B>1)
    {
        PGA_U_SetGain(PGA_U_G1_00); GainU = 1;
    }
    else if (B <= 1)
    {
        PGA_U_SetGain(PGA_U_G0_50); GainU = 0.50;
    }
    }

    U_I_ClearFlag();
    OK = 1;
    PRTODR |= 0x80;
    calculs();
    affichage();
}

void affiche_temps()
{
    if(secondes >= 60)
    {
        minutes = minutes + 1;
        secondes = 0;
        if(minutes >= 60)
        {
            heures = heures + 1;
            minutes = 0;
        }
    }
    dt = secondes + 60 * minutes + 3600 * heures;
    LCD_1_Position(0,0);
    LCD_1_PrCString("t=");
    cheures = ftoa(heures,0);
    LCD_1_PrString(cheures);
    LCD_1_Position(0,3);
    LCD_1_PrCString("h");
    if(0 <= minutes && minutes < 10)
    {LCD_1_PrCString("0");}
    cminutes = ftoa(minutes,0);
    LCD_1_PrString(cminutes);
    LCD_1_Position(0,6);
    LCD_1_PrCString("mn");
    if(0 <= secondes && secondes < 10)
    {LCD_1_PrCString("0");}
    csecondes = ftoa(secondes,0);
    LCD_1_PrString(csecondes);
    LCD_1_Position(0,10);
    LCD_1_PrCString("s ");
}

void affiche_U()
{
    LCD_2_Position(0,0);
    LCD_2_PrCString("U=");
    if(dTension == 0)
    {
        ctension = ftoa(dTension,0);
        LCD_2_PrString(ctension);
        //LCD_2_Position(1,14);
        LCD_2_PrCString("000000000V ");
    }
    if(dTension < 1 && dTension > -1 && dTension != 0)
    {
        dTension1000 = dTension * 1000;
        ctension = ftoa(dTension1000,0);
        LCD_2_PrString(ctension);
        LCD_2_Position(0,8);
        LCD_2_PrCString("mV ");
    }
    else
    {
        ctension = ftoa(dTension,0);
        LCD_2_PrString(ctension);
        LCD_2_Position(0,8);
        LCD_2_PrCString("V ");
    }
}

```

```

    }
}

void affiche_I()
{
    LCD_2_Position(1,0);
    LCD_2_PrCString("I=");
    if(dCourant == 0)
    {
        ccourant = ftoa(dCourant,0);
        LCD_2_PrCString(ccourant);
        //LCD_2_Position(1,14);
        LCD_2_PrCString("000000000A");
    }
    if(dCourant < 1 && dCourant > -1 && dCourant != 0)
    {
        dCourant1000 = dCourant * 1000;
        ccourant = ftoa(dCourant1000,0);
        LCD_2_PrCString(ccourant);
        LCD_2_Position(1,8);
        LCD_2_PrCString("mA");
    }
    else
    {
        ccourant = ftoa(dCourant,0);
        LCD_2_PrCString(ccourant);
        LCD_2_Position(1,8);
        LCD_2_PrCString("A");
    }
}

void affiche_IT()
{
    LCD_1_Position(0,16);
    LCD_1_PrCString("Q=");
    ITAH = IT / 3600;

    if(ITAH == 0)
    {
        cIT = ftoa(ITAH,0);
        LCD_1_PrCString(cIT);
        //LCD_1_Position(2,9);
        LCD_1_PrCString("AH");
    }

    if((ITAH < 0 && ITAH > -0.000001) || (ITAH > 0 &&
ITAH < 0.000001))
    {
        dIT = ITAH * 1000000000;
        cIT = ftoa(dIT,0);
        LCD_1_PrCString(cIT);
        LCD_1_Position(2,4);
        LCD_1_PrCString("nAH");
    }

    if((ITAH <= -0.000001 && ITAH > -0.001) || (ITAH >=
0.000001 && ITAH < 0.001))
    {
        dIT = ITAH * 1000000;
        cIT = ftoa(dIT,0);
        LCD_1_PrCString(cIT);
        LCD_1_Position(2,4);
        LCD_1_PrCString("uAH");
    }

    if((ITAH <= -0.001 && ITAH > -1) || (ITAH >= 0.001
&& ITAH < 1))
    {
        dIT = ITAH * 1000;
        cIT = ftoa(dIT,0);
        LCD_1_PrCString(cIT);
        LCD_1_Position(2,4);
        LCD_1_PrCString("mAH");
    }

    if(ITAH >= 1 || ITAH <= -1)
    {
        dIT = ITAH;
        cIT = ftoa(dIT,0);
        LCD_1_PrCString(cIT);
        LCD_1_Position(2,4);
        LCD_1_PrCString("AH");
    }
    LCD_1_Position(1,0);
    LCD_1_PrCString(" ");
}

void affiche_E()
{
    LCD_1_Position(1,16);
    LCD_1_PrCString("E=");
    E = E / 3600;
    if(E == 0)
    {
        cE = ftoa(E,0);
        LCD_1_PrCString(cE);
        //LCD_1_Position(3,9);
        LCD_1_PrCString("WH");
    }

    if((E < 0 && E > -0.000001) || (E > 0 && E <
0.000001))
    {
        dE = E * 1000000000;
        cE = ftoa(dE,0);
        LCD_1_PrCString(cE);
        LCD_1_Position(3,4);
        LCD_1_PrCString("nWH");
    }

    if((E <= -0.001 && E > -1) || (E >= 0.001 && E < 1))
    {
        dE = E * 1000;
        cE = ftoa(dE,0);
        LCD_1_PrCString(cE);
        LCD_1_Position(3,4);
        LCD_1_PrCString("mWH");
    }

    if(E >= 1 || E <= -1)
    {
        cE = ftoa(E,0);
        LCD_1_PrCString(cE);
        LCD_1_Position(3,4);
        LCD_1_PrCString("WH");
    }
}

void affichage()
{
    // Affichage des valeurs //
    affiche_I();
    affiche_U();
    affiche_E();
    affiche_IT();

    // Affichage du temps //
    affiche_temps();
}

```

# Développement d'un modèle de panneau photovoltaïque sous Psim

JM ROUSSEL, T AUBRY

IUT de l'Indre, Département GEII, 2 avenue François Mitterrand 36000 CHATEAUROUX

Courriel : [jean-marc.rousseau@univ-orleans.fr](mailto:jean-marc.rousseau@univ-orleans.fr)

**Résumé :** Pour pouvoir développer une chaîne complète de conversion solaire photovoltaïque pour la simulation sous PSIM, il est nécessaire de disposer d'un modèle électrique simple pour un module photovoltaïque dans le but d'étudier l'interaction entre un convertisseur et le panneau PV.

Le modèle désiré doit être défini en fonction des paramètres environnementaux (température, éclairement). Une validation du module PV sous PSIM est effectuée pour un panneau KC125G de la société Kyocera.

**Mots clés :** énergie photovoltaïque, modèle du panneau, DLL, PSIM

## 1. Introduction

En raison des besoins croissants de la demande énergétique, une augmentation mondiale de la consommation de l'électricité a été observée pendant les dernières décennies.

Actuellement la production mondiale d'électricité est produite par combustion de ressources non renouvelables (charbon, gaz, pétrole, nucléaire), dont le délai d'épuisement est estimé à quelques décennies. De plus, ce type de production d'énergie est très polluant. La diversité énergétique n'est pas une lubie mais répond à des impératifs stratégiques, géopolitiques et écologiques forts. On oublie trop souvent le taux de dépendance énergétique de l'UE ; d'ici 2030, 80% de la consommation de gaz et 90% de pétrole seront assurées par des importations.

L'énergie solaire représente un gisement important au niveau de la surface du globe terrestre. En France, la quantité d'énergie solaire annuelle disponible varie entre environ 1000 et 1400 kWh/m<sup>2</sup>. Cette énergie peut être convertie en chaleur à l'aide de modules solaires thermiques ou en électricité à l'aide de panneaux photovoltaïques.

Selon les projections de l'EPIA (European Photovoltaic Industry Association), le solaire photovoltaïque devrait donc être la première des énergies renouvelables pour la production d'électricité dans les années 2030 voir 2040.

Afin d'être en adéquation avec ce marché de l'emploi en plein développement, il devient important de former des techniciens disposant de compétences dans ce domaine.

Pour cela, l'objet de notre travail porte sur la modélisation d'un panneau photovoltaïque dans

l'environnement PSIM. Le but est de pouvoir développer un système complet de conversion solaire photovoltaïque pour la simulation avec des étudiants de deuxième année de DUT GEII dans le cadre des énergies renouvelables [6].

Après une présentation générale d'une cellule photovoltaïque, l'article détaille la modélisation d'un panneau PV et l'implantation sous l'environnement PSIM.

## 2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

### 2.1. Introduction

L'effet photovoltaïque a été découvert par Edmond Becquerel en 1839, il mit en évidence que certains matériaux délivraient une petite quantité d'électricité quand ils étaient exposés à la lumière.

L'explication physique de l'effet photovoltaïque est découverte par Einstein en 1904-1905. La mécanique quantique permet une compréhension plus fine du phénomène.

Mais, il a fallu attendre le début des années 50 au sein des laboratoires Bell pour sa mise en application pratique dans la réalisation d'une cellule PV en silicium d'un rendement de 4,5 %.

### 2.2. Fonctionnement

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- absorption des photons par le matériau constituant la cellule ;

- conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur ;
- collecte des particules générées par le dispositif.

Le matériau constituant la cellule doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant, d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque. Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électron/trou est nécessaire. Pour cela, on utilise le plus souvent une jonction PN.

Pour plus de détails sur cette partie on se référera aux articles de S.Astier [1] et de JC.Muller [5]

### 3. Modélisation d'un panneau photovoltaïque

#### 3.1. Objectifs

Le modèle à déterminer doit reproduire le comportement électrique d'un module PV dans toutes les circonstances de fonctionnement, soit principalement en fonction :

- de l'irradiance;
- de la température du modèle ;
- du nombre de cellules séries.

De nombreux modèles mathématiques ont été développés pour représenter leur comportement très fortement non linéaire. Celui-ci résulte des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs constitutions. Il existe dans la littérature plusieurs modèles du module photovoltaïque dérivées de la physique de la jonction PN [4] permettant de décrire la caractéristique I(V). Dans le cadre de cet article, on a retenu le modèle à une diode.

#### 3.2. Modèle à une diode

Le fonctionnement d'un module photovoltaïque est décrit par le modèle à une diode (figure 1), établi par Shockley pour une cellule photovoltaïque.

On peut généraliser à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série.

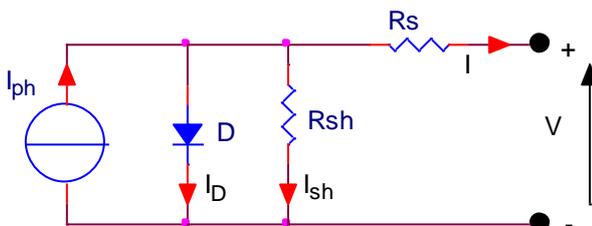


Figure 1 : Modèle d'une cellule photovoltaïque à une diode

Le modèle à une diode est le modèle le plus souvent utilisé. Il contient quatre paramètres :

-  $I_{ph}$  représente le photo-courant qui est proportionnel à l'irradiance, avec correction selon la température ;

-  $I_D$  désigne le courant dans la diode ;

-  $R_{sh}$  représente les différentes résistances de contacts et de connexions ;

-  $R_s$  provient des contacts métalliques et des résistances de fuite sur la périphérie de la cellule.

Le courant généré par le module est donné par l'équation au noeud :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (1)$$

La résistance  $R_{sh}$  peut être négligée dans le cas d'une cellule cristalline unique ce qui n'est pas le cas pour une cellule amorphe. Le terme  $I_{sh}$  sera négligé par la suite.

D'après les travaux de G.Walker [7], les équations qui décrivent la caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque sont les suivantes :

$$I = I_{ph} - I_0 [\exp(q(V + IR_s)/(nkT)) - 1] \quad (2)$$

$$I_{ph}(T) = I_{ph}(T_1) [1 + a(T - T_1)] \quad (3)$$

$$I_{ph}(T_1) = (G/G_{ref}) I_{sc}(T_1, ref) \quad (4)$$

$$a = [I_{sc}(T_2) - I_{sc}(T_1)]/I_{sc}(T_1) * 1/(T_2 - T_1) \quad (5)$$

$$I_0 = I_0(T_1) [(T/T_1)^{3/n}] [\exp(qV_g/nk)/(1/T - 1/T_1)] \quad (6)$$

$$I_0(T_1) = I_{sc}(T_1) / [\exp(qV_{oc}(T_1)/nkT_1) - 1] \quad (7)$$

$$R_s = -dV/dI_{voc} - 1/X_V \quad (8)$$

$$X_V = I_0(T_1) * q/nkT_1 * \exp[qV_{oc}(T_1)/nkT_1] \quad (9)$$

Avec :

$q = 1,6.10^{-19} C$  : charge d'un électron

$k = 1,38.10^{-23} J/K$  : constante de Boltzmann

$T$  : température ambiante en Kelvin

$G, G_{ref}$  : irradiance réelle et sous condition de référence ( $W/m^2$ )

$n$  : coefficient dépendant du matériau

$V_g$  : énergie de Gap du matériau de la cellule

$V_g = 1,12 eV$  pour du Si cristallin

Toutes les constantes dans les équations ci-dessus peuvent être déterminées en examinant les documentations constructeurs du panneau solaire. Dans le cas de notre modélisation, on utilisera le panneau Kyocera KC125G disponible à l'IUT.

Le photo-courant  $I_{ph}$ , équations (3) et (4), varie avec l'irradiance et la température : on le détermine par rapport à des valeurs données aux conditions de référence **STC** (« Standard Test Conditions » ; 1000W/m<sup>2</sup>, 25°C, spectre AM1,5). Pour le panneau KC125G,  $I_{sc} = 8$  A soit  $I_{ph}(T_1) = 8A/Sun$  (1 Sun = 1000 W/m<sup>2</sup>).

La relation entre le photo-courant et la température est linéaire, la variation du photo-courant est déterminée par le changement de température ; équation (3). Pour le panneau KC125G,  $I_{ph}$  varie de 8 à 8,5 A quand la température évolue de 25 à 75°C.

Une cellule photovoltaïque peut être décrite par l'équation (2). Ainsi dans une cellule photovoltaïque, deux courants s'opposent : le photo-courant et un courant de diode appelé courant d'obscurité qui résulte de la polarisation de la cellule. La caractéristique d'une cellule sous obscurité est identique à celle d'une diode. Sous éclairage, la caractéristique I(V) est décalée par rapport à l'origine à cause du générateur de photo-courant ; équation (2).

La valeur du courant inverse de saturation de la diode  $I_0$  est calculée en utilisant la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  (obtenu pour  $I = 0$ ) et le courant de court-circuit  $I_{sc}$  (obtenu pour  $V = 0$ ) à la température désirée (6).

Une estimation du coefficient  $n$  dépendant du matériau doit être faite. Il prend une valeur entre 1 et 2. Il est proche de 1 pour des forts courants et voisin de 2 pour des faibles courants. La valeur de 1,3 est suggérée comme valeur initiale jusqu'à ce qu'une valeur plus précise soit estimée après ajustement de la caractéristique I(V). Ce coefficient a une incidence sur le coude de la caractéristique I(V).

La relation entre  $I_0$  et la température est complexe, mais heureusement elle ne contient aucune variable qui requiert une évaluation (6).

La résistance série  $R_s$  du module PV a un grand impact sur la pente de la caractéristique I(V), par conséquent la valeur de  $R_s$  est calculée en évaluant la pente  $dI/dV$  de la caractéristique I(V) au point  $V_{oc}$ . On utilise les équations (8) et (9).

### 3.3. Résolution de l'équation I(V)

Pour tracer la caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque, on doit pour différentes valeurs de V calculer le courant I ; équation (2). On reformule le problème sous la forme de la résolution d'une équation  $f(I_n)$  ;  $I_n$  représente le courant :

$$f(I_n) = I_{ph} - I_n - I_0 \exp(q(V + I_n R_s) / (nkT)) - I = 0 \quad (10)$$

La résolution est effectuée de manière numérique par la méthode de Newton. L'idée de la méthode de Newton pour résoudre une équation du type  $f(x) = 0$  est de générer à partir d'une valeur initiale  $x_0$  une suite  $(x_n)_n$  dont la limite est une solution de l'équation. Si cette suite converge alors sa limite est une solution de l'équation  $f(x) = 0$ . L'avantage de cette méthode est qu'elle converge très vite vers la solution si  $x_0$  est bien choisi.

La suite de Newton pour l'équation (10) est définie par la récurrence :

$$I_{n+1} = I_n - f(I_n) / f'(I_n) \quad (11)$$

$$f'(I_n) = -I - I_0 (qR_s / nkT) \exp(q(V + I_n R_s) / (nkT)) \quad (12)$$

## 4. Implantation du modèle sous Psim

Le panneau PV choisi pour la simulation est le KC125G de la société Kyocera. Il est constitué de 36 cellules. Les principales spécifications sont présentées tableau 1 :

At temperature	25°C
Maximum power	125 W
Maximum power voltage	17,4 V
Maximum power current	7,2 A
Open circuit voltage	21,7 V
Short circuit current	8 A

Tableau 1 : Spécifications KC125G

### 4.1. Création d'une DLL

Le logiciel Psim permet d'utiliser des fichiers DLL (bibliothèque de liens dynamiques), pour implanter des composants non définis dans la base de données standard.

La DLL est programmée en langage C et doit porter le même nom que celui qu'elle portera sous Psim afin d'éviter de la renommer après chaque compilation.

### 4.2. Modèle sous Psim

Afin de montrer l'influence de l'irradiance, de la température et du nombre de cellules séries, le modèle basé sous le logiciel Psim est construit comme le montre la figure 2. Les paramètres variables sont inclus dans la DLL externe.

La tension d'alimentation est un paramètre important car elle définit le domaine de validation du modèle réalisé. Elle doit être supérieure à la tension de circuit ouvert.

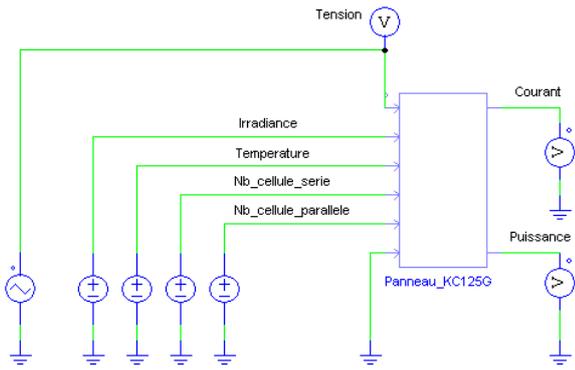


Figure 2 : Modèle d'un panneau photovoltaïque sous Psim

## 5. Résultats de simulations

Pour vérifier la validité de notre modèle, on donne sur les figures (3 à 6) l'évolution des deux principales caractéristiques I(V) et P(V) pour différentes températures et niveaux d'irradiance.

### 5.1. Influence de l'irradiance

On constate dans la partie gauche que le courant est pratiquement proportionnel au flux lumineux (irradiance). Par contre, la tension varie très peu car elle est fonction de la différence de potentiel à la jonction PN du matériau lui-même.

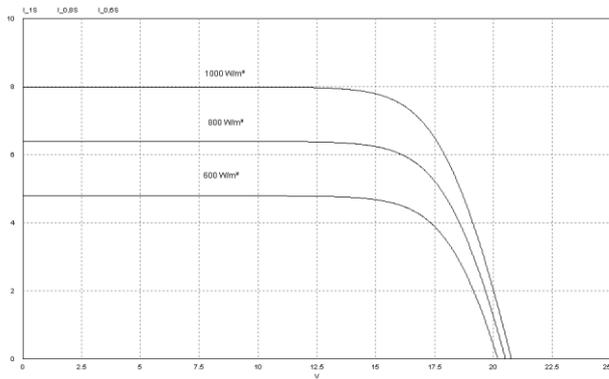


Figure 3 : Caractéristique I(V) pour différentes irradiance

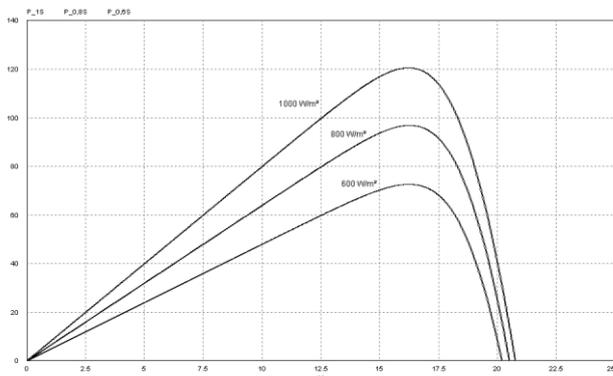


Figure 4 : Caractéristique P(V) pour différentes irradiance

### 5.2. Influence de la température

L'évolution de la caractéristique I(V) en fonction de la température montre une légère augmentation du courant qui découle de la diminution de la largeur de la bande interdite et une diminution significative de la tension en raison d'une forte augmentation du courant direct de la diode [4].

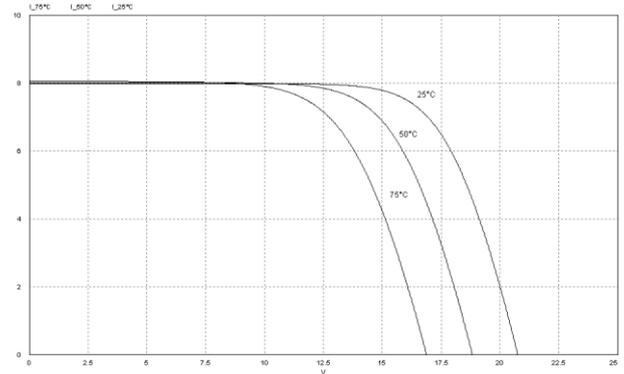


Figure 5 : Caractéristique I(V) pour différentes températures

L'influence de la température est non négligeable sur la caractéristique P(V) d'un panneau PV. On constate une diminution de la puissance lorsque la température augmente.

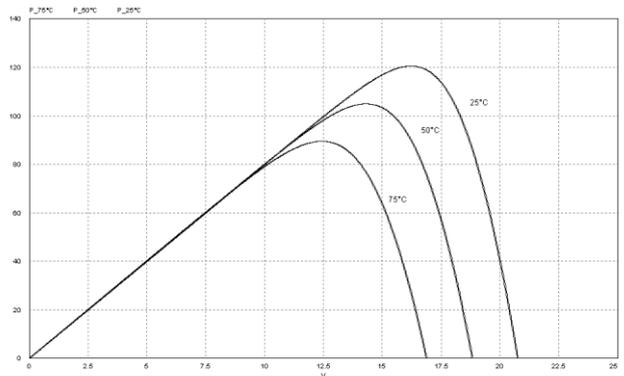


Figure 6 : Caractéristique P(V) pour différentes températures

## 6. Conclusions et perspectives

Cet article a présenté un modèle de panneau photovoltaïque. La caractéristique I(V) est déterminée en fonction de l'irradiance, de la température et du nombre de cellule série.

Ce modèle servira à la réalisation complète d'une modélisation complète d'une chaîne de conversion photovoltaïque sous l'environnement PSIM.

## 7. Remerciements

Les auteurs remercient Mesdemoiselles F.BRUNET et J.CHAPPART, étudiantes au sein du département GEII de l'IUT de l'Indre qui nous ont permis de finaliser ce projet de modélisation.

## 8. Références

- [1] S.ASTIER, *Conversion photovoltaïque : du rayonnement solaire à la cellule*, Techniques de l'ingénieur, D 3935, 2003.
- [2] F.BRUNET, J.CHAPPART, *Modélisation d'une chaîne de conversion solaire photovoltaïque*, Rapport de projet DUT GEII, université d'Orléans, 2011.
- [3] Fransico M.GONZALEZ, LONGATT, *Model of a Photovoltaicin Matlab*, II Cibelec, 2005.
- [4] JA.GOW, CD MANNING, *Developement of a photovoltaic array model for use in power electronics simulation studies*, IEE Proceedings on Electric Power Applications, vol 146, no 2, 2001, pp 193-200, March 1999.
- [5] JC.MULLER, *Electricité photovoltaïque*, Techniques de l'ingénieur, BE 8 578.
- [6] JM.ROUSSEL, *Système photovoltaïque autonome ou couplé au réseau*, La revue 3EI N° 61 juin 2010.
- [7] G.WALKER, Evaluating MPPT converter topologies using matlab PV model, *Journal of Electrical & Electronics Engineering, Australia*, IEAust, vol 21, No 1, 2001, pp 49-56.
- [8] [www.kyocera.fr](http://www.kyocera.fr)

## 9. Annexes : programme en C de la DLL

```
//librairies-----
#include <windows.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
//
//Variables passées en paramètres par PSIM :
// t : temps au pas de simulation
// delt : valeur du pas de simulation
// *in : adresse du premier élément du vecteur
d'entrée
// *out : adresse du premier élément du vecteur
de sortie //
// Notes : Toutes les variables doivent être de type
double sous Psim
// Le nombre d'entrées/sorties du bloc DLL utilisé
dans Psim
```

```
// doit être supérieur ou égal au nombre d'E/S
utilisé dans la DLL
```

```
// La DLL est appelée à chaque pas de simulation
sauf si l'élément suivant est de type discret
```

```
//
// Modélisation Panneau KC125G-----
// (36 cellules séries)
//
```

```
//Déclaration des variables externes-----
```

```
//Entrées
```

```
// Tension appliquée au panneau in[0]
```

```
// Irradiance (en W/m²) in[1]
```

```
// Température in[2]
```

```
// Nombre de cellules en série in[3]
```

```
//Sorties
```

```
// Courant fourni par le panneau out[0]
```

```
// Puissance fournie par le panneau out[1]
```

```
//
```

```
//Seul le nom de la fonction simuser est reconnu
par Psim
```

```
__declspec(dllexport) void simuser (double t,double
delt,double *in,double *out)
```

```
{
```

```
//Affectations des variables externes-----
```

```
double Va = in[0], Suns = in[1]/1000, TaC =
in[2], Ns = in[3], out[0], out[1];
```

```
//Déclaration des constantes-----
```

```
const double k = 1.38e-23 ; //cste de Boltzman
```

```
const double q = 1.60e-19; //charge d'un électron
```

```
const double Vg = 1.12; // tension de gap
```

```
const double n = 1.2; // coefficient matériau
```

```
//Affectations des variables internes-----
```

```
// Passage température T1 de °C en K
```

```
double T1 = 273 + 25;
```

```
// Tension Voc et courant Isc par cellule à T1
```

```
double Voc_T1 = 21.7/Ns;
```

```
double Isc_T1 = 8;
```

```
// Passage température T2 de °C en K
```

```
double T2 = 273 + 75;
```

```
// Tension Voc et courant Isc par cellule à T2
```

```
double Voc_T2 = 17.5/Ns ;
```

```
double Isc_T2 = 8.24;
```

```
// Température actuelle du panneau
```

```
double TaK = 273 + TaC;
```

```
//Température de référence
```

```
double TrK = 273 + 25; //
```

```
//Déclarations des variables temporaires-----
```

```
double a, b, c, d;
```

```
double Iph_T1, Iph, Vt_T1, I0_T1, I0_T2, I0, X2v,
dVdI_Voc, Rs, Vt-Ta, Vc, Ia=0;
```

```
//Quand Va = 0, le photo-courant est approximé
par le courant de court-circuit-----
```

```
Iph_T1 = Isc_T1 * Suns;
a = (Isc_T2 - Isc_T1)/Isc_T1*1/(T2 - T1);
Iph = Iph_T1 * (1 + k0*(TaK - T1));
```

```
// Potentiel thermodynamique à T1 et Tak
Vt_T1 = n*k * T1 / q;
Vt-Ta = n * k * TaK / q;
```

```
// Calcul du courant de saturation
I0_T1 = Isc_T1 / (exp(Voc_T1/(Vt_T1))-1);
b = Vg*q/(n*k);
c = TaK/T1 ;
d = 3/n ;
I0 = I0_T1 * pow(c, d)* exp(b/(1/TaK - 1/T1));
```

```
//Calcul de la résistance série de chaque cellule-----
X2v = I0_T1/(Vt_T1) * exp(Voc_T1/(Vt_T1));
dVdI_Voc = - 0.597 / Ns;// cf data sheet
Rs = - dVdI_Voc - 1/X2v;
```

```
//Tension appliquée à une cellule-----
Vc = Va/Ns;
```

```
//Convergence de la solution : méthode de Newton
//for (j = 1;j = 5; j++)
Ia = Ia - (Iph - Ia - I0*( exp((Vc+Ia*Rs)/Vt-Ta) -
1))/(-1 - (I0*( exp((Vc+Ia*Rs)/Vt-Ta))*Rs/Vt-Ta);
Ia = Ia - (Iph - Ia - I0*( exp((Vc+Ia*Rs)/Vt-Ta) -
1))/(-1 - (I0*( exp((Vc+Ia*Rs)/Vt-Ta))*Rs/Vt-Ta);
Ia = Ia - (Iph - Ia - I0*( exp((Vc+Ia*Rs)/Vt-Ta) -
1))/(-1 - (I0*( exp((Vc+Ia*Rs)/Vt-Ta))*Rs/Vt-Ta);
Ia = Ia - (Iph - Ia - I0*( exp((Vc+Ia*Rs)/Vt-Ta) -
1))/(-1 - (I0*( exp((Vc+Ia*Rs)/Vt-Ta))*Rs/Vt-Ta);
Ia = Ia - (Iph - Ia - I0*( exp((Vc+Ia*Rs)/Vt-Ta) -
1))/(-1 - (I0*( exp((Vc+Ia*Rs)/Vt-Ta))*Rs/Vt-Ta);
```

```
//Calcul du courant et de la puissance en sortie
pour le panneau -----
```

```
out[0] = Ia;
out[1] = out[0] * in[0] ;
}
//fin-----
```

## Et demain ... ?

### Tour d'horizon des avancées technologiques

**Nous vous proposons dans ce numéro de traiter des quelques nouvelles glanées dans le domaine de l'énergie éolienne. Comme c'est la première fois que nous traitons ce sujet, nous allons évoquer des recherches qui datent de l'année 2008 mais qui restent sans doute une perspective intéressante pour les applications industrielles.**

#### Des turbines inspirées par les baleines (Technology Review, 6 mars 2008)

Dans le domaine de l'éolien, le bio-mimétisme s'avère être une source remarquable d'inspiration. En effet, depuis 2008, la société "WhalePower" s'inspire de la forme particulière des nageoires de baleines à bosses pour développer des turbines innovantes.

Les nageoires de ces mammifères marins possèdent une structure dentée sur leur bord d'attaque et des expériences ont montré que l'angle d'attaque d'une nageoire de baleine à bosses peut être de 40 % supérieur à celui d'une nageoire lisse. Cet accroissement de l'angle d'attaque permet de limiter le décrochage (« stall » en anglais) aéro (ou hydro) dynamique. Le phénomène de décrochage signifie qu'il n'y a pas assez de fluide s'écoulant au dessus de l'aile entraînant ainsi une augmentation de la traînée et une baisse de la portance.

Les tests réalisés par le « Wind Energy Institute » du Canada ont montré que les performances de la turbine rapportées aux géométries classiques sont doubles pour des vents proches de 17 miles/h. En d'autres termes, ces turbines génèrent la même puissance à 10 miles/h qu'une turbine conventionnelle fonctionnant avec des vents de 17 miles/h. Enfin ces tests indiquent que ces turbines sont plus sables et robustes et ont par ailleurs subi sans dommage un ouragan, des temps neigeux et glacés.

#### Une meilleure estimation de la production éolienne (arxiv.org/abs/1103.2198, 11 mars 2011)

Les travaux du Dr Zénó Farkas de l'université Eötvös en Hongrie ont permis d'améliorer de façon notable la précision de la prédiction de la production des fermes éoliennes. Son apport réside dans la prise en compte des fluctuations de la densité de l'air.

En effet rappelons tout d'abord que la puissance produite par une éolienne dépend directement de la puissance aéraulique exprimée par la formule suivante  $P=1/2.\rho.A.v^3$  dans laquelle  $v$  représente la vitesse du vent,  $A$  l'aire constante balayée par les pales

de la turbine et  $\rho$  la masse volumique de l'air dont la valeur numérique est généralement prise comme égale à 1,225 kg/m<sup>3</sup> (valeur à 15° C au niveau de la mer).

En travaillant sur les données issues d'une ferme éolienne hongroise entre 2004 et 2006, M. Farkas a calculé la masse volumique de l'air à partir des mesures de température, de pression et d'humidité relative, et montré que celle-ci varie de plus de 20%.

A l'aide d'un algorithme de réseaux de neurones, il a corrélé les données issues de la vitesse du vent et de la masse volumique de l'air avec la puissance réellement produite par la ferme éolienne.

Les résultats montrent un progrès significatif dans l'estimation de la production de l'éolienne. En effet, elle est de l'ordre de 16% plus précise que les estimations classiques !

#### Bilan positif pour la recherche sur l'éolien en mer (bulletins-electroniques.com, 16 mai 2012)

Le parc Alpha Ventus est un site test de l'énergie éolienne en mer du Nord (premier parc allemand offshore, inauguré en 2009), qui est étudié par une plateforme de recherche dénommée RAVE (Research at Alpha Ventus). Trente cinq équipes de recherches coordonnées par l'Institut Fraunhofer pour l'énergie éolienne et de génie des systèmes énergétiques (IWES) de Kassel (Hesse), ont travaillé à des thématiques allant de la réduction des coûts aux impacts environnementaux, en passant par la dynamique des sédiments et l'acceptation du public. En plus des installations éoliennes, ils ont à leur disposition 1200 capteurs disposés en mer et sur les côtes, qui délivrent en continu des informations sur l'état de fonctionnement des éoliennes, les câbles sous-marins et l'environnement.

Soutenu par le Gouvernement fédéral et de grandes entreprises énergétiques allemandes (E-On, Vattenfall et RWE), le site éolien dans sa totalité a produit 270GWh en 2011, sa première année complète de fonctionnement, un chiffre largement supérieur aux attentes des exploitants. Autre chiffre notable, en 2011, le parc a affiché un taux de disponibilité de 97% et plus de 4400 heures de fonctionnement en base.

Le point clé reste l'amélioration de l'intégration de ces éoliennes au réseau national. Les équipes de recherche travaillent notamment à l'amélioration des systèmes de prévision de puissance du vent, en particulier ceux permettant des ajustements précis à court terme.

#### **Les premiers champs éoliens offshore français attribués ([www.meretmarine.com](http://www.meretmarine.com) 6 avril 2012)**

L'appel d'offres portant sur la réalisation des cinq premiers parcs éoliens offshore en France a été remporté par EDF Energies Nouvelles (3 sites) et Iberdrola (1 site). Le dernier site n'a pas été attribué car il a été déclaré infructueux. Les quatre champs sélectionnés doivent permettre d'installer entre 1,8 et 2,25 GW, soit 75 à 100 éoliennes de 5 à 6 MW sur chaque parc pour un investissement de près de 10 milliards d'euros.

Outre le développement prévu d'une filière industrielle de production (à Saint-Nazaire pour la fabrication de l'Haliade 150 (6 MW) par Alstom allié à EDF EN, au Havre pour la fabrication de turbines (5 MW) par Areva allié à Iberdrola), il est envisagé de construire un grand navire de pose d'éoliennes ainsi que toute une flotte de navires de servitude destinés à la maintenance des futurs parcs.

Les premières installations en mer sont prévues pour 2017 et d'autres appels d'offres portant sur de nouveaux sites sont attendus pour les années prochaines.

#### **Des éoliennes off shore à axe vertical ([bulletins-electroniques.com](http://bulletins-electroniques.com), 18 juin 2012)**

L'Université de Stavanger collabore actuellement avec le centre de recherche NORCOWE (Norwegian Centre for Offshore Wind Energy) à Bergen, pour le développement de turbines éoliennes offshore à axe vertical.

Le produit final sera une éolienne flottante d'environ 2,3 MW à axe vertical situé à 132 mètres au dessus du niveau de la mer et qui réalisera un tour complet en 28 secondes. Le premier modèle devrait être prêt pour les essais en 2013 pour un financement total du projet d'environ 700000 euros, fonds attribués par le Conseil Norvégien de la Recherche.

#### **Révolution pour l'éolien : le lidar s'empare du rotor ([bulletins-electroniques.com](http://bulletins-electroniques.com), 6 juin 2012)**

Une équipe de chercheurs de l'université de Stuttgart (Bade-Wurtemberg) et du Laboratoire national des énergies renouvelables (NREL) de Boulder aux Etats-Unis, a réussi à réguler le rotor d'une éolienne en plaçant un lidar sur la nacelle.

Ce radar optique permet de mesurer à distance la vitesse du vent et est capable de détecter à l'avance l'intensité de rafales approchant. Alors que jusqu'à présent le lidar était placé sur le mât ou au sol mais restait unidirectionnel, "l'unité scanner" développée par les chercheurs de Stuttgart permet d'orienter le rayon du lidar dans toutes les directions et par conséquent de connaître tout le champ de vent environnant l'installation éolienne.

L'efficacité de cette technique a été démontrée en pratique sur une installation opérationnelle depuis février 2012. L'anticipation de tous les vents alentours et l'orientation des pales en conséquence a permis de maintenir le rotor à vitesse quasi-constante, ce qui, selon les chercheurs, limitera à terme le vieillissement de l'installation. La précision des mesures rendra également possible un meilleur dimensionnement (réductions du coût des matériaux), et une amélioration du rendement des nouvelles installations.

#### **GE développe des robots d'inspection pour les éoliennes géantes ([Technology Review](http://Technology Review), 14 juin 2012)**

La maintenance des éoliennes géantes est une opération coûteuse qui nécessite jusqu'à présent l'intervention humaine et l'utilisation de télescopes puissants. Cette opération peut s'avérer être très longue et être gênée par les conditions climatiques (nuages, pluie ...).

Pour palier ces difficultés la société General Electric innove avec un robot « grimpeur » qui permet à l'opérateur d'obtenir à distance une meilleure image de l'état du mat de l'éolienne.

Le robot est équipé d'un système d'aspiration pour lui permettre d'adhérer efficacement à la surface, et peut se déplacer par tous les temps et résiste aux vents forts.

Il est aussi envisagé que le robot puisse se déplacer à l'intérieur des pales de la turbine et, à plus long terme, GE imagine la fabrication de robots-hélicoptères volants pour permettre une inspection rapprochée des pales d'éoliennes.

#### **Davantage d'énergie en provenance des centrales de pompage-turbinage pour l'Allemagne, l'Autriche et la Suisse ([bulletins-electroniques.com](http://bulletins-electroniques.com), 31 mai 2012)**

L'accroissement de la proportion des énergies renouvelables dans le mix énergétique nécessite d'augmenter conjointement les moyens de stockages de l'énergie électrique. C'est dans ce but que la Suisse, l'Allemagne et l'Autriche travaillent ensemble au développement de centrales de pompage-turbinage pour rendre plus efficace de la capacité de stockage et mettre en valeur un nouveau potentiel. La position d'une Autriche plaque tournante énergétique et "batterie verte" au centre de l'Europe devrait ainsi être renforcée.



