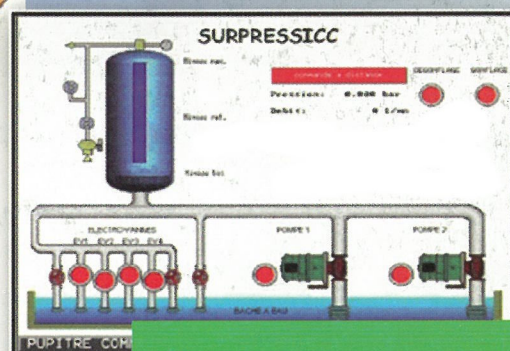
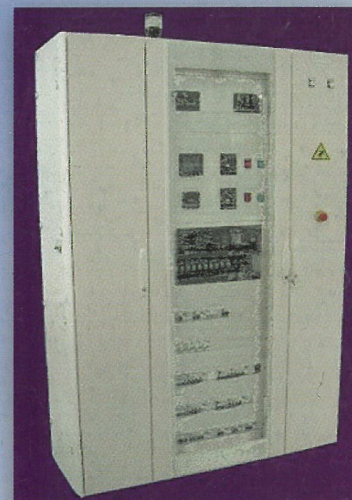
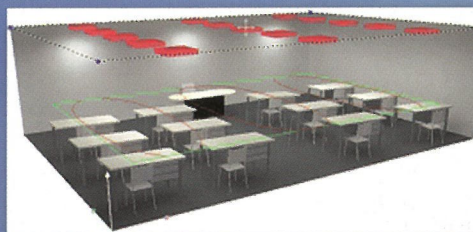




Ressource publiée sur Culture Sciences de l'Ingénieur : <https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>



**Applications
pédagogiques**

**Académie
de Toulouse**

Publication trimestrielle du Cercle Thématique 13.01 de la SEE

ENSEIGNER L'ELECTROTECHNIQUE ET L'ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE



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

N° 54 - Septembre 2008



Journées Electrotechniques du club EEA



Systèmes Electriques pour véhicules du Futur

Lille 11-12 Mars 2009



Organisatrice: Betty LEMAIRE-SEMAIL

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



- **Systèmes de traction**

Véhicules non autonomes

Alimentation, stockage, conversion, motorisation

Véhicules autonomes

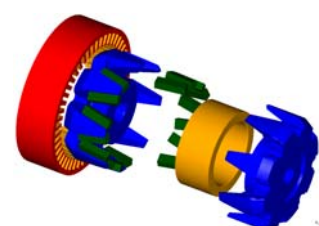
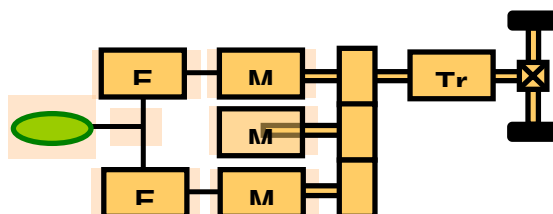
Véhicules électriques et hybrides

- **Systèmes auxiliaires**

Direction, Amortissement, Réseau de bord...

- **Expériences d'enseignement**

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



Site d'accueil :

Polytech'Lille

Soutiens potentiels:

USTL, L2EP, Région





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

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

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

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

3EI : Enseigner l'Electrotechnique et l'Electronique Industrielle

Sommaire du n°54	
Thème : Applications pédagogiques ; académie de Toulouse	
La Revue 3EI, Édition SEE, 17 rue Hamelin 75 783 PARIS CEDEX 16	
Directeur de la publication Alain BRAVO Président de la SEE	
Rédacteur en Chef François BOUCHER	
Adresser les propositions d'article à F. Boucher : revue3ei.art@voila.fr	
Communication Micheline BERTAUX communication@see.asso.fr 01 56 90 37 17 publicité au rapport	
Abonnement (4 numéros par an) déc. 2007, mars, juin, sept. 2008. tarifs TTC : <u>Individuel</u> : France et CEE.....36 € Pays hors CEE.....46 € <u>Collectivités</u> France et CEE.....52 € Pays hors CEE.....65 €	
Réalisation et impression Repro-Systèmes 23, rue de Verdun 77 181 Le Pin	
Routage et Expédition Départ Presse ZI les Richardets 93 966 Noisy le Grand	
Dépôt Légal : Septembre 2008	
Commission Paritaire 1207 G 78028 ISSN 1252-770X	
	p. 2 Éditorial, p. 4 Publications, Informations, p. 5 L'énergie environnement dans l'académie de Toulouse B. ROYANNAIS, P. MAUSSION, P. KALINOWSKI p. 8 Le génie électrique à l'IUFM Midi Pyrénées, un passé et des avenir Les équipes de formation Génie électrique, Technologie, Physique appliquée p. 12 Un lycée éolien en Midi Pyrénées ? J M. POTHIER p. 19 Systèmes solaires photovoltaïques D. DELAGNES, B. FLECHE, R. PORTERIE p. 31 Expérimentation sur la problématique de l'efficacité énergétique dans le domaine du pompage P. LORMEAU p. 38 Etude et exploitation pédagogique du dimensionnement d'une pompe à chaleur O. PLOUVIEZ, F. RODRIGUES, M. LABRAGA, P. RODIER p. 47 Amélioration de l'efficacité énergétique d'un système d'éclairage D. SCANDELLA, M. FABRE, M. LABRAGA, P. RODIER p. 55 Le vélo à assistance électrique (V.A.E) N. HOBBE, S. DORBE, P. KALINOWSKI p. 68 Les défis solaires un outil pédagogique innovant (Juin 2008 académie de Toulouse) J. VRIET, F. CHERIGNY, M. DUBREUIL, G. GAUDRY, J. GONZALEZ, C. HOMPS, E. SAULIERES p. 76 Supervision des systèmes de la zone électrotechnique , Invitation au contrôle- commande via le réseau internet P. MICHEL p. 83 Expérimentation du pilotage à distance d'un système de tri de colis D. PEYTAVI, P. MAUSSION p. 90 Recherche du maximum de puissance sur les générateurs photovoltaïques V. BOITIER, P. MAUSSION, C. CABAL

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).

L'académie de Toulouse est, après les académies de Rennes et Lille, la troisième académie à réaliser le numéro académique du mois de septembre.

Bernard ROYANNAIS (IA-IPR STI), Pascal MAUSSION (IUFM), Philippe KALINOWSKI (CTX) nous présentent la politique éducative de l'académie de Toulouse, ainsi que ses objectifs futurs. Vous pourrez constater au travers de la lecture de ce numéro, que les collègues ont été très productifs,

Nous remercions vivement tous les auteurs de cette revue n°54 au vu du travail fourni. Nos remerciements se portent également à Mr Pascal Maussion, le coordonnateur académique, qui a permis la réalisation de ce numéro dans les délais très contraignants.

Pour les quatre numéros de l'année scolaire qui commence, nous traiterons de la pile à combustible (sur un ou deux numéros), nous envisageons un troisième numéro sur la cogénération, avant de laisser à l'académie d'Aix Marseille le soin de traiter le numéro académique.

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

La réforme du BTS Electrotechnique est lancée, les productions pour répondre au nouveau référentiel doivent être nombreuses, nous vous invitons à nous envoyer les vôtres afin d'alimenter les articles hors thème qui, rappelons le, occupent la moitié de la revue.

Il est évident que des exemples d'expériences sur l'organisation de chantier sont vivement attendus par l'ensemble des collègues.

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

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

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

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

Bonne lecture.

Le Comité de Publication de la Revue3EI

La Revue 3EI

Comité de publication

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

**Lire la revue 3EI c'est bien et même très bien,
Lire la revue 3EI en étant abonné c'est encore mieux !!!!**

BULLETIN D'ABONNEMENT A LA REVUE 3EI

Année 2008 – 2009

N°55 (décembre 2008), n°56 (mars2009), n°57 (juin 2009), et 58 (septembre 2009).

Abonnement individuel :

Adresser le bulletin ci dessous, accompagné d'un chèque libellé à l'ordre de :

SEE- la revue 3EI

à l'adresse suivante

SEE-la revue 3EI

17 rue Hamelin , 75783 PARIS CEDEX 16

D'un montant de : **36 € TTC** pour la **France et pays de la CEE**

Ou de : **46 € TTC** pour les pays **hors CEE**

Nom :.....Prénom

Adresse d'expédition de la revue 3EI :

Rue, n° :.....

Code postal :..... Ville :.....

Pays :.....

Adresse électronique :.....

Activité (pour statistiques) :.....

Abonnement souscrit pour une collectivité (bibliothèque , CDI, laboratoire, entreprises, université, école d'ingénieur, lycée, IUT ...)

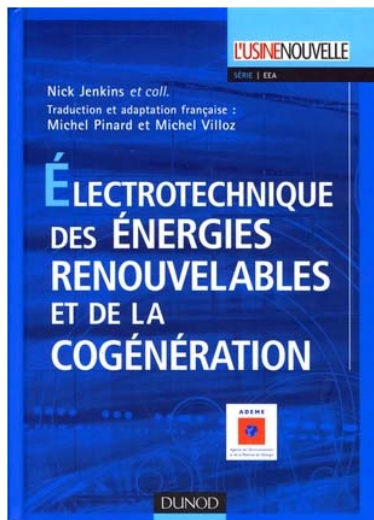
52 € TTC pour la **France et pays de la CEE**

65 € TTC pour les pays **hors CEE**

Prendre soin de mentionner sur le bon de commande le lieu de livraison de la revue ainsi que le destinataire (personne physique ou service). Expédier le bon de commande à

SEE-la revue 3EI

17 rue Hamelin , 75783 PARIS CEDEX 16



Electrotechnique des énergies renouvelables et de la cogénération

Nick JENKINS (traduction : M. PINARD M. VILLOZ)

Editions DUNOD

Destiné aux ingénieurs et techniciens en bureaux d'étude ou de terrain, ainsi qu'aux étudiants en électrotechnique, cet ouvrage dresse un état de l'art des nouvelles possibilités offertes par les sources d'énergie intermittentes. Il présente les différents aspects de la production décentralisée d'électricité par exploitation d'énergies renouvelables ou par cogénération :

Les sources d'énergie intermittente, leurs impacts techniques et économiques sur les réseaux de distribution, les systèmes de transmission et la production centrale d'électricité ;

Les systèmes de transmission et de distribution : transferts de puissance, défauts, stabilité, régimes transitoires, qualité de la puissance transmise ;

Les générateurs : synchrones, asynchrones, convertisseurs, protection contre les surintensités, fiabilité ;

La qualité de l'énergie : défauts de phase, surtensions, hausses de fréquence, inversion du transfert de puissance, perte de l'excitation, charge déséquilibrée, excès d'excitation.

Un dernier chapitre propose un bilan des progrès réalisés et attendus dans ce domaine stratégique et majeur...

Systèmes Electriques pour Véhicules du Futur

Journées thématiques de la section Electrotechnique du club EEA

***11-12 Mars 2009, à l'Université des Sciences et Technologie de Lille
Polytech'Lille***

Dans le contexte énergétique actuel, il devient naturel d'associer les systèmes de transport, qu'ils soient embarqués ou non, à la conversion électromécanique ; au niveau de la chaîne de traction ou propulsion bien sûr, mais aussi au niveau des différents équipements. Les objectifs sont clairement identifiés : réduire l'impact environnemental du véhicule, d'augmenter son efficacité énergétique et son autonomie, améliorer les fonctionnalités au sein du véhicule ou en créer de nouvelles.

Le Génie Electrique a évidemment dans ce contexte un rôle très important à jouer et les compétences doivent permettre de résoudre les problèmes de conversions statique et dynamique de l'énergie, de stockage, de gestion d'énergie ; de plus, tout nouveau système devra pouvoir profiter des avancées en terme de matériaux et respecter une démarche conceptuelle « écologique ».

Ces différentes problématiques seront discutées lors de ces journées, au travers d'exposés pédagogiques, complétés et argumentés par le point de vue des industriels concernés. Des expériences d'enseignement seront également présentées lors des conférences et sous forme de posters afin de favoriser les échanges sur le sujet.

Informations : jean-francois.sergent@univ-lille1.fr

L'Énergie Environnement dans l'académie de Toulouse.

Bernard ROYANNAIS (IA-IPR STI), Pascal MAUSSION (IUFM), Philippe KALINOWSKI (CTX)

Résumé : Cet article est une introduction au numéro spécial de septembre 2008 qui porte principalement sur le thème de l'énergie et de l'environnement. Il décrit la politique académique en la matière, ses acteurs principaux, les actions effectives et à venir.

1. Un contexte d'éducation au développement durable

En 2004 était créé le premier plan triennal d'éducation à l'environnement pour un développement durable dont la mise en oeuvre s'est effectuée essentiellement dans les programmes de sciences et vie de la terre et de géographie, puis, dans le cycle central des enseignements de collège avec une approche transdisciplinaire. Il a été suivi par un nouveau plan triennal 2007-2010 [1] qui introduit l'Education au Développement Durable dans le socle commun comme un moyen de « comprendre l'unité et la complexité du monde ». Mais c'est aussi au travers du programme Sciences et Technologie de l'Ingénieur avec la spécialité Energie et Environnement, que les jeunes technologues pourront acquérir les compétences qui leur permettront « d'agir sur le monde ». La finalité est l'étude de l'énergie et de sa gestion, en évaluant l'impact des choix techniques dans un contexte environnemental dont on connaît maintenant de façon certaine les causes de dégradation. Les compétences développées dans le programme Energie Environnement permettront aux élèves d'aborder l'architecture, le pilotage, la maintenance et la gestion énergétique dans l'industrie, l'habitat et les transports.

2. Une ambition académique

Dans le cadre de l'article 34 de la loi d'orientation et de programme pour l'avenir de l'école, l'Académie de Toulouse [2] a mis en place un plan d'actions suivant 3 axes principaux :

- o mettre en place un groupe de réflexion sur l'enseignement du génie électrique et du génie énergétique (GREEE) dans le cadre de la mise en place du programme Energie Environnement,

- o accompagner l'évolution des compétences des enseignants en photovoltaïque par la mise en place de formation pilotées par l'IUFM,

- o doter l'ensemble des filières du génie électrique et du génie énergétique avec des équipements permettant d'aborder les thématiques de l'Energie Environnement

- o Un groupe de réflexion

- o Le Groupe de Réflexion pour l'Enseignement de l'Energie et Environnement (GRE2E) a été créé en septembre 2006 dans le cadre d'une réflexion pour la mise en place des ex-futurs programmes de Sciences et Technologies de l'Ingénieur. Constitué d'enseignants du secondaire des filières de l'électrotechnique et de l'énergétique, de formateurs de l'IUFM, de Chefs de Travaux et d'un Inspecteur Pédagogique Régional, les axes de travail principaux sont :

- o explorer les aspects scientifiques et technologiques de nouveaux supports en rapport avec la problématique de l'Energie et de l'Environnement ;

- o conduire une réflexion sur les stratégies didactiques à mettre en oeuvre en liaison avec une pédagogie par centres d'intérêts ;

- o redynamiser l'aspect du génie Electrique (plus d'attractivité pour les jeunes avec des supports plus en lien avec les énergies renouvelables et les problèmes environnementaux ;

- o bâtir une base de données de connaissances sur des procédés de transformation d'énergie définis précédemment (alimenter un centre de ressources disponible sur un Environnement Numérique de Travail avec des références bibliographiques, articles, images, liens...) qui permettront à des enseignants d'arriver rapidement à de l'information pertinente, référencée et triée ;

- o construire une réflexion autour des débouchés et perspectives d'emplois, identifier des parcours de formation dans les domaines de l'environnement et des énergies;

- o mettre en place une veille technologique sur un procédé technologique particulier (stages PAF et ou CERPET, formations...);

- o construire des Tps sur des Centres d'Intérêts clairement identifiés et transférables de l'ancien au nouveau programme, en tester la mise en oeuvre avec des élèves et les publier après validation sur le site des ressources académique <http://pedagogie.ac-toulouse.fr/sti/stilt/> et sur le site du Résélec <http://www.iufmrese.cict.fr/>;

- o diffuser l'information sur les savoirs associés aux supports et Centres d'Intérêts auprès de collègues dans

des stages PAF, réunions d'enseignants ou de Chefs de Travaux, témoigner sur l'expérimentation pédagogique.

Les membres de GRE2E sont : Bernard ROYANNAIS (IA-IPR STI), Pascal MAUSSION (Maître de Conférences HdR IUFM Midi Pyrénées), Jean-Luc TROCHET (Chef de Travaux au lycée Victor Hugo de Colomiers), Bruno FLECHE (Lycée Victor HUGO à Colomiers), Nicolas HOBBE et Stéphane DORBE (lycée BOURDELLE à Montauban), Mustapha LABRAGA et Marc FABRE (Lycée Pierre Paul RIQUET à St ORENS), Daniel SCANDELLA et Raymond PORTERIE (Lycée JOLIMONT à Toulouse), Pierre LORMEAU (Lycée MONTEILS à RODEZ), Jean-Marc POTHIER (lycée BORDE-BASSE à Castres), Agnès GASTALDI, Fernand RODRIGUES, Olivier PLOUVIEZ (Lycée Charles de Gaulle à MURET), Philippe RODIER et Serge MIAS (IUFM Midi Pyrénées), Philippe KALINOWSKI (Chef de Travaux au lycée BOURDELLE à Montauban).

2.1. Un accompagnement par la formation IUFM

L'IUFM Midi Pyrénées [3] participe à la formation initiale et continue des maîtres dans le domaine de l'énergie et de l'environnement, pour les filières PLP Electrotechnique, Equipements Techniques et Energie et biotechnologies santé et environnement notamment sur ses sites de Toulouse Rangueil et de Tarbes. La formation initiale sur ce thème jusqu'alors absent des épreuves écrites du PLP Electrotechnique (sauf une exception en 1996 !), prend la forme de TD-TP. En formation continue, l'IUFM Midi Pyrénées a créé, anime et participe à des stages du PAF plutôt destinés aux professeurs de génie électrique, où l'ENSEEIH et l'association Phébus Ariège interviennent notamment. A noter également que l'Université Paul Sabatier anime également un stage de formation continue principalement à destination des professeurs de physique appliquée. Dans le cadre des nouveaux ateliers de l'IUFM (Halle technologique), un générateur photovoltaïque connecté réseau et un pour site isolé, un générateur éolien et divers autres systèmes énergétiques (pompe à chaleur...) seront très prochainement installés. Par ailleurs, le Résélec (Réseau National de Ressources en Electrotechnique) [4] qui porte depuis longtemps cette réflexion au niveau national sous l'égide de l'Inspection générale, est hébergé et animé par l'IUFM Midi Pyrénées. Les ressources pédagogiques sur les thèmes « énergie » font partie des appels à productions depuis 2003.

2.2. Des équipements dans les établissements

La Région Midi-Pyrénées accompagne fortement les établissements en investissant sur des équipements. Dans chaque section Génie Electrotechnique de l'académie sera installée :

o une centrale photovoltaïque de 3Kwc (fin de l'opération en décembre 2008), voir figures 1 et 2



Figure 1 : panneaux solaires sur le toit du Lycée de Colomiers



Figure 2 : Armoire de distribution

o un petit système didactisé de pompage au fil du soleil, voir figure 3.

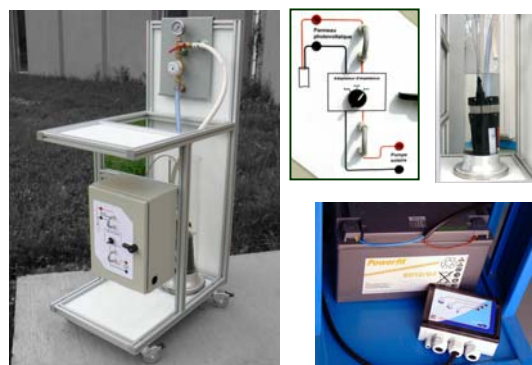


Figure3 : système didactisé de pompage solaire

o un panneau photovoltaïque orientable pour effectuer des caractérisations, voir figure 4

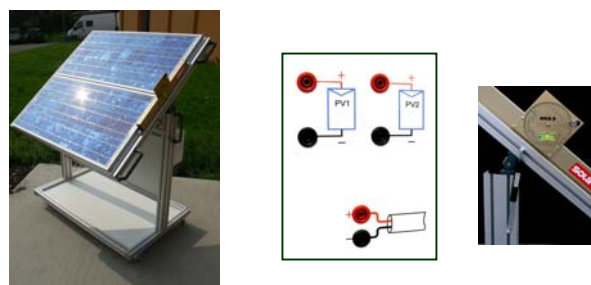


Figure 4 : panneau solaire pour caractérisations

o un vélo à assistance électrique pour développer des activités autour de la problématique des transports de personnes, voir figure 5.



Figure 5 : vélo électrique

D'autres supports font ou ont fait l'objet d'études de la part du groupe GRE2E. On peut citer la pompe à chaleur, un dispositif de chauffage solaire d'eau sanitaire, un dispositif d'éclairage piloté par GTC, un parc d'éoliennes industrielles (850 KW/unité).

2.3. Des formations dans l'enseignement supérieur.

Des formations spécialisées dans les domaines de l'énergie sont proposées dans l'enseignement supérieur dans l'académie :

- o la licence professionnelle STER (Science et Technologie des Energies Renouvelables) à l'IUT de Tarbes-Université Paul Sabatier (Toulouse III), pour « une formation de professionnels compétents dans le domaine de la gestion rationnelle de l'énergie et des énergies renouvelables », option « Ingénierie des systèmes électriques autonomes ou raccordés au réseau », et option « Ingénierie des systèmes thermiques pour les bâtiments tertiaires et les réseaux » [6],

- o un parcours licence à l'Université Paul Sabatier en Sciences De l'Ingénieur avec option «Génie Civil, Habitat, Mécanique », spécialité "Génie de l'habitat" et un Master Professionnel option «Sciences et Techniques de la Matière et de l'Energie », mention «Génie Civil, Mécanique et Structures », spécialité "Génie de l'habitat" [7],

- o une option Eco-Energie en 3^e année d'ingénieur commune à l'ENSEEIH et à l'ENSIACET, pour approfondir les disciplines qui régissent les procédés de conversion de l'énergie, (production utilisation, distribution, stockage) et savoir pratiquer un dialogue interdisciplinaire s'appuyant sur des méthodes nourries de la recherche en vue de la conception de solutions adaptées et optimisées (approche systémique) [8].

3. Efficacité Energétique

Enjeu important de la politique énergétique mondiale de demain, l'efficacité énergétique est définie [9] comme «une stratégie qui réduit les consommations d'énergie, à service rendu égal, et entraîne la

diminution des coûts écologiques; économiques et sociaux liés à la production et à la consommation d'énergie tout en permettant d'augmenter la qualité de la vie de tous les habitants de la planète et celle des générations futures». Les améliorations nécessaires touchent les domaines de la production d'énergie, l'industrie, les transports, l'habitat et le tertiaire ».

Omniprésente dans les différentes thématiques abordées dans l'Energie Environnement, les élèves devront découvrir très tôt la « contrainte Efficacité Energétique » au même titre que l'Eco-Conception [10] afin que l'étude des procédés de production de l'énergie à partir de ressources renouvelables gardent tout leur sens. Le cycle pré-bac (première et terminale STI), serait, pour l'efficacité énergétique, le moment privilégié de la découverte du concept avec des supports choisis dans l'univers quotidien des élèves. L'approfondissement consisterait à systématiser la démarche de mesure et de quantification de l'efficacité sur d'autres systèmes qui s'éloigneront petit à petit du niveau d'évidence des élèves.

Révolution ou évolution dans l'approche du génie électrique et de l'énergétique, mais aussi et surtout dans l'approche pédagogique, l'Efficacité Energétique est la thématique commune de nombreux articles de ce numéro spécial. Ce sera aussi le thème principal d'un séminaire académique au mois de mars 2009.

4. Pour ne pas conclure :

Cette ambition académique se veut la plus large possible du point de vue des thématiques Energie Environnement abordées, et ce dans le cadre d'une approche scientifique pluridisciplinaire rigoureuse visant à « éduquer au choix » et non à « enseigner des choix »

[1] Circulaire N°207-077 du 29-03-2007 : « Education au développement durable »

[2] <http://www.ac-toulouse.fr/web/41-academie.php>

[3] <http://ent.toulouse.iufm.fr/>

[4] <http://www.iufmrese.cict.fr/>

[5] <http://www.phebus-ariège.org/>

[6] <http://www.iut-tarbes.fr/licster/>

[7] <http://ufrpca-sa.ups-tlse.fr/genihabitat/>

[8] http://www.ensiacet.fr/Web_A7/ENSIA7_FR/FORMATION/INGENIEUR/OPTION/ecoe.shtml

[9] Stratégie et moyens de développement de l'efficacité énergétique et des sources d'énergies renouvelables en France. Rapport au premier ministre. La documentation française.

[10] séminaire Eco-Conception : <http://pedagogie.ac-toulouse.fr/sti/stilt/>

Le génie électrique à l'IUFM Midi Pyrénées, un passé et des avenir

Les équipes des formations Génie Electrique, Technologie, Physique Appliquée

IUFM Midi Pyrénées, site de rangueil, 118, route de Narbonne, 31078 Toulouse cedex

Résumé : *Le génie électrique dans les IUFM est une discipline largement ouverte sur le monde, innovante et porteuse d'avenir pour la formation des maîtres, des élèves et plus largement nos sociétés. A l'heure des annonces de « masterisation » de la formation des maîtres, cet article témoigne de nos actions et trace des pistes pour l'avenir.*

1. Introduction

Plusieurs formations comprenant des enseignements de génie électrique sont ou ont été ouvertes au fil des années à l'IUFM Midi Pyrénées [1]. Il s'agit des préparations aux CAPET ou CAPLP génie électrique option électrotechnique ou option électronique, au CAPET génie électrique option informatique et télématique, au CAPES Physique Appliquée, au CAPET de Technologie et au PLP de génie civil option équipements techniques et énergie. L'effectif de ces étudiants ne constitue pas la part principale des effectifs IUFM qui demeurent largement dominés par les professeurs des écoles, les filières littéraires et linguistiques. Néanmoins, avec 130 étudiants et 125 professeurs stagiaires en 2000, la discipline génie électrique n'est pas numériquement négligeable.

Aux antipodes d'un immobilisme parfois décrié, ces formations partagent certaines caractéristiques d'ouverture sur le monde, de pratique de l'innovation et une politique volontariste de développement, au service de la formation des maîtres. Ce positionnement peut sembler immodeste au regard des autres IUFM ou des autres formations d'enseignement supérieur. Il n'en est rien. A l'heure des annonces non concertées de « masterisation » de la formation des maîtres qui oublient d'ailleurs complètement les secteurs technologiques et professionnels et des vives critiques contre « les IUFM », cet article souhaite présenter et souligner le travail des équipes de formation, depuis la création des IUFM en 1991. Il est certain que des pratiques comparables, différentes sans doute mais d'égale dignité, ont été mises en place dans d'autres IUFM. Ce numéro spécial nous donne évidemment une parole privilégiée, mais nous souhaitons que notre expérience soit le premier témoignage de la qualité des

travaux des équipes des IUFM, du nôtre et des autres, où il existe aussi des formateurs compétents et motivés, qui croient encore en leur beau métier.

2. L'ouverture sur le monde.

Les IUFM sont accusés d'être renfermés sur eux-mêmes. Au contraire, notre IUFM a toujours été fortement ouvert sur son environnement, vers ses partenaires académiques et universitaires, nationaux et internationaux.

Des formateurs associés issus de plusieurs lycées ou collèges de l'académie, ont participé aux formations initiales et/ou continues. Notre IUFM s'est d'ailleurs fortement impliqué dans la formation continue du second degré dès la suppression des MAPPEN en 1998. Pendant des années, nos formateurs ont créé, géré, animé des stages de formation continue, des recherche-formations (création d'aide multimédia) ou des formations de formateurs en direction des collègues de collèges ou lycées, dont bon nombre ont été réalisés dans nos locaux. Leur nombre décroît lentement avec les budgets accordés. Les domaines d'intervention en électrotechnique concernent la sécurité électrique ou la sécurité et la santé au travail, l'enseignement sur les systèmes ou les énergies renouvelables et bien sûr la préparation de l'agrégation interne. En électronique, les stages de formation continue ont traité de la simulation, de la programmation (graphique, en C, en VHDL...), des PIC et des CPLD, des modulations numériques, de l'acquisition de données et du pilotage d'instruments local et distant ; des réseaux locaux et bus de terrain en informatique et télématique. La localisation sur notre centre départemental de Tarbes [2] des concours internes du CAPLP et du CAPET en électrotechnique constitue d'autre part une reconnaissance nationale. Enfin, l'affectation des professeurs stagiaires, l'élaboration de la commande et le traitement de l'offre

de formation continue font l'objet de dialogues vifs et constructifs avec les corps d'inspection.

Des conventions avec divers partenaires du monde ayant aussi une mission éducative, ont été signées : CNES, Science Animation par exemple, pour des opérations ponctuelles ou la société PowerSys sur l'usage du logiciel de simulation PSim.



Figure 1 : site IUFM Midi Pyrénées de Tarbes



Figure 2 : Halle technologique IUFM à Toulouse rangueil

L'ouverture sur l'université a pris plusieurs formes, par exemple via des participations d'universitaires aux formations IUFM et réciproquement, de formateurs IUFM à des formations universitaires de niveau L3, M1, M2 ou ingénieur (UPS Toulouse 3, IUT Tarbes, INPT). La mise en place en 1991 d'années préparatoires en génie électrique, intégrées à la Licence Ingénierie Electrique, constitue probablement une singularité intéressante dans le paysage universitaire. La participation au Club EEA et à l'organisation du CETSIS 2003 (Colloque sur l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes) à Toulouse, témoignent également de cette ouverture sur l'université.

La relation de nos équipes avec la recherche universitaire est patente, notamment grâce à la présence d'enseignants chercheurs effectuant leurs travaux de recherche disciplinaire dans des laboratoires toulousains, au LEEI devenu LAPLACE depuis 2007, ou au LAAS. Elle peut également être mise en évidence par l'implication de formateurs universitaires et non universitaires, dans des travaux de recherche pédagogique, valorisés par des publications internationales [3] [4] [5], dans la revue J3eA [6] [7] ou la participation régulière et croissante aux CETSIS 2003, 2005, 2007 et 2008 [8].

Malgré de fortes relations avec les partenaires éducatifs, notre établissement ne s'est pour autant pas coupé du monde des entreprises. En effet, nous avons cherché à promouvoir les stages en entreprise dans la formation des professeurs stagiaires et à les penser en articulation avec le reste de la formation. Par ailleurs, nous avons admis, de manière parfois un peu volontariste, des étudiants issus du monde de l'entreprise ou de l'artisanat, avec souvent des

reconversions réussies. Enfin, notre IUFM a organisé en 2001 un séminaire de travail sur 2 jours entre les IUFM et l'UIMM, (Union des Industries des Métiers de la Métallurgie) alternant des témoignages, des expériences, une visite des usines Airbus... sur la formation tout au long de la vie, l'usage des TICE, l'attrait des filières STI...

Les relations internationales furent moins développées mais ont cependant existé par des actions de formation limitées dans le temps. Elles ont concerné les préparations aux agrégations marocaines et tunisiennes, la formation de professeurs gabonais, une expertise pour la formation des maîtres au Brésil et l'accueil de délégations de Suisse et de Hong-Kong.

3. L'innovation

Les IUFM sont assez injustement taxés d'immobilisme. Si l'innovation dans la formation des maîtres est peut-être difficile à caractériser avec précision, nous énumérons ci-après un ensemble d'actions qui montrent précisément que nos formations ne se limitent pas un « bachotage » en 1^o année ou à du « pédagogisme » déconnecté du terrain en 2^o année.

L'une des marques de fabrique du département génie électrique de l'IUFM est la formation sur les systèmes, présente dès 1991. Fait marquant à souligner, un produit issu de cette expérience est commercialisé depuis plusieurs années [9].

Des semaines thématiques interdisciplinaires ont été mises en place dans la formation des stagiaires, pour des productions pédagogiques sur le thème de l'espace, de l'eau... par exemple. D'abord limitées aux stagiaires STI au début des années 90, elles ont été étendues aux professeurs des écoles, puis à des stagiaires d'autres disciplines. Cette idée initialement STI a été étendue sous forme de semaines communes traitant de la violence, de la laïcité, de l'intégration, du redoublement ou des devoirs à la maison...

Notre IUFM a participé à l'aventure des campus numériques de la Direction de la Technologie dès 2000, pour la mise en place d'éléments de formation à distance et/ou en autonomie en automatique, à destination des candidats au CAPLP Maintenance des Véhicules Automobiles. Ce projet a associé des formateurs de génie électrique, génie mécanique, TICE et psychopédagogie. En continuité, des expériences de formation au pilotage de systèmes à distance (transgerbeur, Tapiris), ont été construites et soutenues par l'établissement, analysées et valorisées [4] [5].

Nous sommes également présents sur le terrain des énergies renouvelables au travers de notre participation au groupe de travail GRE2E, principal contributeur de ce numéro spécial. La mise en place d'équipements

spécialisés (générateur solaire, éolienne, pompe à chaleur...) dans les nouveaux ateliers de la halle technologique, inaugurée à la rentrée 2008 nous ouvrira de nouveaux horizons, cf figure 2.

Nos formateurs ont contribué, aux cotés de nombreux collègues, aux publications et à l'animation du RéSéLec, Réseau National de Ressources en Electrotechnique [10], hébergé en nos locaux.

4. Une politique volontariste de l'établissement

Notre IUFM a, dès sa création, opté pour une quasi-totale responsabilité de ses formations, en partenariat avec les universités et l'académie. Une ENNA existait à Toulouse, elle a constitué le socle sur lequel se sont bâties de nombreuses formations technologiques et professionnelles. L'IUFM a compté entre 1997 et 2000 Midi Pyrénées le plus grand nombre de filières CAPET ou PLP pour 650 étudiants et encore près de 500 étudiants entre 2004 et 2006 [11].

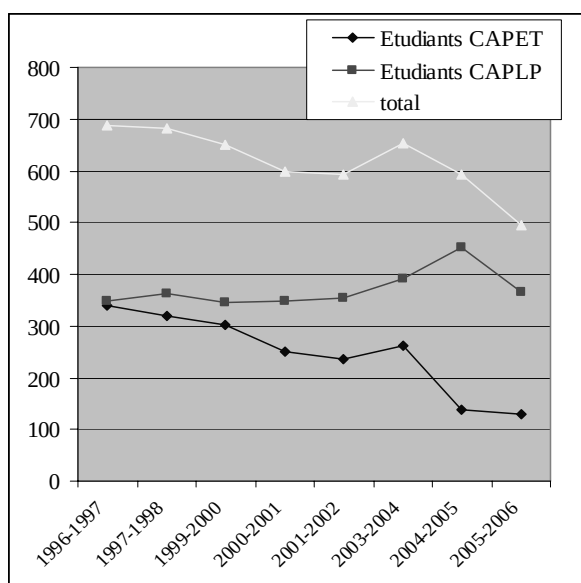


Figure 3 : Evolution des effectifs des étudiants CAPET et CAPLP à l'IUFM Midi Pyrénées

La politique volontariste de l'établissement, largement soutenue par les équipes de direction, s'est traduite :

- par l'ouverture de nouvelles filières de formation (maintenance automobile, génie civil équipements techniques et énergie, génie industriel...),
- par la construction d'un centre départemental sur le site de Tarbes, inauguré en 1994 et consacré à la formation des professeurs stagiaires de STI, avec le soutien fort des collectivités territoriales,
- par la rude négociation d'un ensemble d'ateliers, la halle technologique, dans le contrat de programme

état-établissement 2000-2006 et son inauguration à fin 2008,

- par un soutien spécifique à ces filières dans le cadre du contrat d'établissement,
- par un refus de céder à la facilité et une volonté farouche de promouvoir le mémoire professionnel comme un réel instrument de formation y compris pour les professeurs agrégés, y compris dans la procédure de validation académique,
- par un retour sur les aspects méthodologies de résolution de problèmes de nos disciplines, une dimension professionnelle de la formation, des TP longs orientés « système », la réalisation de maquette pour la préparation de l'épreuve professionnelle, un travail méthodologique justifiant à nos yeux le nom de notre établissement « Formation des Maîtres » et non simplement préparation aux concours,
- par une utilisation forte des référentiels et programmes.

5. Conclusion : le génie électrique est une discipline d'avenir à l'IUFM Midi Pyrénées

Quelles que soient les énergies primaires, (fossiles ou renouvelables) ou les applications, l'électricité est un vecteur énergétique très largement employé. Le développement des générateurs électriques à base d'énergies non fossiles, la diversification des modes de stockage ou d'hybridation des chaînes énergétiques place toujours l'électricité dans un rôle central. La part de l'électricité par habitant a cru en moyenne entre 1996 et 2006, de 5,4% par an en Asie et 1,4% en Europe [12]. Au delà des réformes des voies technologiques et professionnelles, la formation des élèves et donc des maîtres, ne pourra pas éviter de consacrer à l'électricité une part significative.

En permettant l'accès de nos formations à des personnes issues du monde du travail au coté des étudiants en formation initiale, nos établissements participent à une légitime reconnaissance des voies technologiques et professionnelles. De plus, les milieux dont sont issus nos étudiants sont souvent plutôt modestes (ouvriers, artisans, agriculteurs, techniciens) et leur réussite au concours participe à leur promotion sociale. C'est une des spécificités de nos filières STI en IUFM, qu'il nous faut préserver.

Les équipes de formateurs sont compétentes, les laboratoires possèdent des matériels de qualité, même si des améliorations sont possibles, souhaitables et demandées. Ces ressources humaines et matérielles seront mises au service d'une formation des maîtres

renovée mais peuvent également servir de base à des formations professionnelles en liaison avec les régions, dans les domaines énergétiques particulièrement. Enfin, la formation mixte, en présentiel et à distance pour des disciplines à petits flux est une autre perspective. Les vieux projets peuvent être réactualisés, une expertise en TICE est évidente dans les IUFM.

La « masterisation » de la formation des maîtres est une idée déjà ancienne. Recrutés à bac+3, formés pourtant pendant 2 ans en IUFM, les lauréats sont titularisés sans modification aucune de leur niveau universitaire initial. Une légitime demande de reconnaissance de la formation en IUFM a débouché sur diverses négociations entre IUFM et universités, sur la délivrance éphémère de «diplômes IUFM Toulouse» en 1998 et sur un master formation de formateurs habilité entre Toulouse 1 et l'ENFA [13].

Différentes organisations sont possibles au sein de l'université, avec un stage en lycée en responsabilité et un stage en entreprise, répartis sur les 2 ans du master au cadrage national, comme pour la formation des étudiants de master ou d'écoles d'ingénieurs. La mise en place d'un portfolio numérique de compétences, d'ores et déjà réalisée par l'IUFM, renforce cette dimension professionnelle de la formation.

Une « masterisation raisonnée et durable » est possible.

Professionnelle, elle devra mêler formation disciplinaire et formation pédagogique, en IUFM, en entreprise et dans les classes, conjuguer apports théoriques, disciplinaires, professionnels en rapport avec les exigences d'un métier confronté à la diversité de ses terrains d'exercice, permettre le travail en équipes de formateurs du 2° degré et du supérieur.

Performante, elle ne pourra pas se faire dans le cadre de regroupements de filières ayant pour seul but des économies de moyens ou d'emplois ni au contraire dans un éclatement entre plusieurs universités. La spécificité de l'enseignement technique et professionnel doit y être reconnue.

Egalitaire, elle devra maintenir un cadrage national de ses masters spécifiques et un concours à caractère national.

Ouverte, elle devra être accessible comme jadis à des étudiants de milieux modestes et permettre des reconversions réussies après une activité industrielle ou artisanale.

L'apport spécifique des IUFM dans cette formation professionnalisante des maîtres, par leur expertise, par leur potentiel de formateurs expérimentés et par leurs ressources matérielles, est irremplaçable au sein des universités. L'ignorer ou la mépriser serait suicidaire pour l'avenir de notre pays.

6. Bibliographie

- [1] <http://ent.toulouse.iufm.fr>
- [2] <http://cutp.net/>
- [3] "Description, analysis and test of an autonomous computer aided learning module for digital control", P. Maussion, A. Tricot, IEEE-IECON'06, September 2006, Paris, France
- [4] "Remote Control System Laboratory for Distance Learning: Experimental Evaluation", D. Peytavi, S. Mias, P. Maussion, Electrimacs'2008, June 2008, Québec, Canada,
- [5] "A computer aided learning module for digital control: description, analysis, test and improvement", P. Maussion, A. Tricot," pour IEEE-ICELIE'08, 10-13 November 2008, Orlando, Florida, USA
- [6] « Eléments d'un scénario pédagogique de FOAD pour les maîtres en Maintenance Véhicules », M. Musial, Y . Le Boulair, P. Maussion, IUFM Midi Pyrénées, revue J3eA, Vol. 4, Hors-série n°2 (2005),
- [7] « Pilotage à distance de systèmes industriels didactisés et évaluation de la pratique des étudiants », P. Maussion, S. Mias, IUFM Midi Pyrénées, revue J3eA, Vol. 4, Hors-série n°2 (2008)
- [8] <http://www.cetsis.org/>
- [9] <http://www.crea-technologie.com/PRODUITS/CARILLON/carillon.htm>
- [10] <http://www.iufmrese.cict.fr>
- [11] <http://www.education.gouv.fr/pid270/les-notes-information.html>
- [12] <http://www.energies-renouvelables.org/observer/html/inventaire/PDF/Chapitre01FR.pdf>
- [13] http://enfa.mip.educagri.fr/fr/affiche.php?tpl=2&ctn=rub-form/form_univ.php

Auteurs (ordre alphabétique) :

- *Génie Electrique* : F. Bailly, J.L.Boizard, J.P.Chassaing, A. Courseille, A. Foucher, P. Ladoux, P. Maussion, S. Mias, D. Peytavi, P. Rodier, E. Sarraute, C. Valade,
- *Technologie* : B. Cauquil, B. Mocquet, G. Seigle-Ferrand,
- *Physique Appliquée* : G. Birague, J.J. Durey

Un lycée éolien en Midi-Pyrénées ?

Jean-Marc POTHIER

Lycée Borde Basse, Cité scolaire, 81100 Castres

J-Marc.Pothier@ac-toulouse.fr

Résumé : L'Éducation à l'Environnement pour un Développement Durable est instituée depuis 2004, mais sa mise en œuvre effective en néglige souvent les aspects purement techniques. Or, il est clair que les énergies renouvelables auront besoin de bras et de cerveaux pour exister.

C'est dans le triple objectif de préparer les formations futures, démontrer l'intérêt de la production d'énergie décentralisée, et mettre en œuvre les principes de Développement Durable en milieu scolaire que le lycée de la Borde Basse invite la Région Midi-Pyrénées à l'équiper d'une éolienne de 800 kW. Cet article présente quelques pistes pédagogiques associées au projet, la démarche adoptée pour sa conduite, ainsi que le contexte qui lui a donné jour.

1. Contexte et genèse du projet

Sans attendre le quatrième rapport d'évaluation du GIEC, et bien avant le « Grenelle de l'environnement », l'Éducation à l'Environnement pour un Développement Durable (EEDD) a été instituée par les textes voici quatre ans (B.O. n° 28 du 15 juillet 2004). Plus récemment, il a aussi été question de définir un nouveau baccalauréat technologique « Énergie et Environnement », dont la mise en œuvre avait été préparée dans l'académie de Toulouse par le GRE2E (Groupe de Recherche pour l'Enseignement en Énergie et Environnement).

Les collectivités territoriales ne sont pas en reste, puisque la plupart d'entre elles se sont dotées d'un Agenda 21, qui se traduit en particulier par la mise en œuvre de principes Haute Qualité Environnementale pour la construction des nouveaux bâtiments publics (HQE, en attendant la généralisation du nouveau label « Effinergie » [1]).

Malgré cette prise de conscience quasi générale et le nombre croissant des initiatives, il reste clair que de nombreux efforts restent encore à faire, que ce soit au niveau éducatif où aucune filière de niveau bac/bac+2 n'existe actuellement, ainsi qu'au niveau des infrastructures pour lesquelles on sait que la plus grande part des gains énergétiques possibles se situe dans l'amélioration du parc existant.

1.1. La démarche éco-école (éco-lycée)

L'Office Français de la Fondation pour l'Éducation à l'Environnement en Europe (OF-FEEE) a été créé en 1983, à l'initiative du Conseil de



l'Europe [2]. La FEEE pilote, entre autres, le programme « Éco-École » – mais aussi le label « Énergies d'Avenir » qui peut constituer un levier efficace en direction des collectivités locales.

Éco-École est un label décerné aux écoles élémentaires et aux établissements scolaires du secondaire qui se mobilisent pour l'environnement [3]. Dans ces établissements, les élèves et l'ensemble des personnels travaillent chaque année sur l'un des cinq axes proposés : les déchets, l'alimentation, la biodiversité, l'eau et l'énergie.



D'un point de vue pédagogique, la mise en œuvre de la démarche éco-école à travers des actions dans un établissement permet de concilier l'EEDD et ses applications pratiques, par une approche expérimentale transversale. Cette transversalité devrait être l'occasion pour les disciplines scientifiques et technologiques de réinvestir le champ du DD, habituellement abordé à travers les programmes d'histoire et géographie (et l'ECJS), voire les Sciences de la Vie et de la Terre, mais rarement par ses aspects techniques – car pour pallier cette carence, des programmes adaptés seraient les bienvenus !

Le lycée de la Borde Basse a été le premier lycée labellisé de l'Académie de Toulouse, en 2007. Les actions menées depuis 2005 ont concerné respectivement le traitement des déchets, l'alimentation, et l'eau. Stricto sensu, deux thèmes restent encore à aborder, l'énergie et la biodiversité. Suite à quoi il faudra envisager de passer à un échelon supérieur, un Agenda 21 par exemple [4] – certains établissements ont d'ailleurs commencé leur démarche

EEDD par un Agenda 21, sans passer par une labellisation « Éco-École ». L'avenir nous dira si cette approche plus ambitieuse est également praticable.

1.2. L'axe énergie.

L'an prochain, le thème « Éco-École » traité au lycée Borde Basse sera l'énergie. De nombreuses idées sont déjà lancées par nos éco-délégués, qui imaginent déjà proposer le remplacement des fenêtres d'origine (un certain nombre ont déjà été rénovées) par des doubles vitrages performants, couvrir les toits de l'établissement de panneaux solaires thermiques...

Mais le premier travail sera, comme pour chacun des axes traités, celui du bilan de l'existant. En effet, un diagnostic précis permet d'évaluer les lieux et modalités de gaspillage des ressources, ce qui dirige ensuite naturellement les actions à mener vers leur destination d'efficacité maximale.

Le « concours d'idées » de recherche de solutions possibles peut ensuite être lancé, pour aboutir finalement à un chiffrage précis du coût et du gain attendu des différentes actions proposées, qui peuvent ensuite être portées au niveau du conseil d'administration du lycée, des collectivités territoriales ou d'associations, afin de trouver un financement ou une assistance pour leur mise en œuvre. Cette année par exemple, le lycée a obtenu 2.500 € de subventions de la Région Midi-Pyrénées, grâce au programme « Projets d'Avenir », pour la mise en œuvre de son travail sur l'eau.

1.3. Les opportunités pédagogiques.

Rappelons-le, aucune formation de niveau V (BEP), IV (baccalauréat) ou III (STS, IUT) n'existe dans le domaine spécifique des énergies renouvelables. Tout juste observe-t-on l'introduction de notions de DD dans les filières existantes, à l'occasion de la rénovation des programmes. Mais cette « colorisation » reste le plus souvent un effet d'annonce, limité aux intitulés et non intégré dans des programmes déjà surchargés.

L'utilité de filières spécifiques « énergies renouvelables » reste à débattre, car plusieurs scénarios peuvent être imaginés à ce propos. Pourquoi par exemple ne pas intégrer réellement et fortement les énergies renouvelables, et plus largement le DD, par affinité avec les différentes formations existantes ?

Une autre solution, dans le cadre d'un baccalauréat unique, pourrait être l'introduction d'options générales sur le DD, et pourquoi pas d'une discipline à part

entière dès le collège. Un tel dispositif permettrait l'acquisition d'une réelle culture générale du DD, avant de l'aborder sous des aspects plus scientifiques, technologiques ou économiques au niveau du lycée et selon les affinités de chaque élève.

Mais si la stratégie de mise en œuvre relève d'abord de l'institution, il sera nécessaire dans tous les cas de disposer de ressources humaines et matérielles pour sa mise en application. Or tout manque, ou presque, et sur l'éolien en particulier. Car s'il n'est pas difficile d'acquérir une petite éolienne et de l'installer sur un mât de moins de 12 mètres (ce qui a déjà été fait dans de nombreux lycées), pour un total de quelques centaines d'euros, le domaine des génératrices de puissance est d'accès difficile pour des raisons de coût, de faisabilité technique et réglementaire, et de rentabilité. Il faudra pourtant former des techniciens capables de concevoir, installer, maintenir et démanteler ces équipements.

C'est sur l'ensemble de ces domaines que l'éolienne du lycée Borde Basse sera utile, comme centre de ressources matérielles par la présence de la génératrice, et comme source de données d'exploitation diffusables à tous les établissements demandeurs. Car les formations, qui tardent à se concrétiser, seront mises en œuvre d'autant plus rapidement et efficacement que les équipements et les formateurs seront déjà prêts. C'est un objectif majeur du projet.

2. Le projet

De ce contexte convergent est issu l'idée d'essayer de mettre en œuvre quelques unes des solutions DD possibles. Sans perdre de vue que la meilleure énergie est celle que l'on ne consomme pas, il s'agit d'appliquer les principes d'une production décentralisée [5] adaptée aux ressources locales et à l'infrastructure des locaux existants, pour rendre le lycée d'origine transformé en établissement à basse énergie, et si possible à énergie positive. Trois ressources locales peuvent être envisagées : le solaire thermique, le solaire photovoltaïque et l'éolien.

Pour ce qui concerne le chauffage des locaux et de l'eau sanitaire, actuellement assurés par une chaufferie au gaz naturel, une réflexion est en cours sur la pose de capteurs solaires d'appoint sur les toits en terrasse de l'établissement. C'est le poste énergétique le plus important du lycée, avec une charge annuelle de l'ordre de 120.000 € (service de restauration compris pour la moitié de cette charge). La réflexion devra aussi être abordée du point de vue non consommation, par

l'amélioration de l'isolation des locaux dont la construction date de 35 ans.

Le deuxième poste de consommation énergétique du lycée est celui de l'électricité, avec une consommation moyenne de 100 kW pour une charge annuelle de l'ordre de 60.000 €.

La production d'électricité photovoltaïque est une piste envisageable, ... mais le coût et la rentabilité d'une telle installation pour un établissement public (agissant donc hors toute subvention et crédit d'impôt) est à l'heure actuelle prohibitif, puisqu'il faut compter de 6 à 7 € par watt installé, soit pour une puissance crête minimale de 300 kW nécessaire aux besoins électriques du lycée (pour un facteur de production de 1/3), un investissement de l'ordre de 2 M€ « amortissable » en... plus de 30 ans (2M€ / 60 k€).

Une solution alternative de mise en œuvre existe cependant, qui consiste à déléguer la propriété et l'exploitation de l'installation à un opérateur extérieur, contre paiement d'une « location de toiture », comme l'a déjà mis en œuvre le Conseil Régional Midi-Pyrénées pour une puissance de 39 kWc sur les toits de l'Hôtel de Région. Cette solution sera aussi utilisée à Toulouse sur les toits du lycée Déodat de Séverac à l'occasion de sa rénovation (150 kWc), ainsi que pour le nouveau lycée HQE Galliéni (280 kWc).

Il faut de plus préciser que le lycée de la Borde Basse, comme tous les autres lycées technologiques et polyvalents de l'académie de Toulouse, sera équipé d'une centrale de production photovoltaïque « domestique » de 2,8 kWc en pseudo connecté réseau ; cette équipement, représentatif d'une véritable installation individuelle, présente pédagogiquement l'avantage d'être totalement comparable aux plus grosses centrales photovoltaïques existantes : sauf pour les niveaux de courant et de tension, il n'existe pas de facteur d'échelle significatif, et les données technologiques et de production sont directement transposables.

Une seconde ressource disponible à Castres est redevable aux courants éoliens entre Atlantique et Méditerranée, composé du classique flux d'ouest, et d'un vent d'est appelé « vent d'Autan », comparable au Mistral de la vallée du Rhône. L'implantation d'une éolienne, pour un coût de l'ordre de 1.000 à 1.200 € par kW installé, divise les investissements et la durée d'amortissement par 5 par rapport au solaire

photovoltaïque, soit de l'ordre d'une dizaine d'années selon le potentiel éolien du site.

Contrairement au photovoltaïque, le petit éolien (voir § 2.3.1) est sans commune mesure technologique avec le gros éolien [6], et plutôt que de mettre en place un champ de plusieurs génératrices de faible puissance, le parti a été pris d'opter pour une seule machine moderne de forte puissance, de l'ordre de 800 kW.

2.1. La situation de la Borde Basse

Le campus de la Borde Basse est situé en bordure d'agglomération, au cœur d'une zone verte qui comprend de nombreux équipements sportifs et de loisirs (figure 1).

Le Plan Local d'Urbanisme (PLU) classe l'ensemble de la zone en secteur N, sous-secteur N1 qui est défini par : « *Le sous-secteur N1 est la partie de la zone naturelle non équipée, à laquelle la localisation et les aménagements existants confèrent une vocation particulièrement choisie de loisirs et de détente (tourisme, sport...)* »

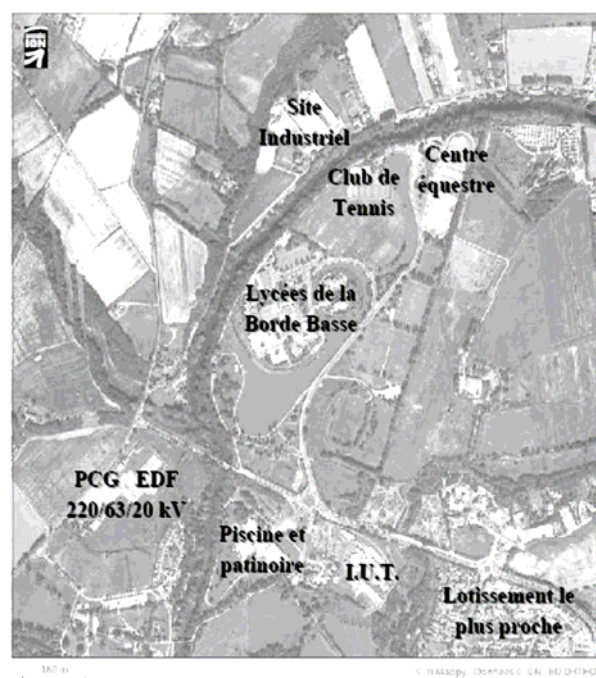


Figure 1 : Plan de situation du lycée

In fine, et compte-tenu du fait que les flux éoliens sont majoritairement orientés est-ouest, le cadre géographique paraît donc particulièrement propice à l'implantation d'une éolienne de moyenne puissance, tant sur le plan du voisinage que sous les aspects réglementaire que nous développerons au chapitre 2.2.

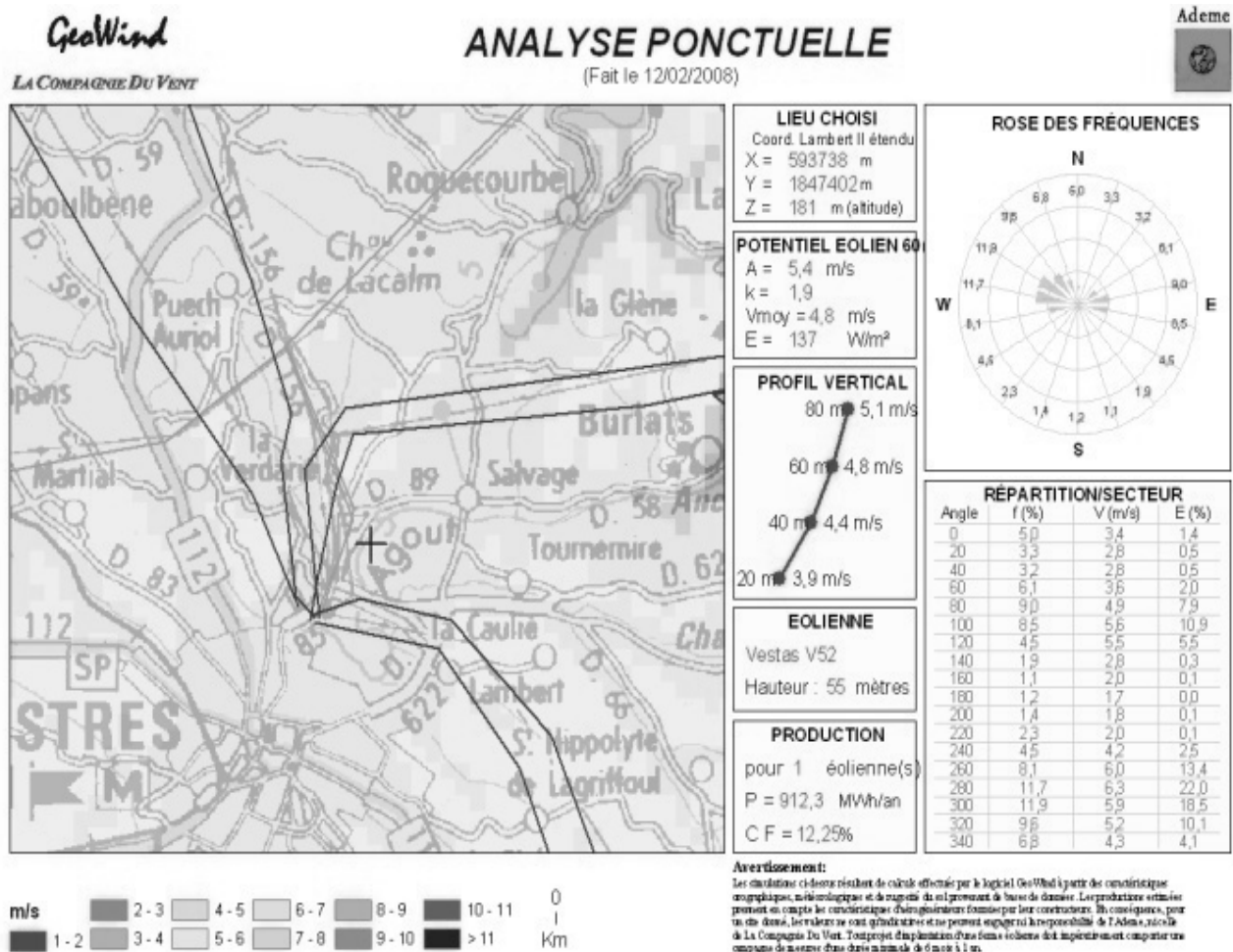


Figure 2 : Estimation du potentiel éolien du site de la Borde Basse (ADEME)

2.1. Les contraintes techniques

2.1.1. Potentiel éolien et génératrice

La production d'énergie à partir du vent nécessite de disposer d'une ressource suffisante pour rentabiliser l'investissement. Classiquement, on calcule une durée équivalente de production annuelle à pleine puissance qui correspond à l'énergie totale produite divisée par la puissance nominale installée. Cette durée peut être exprimée en heures, ou en pourcentage (ramené à 8766 heures par an). On considère qu'un potentiel supérieur à 30% est excellent, très bon jusqu'à 25%, acceptable jusqu'à 20%, et insuffisant en deçà.

Une évaluation positive doit être confirmée par une campagne de mesure réelle grâce à un mât implanté sur site pendant au moins 6 mois. Attention toutefois, la valeur du potentiel éolien est intimement liée au choix de la génératrice ; en effet, la voilure et le pilotage d'une éolienne sont optimisés pour des vents faibles ou

forts, et le choix d'une machine adaptée au site peut changer notablement les chiffres de production.

Ainsi, pour le Lycée de la Borde Basse (figure 2), l'estimation du potentiel éolien par le logiciel GéoWind, et pour une génératrice VESTAS V52, indique un potentiel de l'ordre de 12%, ce qui semble en première analyse clairement insuffisant.

Cependant, la machine choisie étant conçue pour vents moyens à forts, le choix d'une éolienne optimisée pour vents faibles, comme par exemple une ENERCON E53 ou une GAMESA G58, permettrait d'augmenter la production aux faibles vitesses de quelques 50% (figure 3), pour un productible atteignant le seuil de rentabilité de 20%. Une nouvelle simulation, pour chacune des éoliennes proposées, permettra de valider ces hypothèses – car, il est important de le rappeler, même si la contrainte de rentabilité financière doit être ramenée à l'utilité pédagogique, il serait évidemment absurde d'investir hors toute considération d'efficacité de l'éolienne !

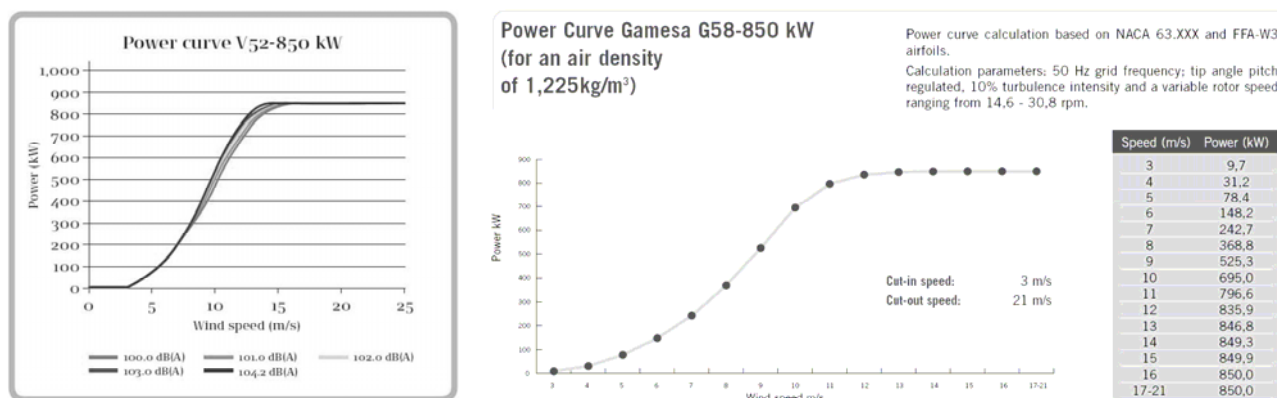


Figure 3 : Courbes de puissances d'une éolienne optimisée pour vents forts (VESTAS V52) ou vents faibles (GAMESA G58)

2.1.2. La connexion au réseau

Techniquement, les génératrices industrielles produisent généralement en triphasé 690 V, qui est transformé en 20 kV triphasé au pied de chaque mât. Les éoliennes sont ensuite interconnectées par un réseau enterré, qui doit être raccordé au réseau de distribution local [9], de 20 kV pour une puissance injectée inférieure à 12 MW, 63 ou 90 kV pour une puissance jusqu'à 50 MW – le coût du raccordement étant alors bien plus élevé.

Pour le lycée de la Borde Basse, la connexion sera effectuée via le poste de transformation et distribution voisin (PCG de Gourjade), situé à moins de 500 mètres (figure 1). Ce dispatching est alimenté par le réseau 220 kV, fournit l'énergie électrique pour l'ensemble du Tarn et le sud de l'Aveyron en 63 kV, et distribue localement en 20 kV. Ce poste absorbe de plus la production hydraulique du bassin de l'Agoût, pour une puissance moyenne de l'ordre de 17MW. La capacité de raccordement, de 25 MW, est largement suffisante.

On notera que, comme la plupart des établissements, le lycée est raccordé par une ligne dédiée en 20 kV, ce qui peut autoriser un branchement à moindre coût sous réserve de compatibilité de l'existant avec les puissances produite et consommée.

2.2. Les contraintes réglementaires

La loi de programme n° 2005-781 du 13 juillet 2005 [10], entrée en pleine application en juillet 2007, fixe les orientations de la politique énergétique (loi POPE). L'apport principal de cette loi dans le domaine éolien est l'instauration de Zones de Développement de l'Éolien (ZDE), hors desquelles il n'existe aucune obligation d'achat de l'énergie produite. Si l'objectif du législateur semble clairement d'éviter la prolifération anarchique de parcs éoliens, car la

rentabilité naturelle de ce type de production fait que de nombreux financiers sont tentés par l'aventure, une conséquence immédiate est de pénaliser par la même occasion le développement du petit éolien domestique, contrairement par exemple au photovoltaïque qui est largement encouragé.

Un deuxième apport de la loi POPE est la définition d'un cadre réglementaire unique qui fixe de manière exhaustive les documents et formalités à accomplir, et détermine les délais légaux de réponse de l'administration : par exemple, un délai maximum de trois mois est spécifié pour l'instruction du Permis de Construire (sauf en cas d'enquête publique). C'est un grand progrès par rapport à la situation antérieure.

2.2.1. Le petit éolien.

La production électrique en site isolé ou en auto consommation n'est a priori soumise à aucune autorisation légale, dès lors que le mât ne dépasse pas une hauteur de 12 mètres. Mais le particulier qui souhaite installer une petite éolienne dans son jardin a tout intérêt à réaliser lui-même une « enquête de voisinage », ou mieux encore une notice d'impact [11], car les recours en justice pour la gêne occasionnée sont de plus en plus nombreux.

Pour autant, s'il est vrai qu'un mât de 12 mètres est souvent peu esthétique, les principales nuisances sont sonores, car les petites éoliennes à axe horizontal tournent souvent à des vitesses importantes, sans disposer de régulations performantes : hélices à pas fixe et non optimisées, effacement passif par grand vent, mécanique quelquefois rudimentaire... Ces questions pourront peut-être se résoudre avec les nouvelles générations d'éoliennes de petite puissance, et en particulier par les modèles à axe vertical [12] dont les performances, alliées à une grande robustesse ainsi qu'une quasi absence de nuisances sonores, permettrait

une utilisation dans tous les milieux urbains. Gageons que le législateur saura trouver un aménagement de la réglementation afin de profiter de cette ressource !

2.2.2. Le gros éolien.

Entre 12 et 50 mètres de hauteur de mât, la notice d'impact devient obligatoire, et l'implantation d'une éolienne est soumise à permis de construire. En revanche, l'implantation d'un mât de mesure, quelle que soit sa taille, n'est soumise qu'à une simple déclaration de travaux en mairie.

Dans le cas d'une autoconsommation, le permis de construire est accordé directement par la commune. En revanche, dès lors qu'il y a revente, le permis est délivré par le préfet de département, après instruction par la Direction Départementale de l'Équipement (DDE) en relation avec différents services connexes.

Au-delà de 50 mètres, la notice d'impact est remplacée par une étude d'impact, plus complète, et le projet doit obligatoirement faire l'objet d'une enquête publique. Attention, dans ce cas, l'absence de décision expresse équivaut à un refus. Par suite, les services consultés sont exclusivement ceux prévus par la Loi, et toute prescription doit être légalement motivée.

Pour le lycée de la Borde Basse, et malgré la relative proximité des logements de fonction et de l'internat (150 m du site présumé d'implantation de l'éolienne), l'idée de la possibilité réglementaire d'installer une éolienne de puissance a été renforcée par l'existence d'au moins un précédent, au lycée HQE Léonard de Vinci à Calais [13] qui est équipé d'une génératrice de 150 kW.

3. Pistes pédagogiques

Les nouveaux programmes STI, et en particulier ceux du baccalauréat « énergie et environnement », avaient permis d'initier une dynamique de réflexion sur les différents thèmes de la spécialité. Le coup d'arrêt de la réforme a pour l'instant quelque peu différé ces velléités. Pour autant, quelques pistes peuvent être mentionnées, qui ne sont déclinées ni par compétences ni par niveaux, mais ont pour ambition première d'ouvrir un cadre de discussions.

Une première idée, non spécifique à l'éolien, consiste à savoir recenser, quantifier et comparer les ressources en énergie disponibles localement : solaire thermique et photovoltaïque, géothermie, éolien, hydraulique, biomasse... et bien sûr les sources d'énergie non renouvelables conventionnelles.

Cette analyse devra être menée sur la base de documents et études de sites réels (potentiel éolien et solaire, ressources géologiques, hydrauliques et agricoles, etc.), pour les trois objectifs du DD : économique, social et environnemental.

Une deuxième idée consiste à vérifier et valider la faisabilité réglementaire et technique du projet, selon les procédures et contraintes en vigueur. Le cas de l'éolien est ici le plus représentatif, en ce que les autorisations, enquêtes et documentations sont les plus lourdes à réaliser ; disposer à ce titre d'exemple complet et actuel de conduite d'un projet, celui du lycée Borde Basse en attendant d'éventuelles initiatives similaires, constitue un support unique.

La conception et la mise en œuvre du projet composent un troisième axe d'enseignement, avec les différents aspects de dimensionnement des équipements (choix d'une éolienne adaptée, éco-conception, schémas BT/HT), des principes de raccordement au réseau, de gestion des protections et de la sécurité. Les aspects maintenance pourront être traités sur les mêmes fondements.

En liaison avec des notions plus théoriques, il s'agira finalement de valider les choix effectués, les solutions de mise en œuvre et les matériels sélectionnés, par des mesures et validations de performances – sans se limiter aux caractéristiques purement techniques, mais en intégrant l'ensemble de la démarche DD selon ses trois principes.

C'est, pour l'éolien, encore un point pour lequel la mise à disposition de données de production d'une éolienne « captive » permettra le recoupement des prévisions et des observations, car les investisseurs, fabricants et exploitants de parcs éoliens privés sont extrêmement avares de communication – secret industriel et commercial oblige.

Quelques liens avaient commencé à être tissés par le GRE2E avec des partenaires (fabricants d'éoliennes, parcs éoliens, concepteur et distributeurs de solutions informatiques dédiées) afin de pouvoir mettre des banques de données et des outils d'exploitation à disposition de tous les établissements, sous forme par exemple d'abonnement à des services web.

Tout projet de lycée éolien s'insèrera naturellement dans ce cadre de mutualisation des ressources, et on ne peut que souhaiter la multiplication des initiatives !

4. Conclusion

Si l'intérêt croissant pour les énergies renouvelables est indiscutable, un engagement clair des institutions fait encore défaut pour leur enseignement, et principalement sous leurs aspects techniques.

La préparation aux évolutions industrielles des prochaines décennies sur ce plan passe donc actuellement exclusivement par les initiatives locales, au niveau des collectivités qui équipent les

établissements, au niveau des réseaux associatifs qui encouragent et accompagnent les actions EEDD, et in fine au niveau des équipes éducatives qui conçoivent et mettent en œuvre les actions de terrain.

Une présence forte des professeurs des domaines techniques sur ces thématiques permettra de valoriser l'image des filières technologiques, en même temps qu'elle autorisera la formation des indispensables spécialistes des énergies renouvelables.

Références

- [1] : Collectif Effinergie, <http://www.effinergie.org/>
- [2] : Fondation pour l'Éducation à l'Environnement en Europe, <http://www.f3e.org/>
- [3] : Label Éco École, <http://eco-ecole.org/>
- [4] : Comité français pour l'environnement et le développement durable, <http://www.comite21.org/>
- [5] : B. Robyns, P. Bastard, Production décentralisée d'électricité : contexte et enjeux techniques, 3EI n°39, déc. 2004
- [6] : C. Larouci, L'énergie éolienne : état de l'art, 3EI n°40, Mars 2005
- [7] : Compagnie du vent : <http://www.compagnieduvent.com/>
- [8] : Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie, www.ademe.fr/
- [9] : Référentiel RTE, http://www.rte-france.com/htm/fr/mediatheque/telecharge/reftech/15-05-08_complet.pdf
- [10] : Loi POPE : <http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=LEGITEXT000006051995>
- [11] : Guide de l'étude d'impact des parcs éoliens, http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/Guide_eolien.pdf
- [12] : Par exemple, Gual industrie, <http://www.gual-industrie.com/>
- [13] : Lycée Léonard de Vinci, Calais, <http://www5.ac-lille.fr/~vincicalais/>



Figure 4 : Le lycée de la Borde Basse équipé de son éolienne (montage photo)

Systèmes Solaires Photovoltaïques

Didier DELAGNES et Bruno FLECHE

didier.delagnes@ac-toulouse.fr

Lycée Victor Hugo BP 317

bruno_fleche@yahoo.fr

31 770 COLOMIERS

Raymond PORTERIE Lycée Technique Jolimont 44, Chemin Cassaing

raymondporterie@aol.com

31079 TOULOUSE

Résumé : Réflexions pédagogiques élaborées lors du développement de systèmes didactisés de production d'énergie électrique d'origine photovoltaïque dans l'académie de Toulouse.

- La partie A présente le système permettant d'initier les élèves aux caractéristiques des panneaux photovoltaïques et à leurs contraintes de mise en œuvre incontournables.

- La partie B introduit plus précisément la notion de gestion d'énergie dans un système autonome de production et de distribution d'énergie électrique.

- La partie C présente une installation photovoltaïque connectée au réseau et son exploitation pédagogique.

- La partie D est le reportage d'un voyage d'étude sur les énergies renouvelables à Barcelone.

Ce travail est exploitable dès la classe de première STI GE et peut être largement développé pour des niveaux supérieurs.

Au-delà des systèmes solaires photovoltaïques ces notions constituent une introduction à la problématique de gestion d'énergie, d'efficacité énergétique et de développement durable.

1. Introduction

La nécessité de réduire les gaz à effet de serre, la limitation de la consommation des énergies fossiles, les politiques européenne et française concernant le développement durable et l'énergie conduisent à développer des productions décentralisées basées sur les énergies renouvelables (Enr). Cette contribution s'inscrit dans le cadre de l'évolution des baccalauréats STI Génie Electrotechnique.

Réflexion pédagogique élaborée lors du développement de systèmes didactisés présentés sur l'académie de Toulouse Midi-Pyrénées.

Jusqu'ici, l'enseignement se construit à partir d'une fourniture énergétique par le réseau électrique national. Pour la partie production de l'électricité, la mise en situation des élèves reste délicate car l'accès aux sites de production du distributeur national est peu aisé.

Le solaire photovoltaïque est un procédé de production d'énergie électrique encore peu connu, aux caractéristiques spécifiques. Il nécessite donc un enseignement adapté.

Cet article aborde de manière simple les différents domaines incontournables pour une bonne compréhension.

Au-delà des procédés solaires photovoltaïques ces notions constituent une introduction à la problématique de gestion d'énergie, d'efficacité énergétique et de développement durable.

2. Initiation au photovoltaïque

2.1. L'énergie à la source

Le soleil est une source d'énergie inépuisable, à l'échelle humaine. Ce flux de particules énergétiques est diffusé en tout point de la planète dans des proportions variant avec les cycles naturels des jours et des saisons.

L'effet photovoltaïque peut se résumer simplement ainsi :

Les photons captés par une cellule photovoltaïque mettent en mouvement des électrons, la lumière est ainsi convertie directement en électricité.

Plusieurs particularités bousculent quelque peu les habitudes des électrotechniciens :

- Le fonctionnement de ce générateur est parfaitement non polluant mais n'est pas linéaire.
- D'un point de vue économique, seule l'installation a un coût, quelle que soit la consommation.
- D'un point de vue énergétique, la puissance captée à un instant donné n'est utilisée en totalité que si l'ensemble de l'installation est optimisé.
- Cette énergie est gratuite, mais n'est pas disponible en permanence. Le stockage s'avère souvent indispensable.
- L'énergie non utilisée est « perdue » et, bien qu'étant gratuite à la source, a coûté lors de l'installation.

Une étude approfondie est donc indispensable pour optimiser l'efficacité de l'installation photovoltaïque.

2.2. Les éléments constituant l'installation

En préalable à tout dimensionnement il est primordial d'analyser les ressources et les besoins :

Le lieu de production, avec ses propres caractéristiques, géographiques saisonnières et météorologiques, impose des contraintes non maîtrisables mais connues.

Les consommations désirées doivent être analysées avec précision et ajustées afin d'optimiser l'installation.

Le système PV doit être dimensionné selon ces critères, et nécessitera, ou pas, un stockage d'énergie en fonction de la corrélation besoins/ressources.



Figure 1 : Eléments d'une installation photovoltaïque

Ces trois parties : source/stockage/utilisation avec chacune ses propres paramètres sont indissociables.

Les diverses interactions guideront l'étude.

2.3. Flux d'énergies

La relation de l'énergie en fonction de la puissance variant dans le temps est toujours : $W = \int p(t).dt$

La puissance instantanée produite par le générateur est considérée positive, celle consommée par le récepteur négative.

L'énergie transitant vers l'accumulateur est de signe variant selon qu'il se charge ou se décharge.

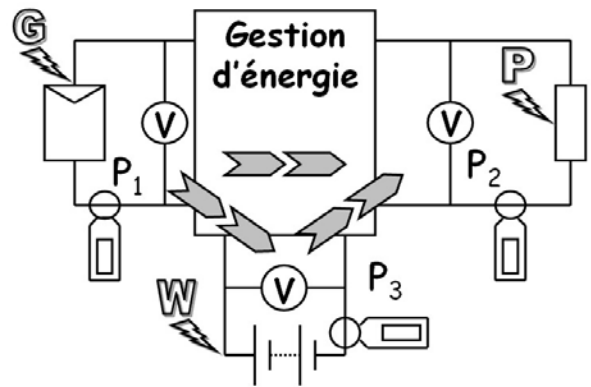


Figure 2 : Transferts d'énergie

Les trois paramètres du système, G gisement solaire disponible, W énergie stockée et $P \times t$ énergie consommée, varient en permanence.

Ils imposent les flux d'énergie que doit gérer le système de gestion.

Nous sommes en présence d'un système qui, d'apparence simple, est soumis à une multitude de perturbations qui rendent sa maîtrise complexe et nécessite une approche pédagogique précise.

2.4. Approche fonctionnelle

L'analyse fonctionnelle permet de synthétiser clairement les flux d'énergie à tous les niveaux de l'installation.

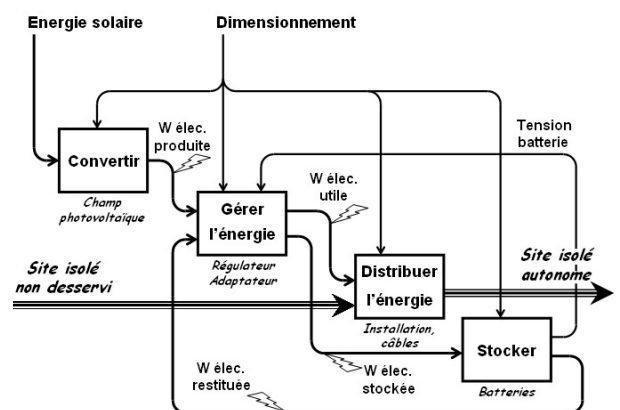


Figure 3 : Analyse de type SADT

Ce système met en œuvre tous les éléments liés à l'énergie électrique : production, stockage, distribution, consommation, le système est complet et autonome.

Il est très riche en applications diverses, très facilement abordable à tous niveaux et introduit naturellement les problèmes de régulation et de MPPT.

2.5. Approche pédagogique

2.5.1. Production photovoltaïque (fonction convertir)

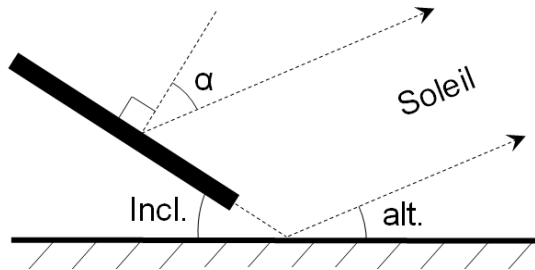


Figure 4 : Angle d'incidence α

Une initiation doit se faire sur le terrain (au soleil), une boussole et un niveau en main, lors d'un TP de « découverte ». L'utilisation de grilles ou de logiciels permet alors d'appréhender avec précision la notion de « course du soleil ».

De simples mesures électriques permettent de vérifier les performances du générateur en fonction de l'incidence du soleil.

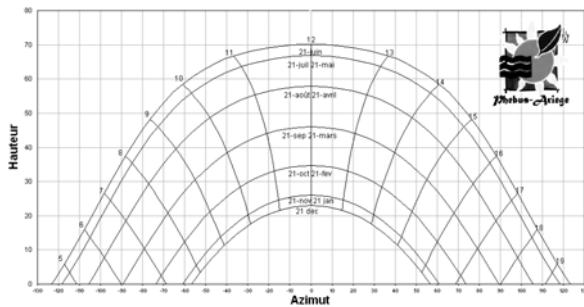


Figure 5 : Course du soleil

La lecture de la grille « course du soleil » de l'association Phébus Ariège est un excellent exercice de terrain. <http://www.phebus-ariège.org>



Figure 6 : Planétarium Stellarium

Le logiciel de planétarium open source Stellarium, faisant redondance avec la grille précédente, est agréable d'utilisation et très apprécié.

<http://www.stellarium.org/fr/>

Les valeurs du courant de court circuit, proportionnel à l'ensoleillement, et de la tension à vide permettent de vérifier rapidement les caractéristiques du panneau.

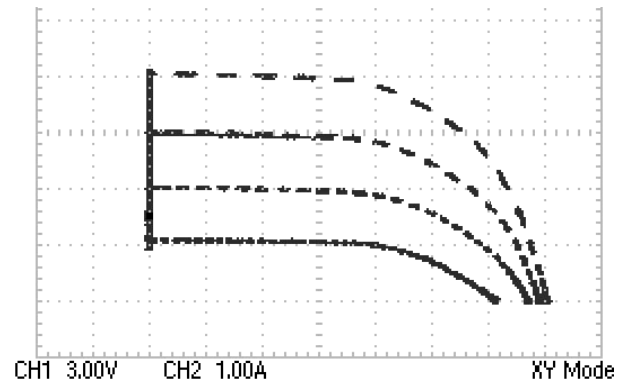


Figure 7 : Oscillogrammes $I = f(U)$

Les mesures à l'oscilloscope en XY sont instantanément réalisées lors de charges de condensateurs pour différentes inclinaisons du panneau, donc différents ensoleillements.

Remarque : les fichiers cités et utilisés ci-dessous sont téléchargeables sur les liens suivants :

http://lem.univ-montp2.fr/~glaize/Enseignement/PV/PV_MPPT_CG.xls

<http://rporterie.free.fr/mapage> (mot de passe : PV)

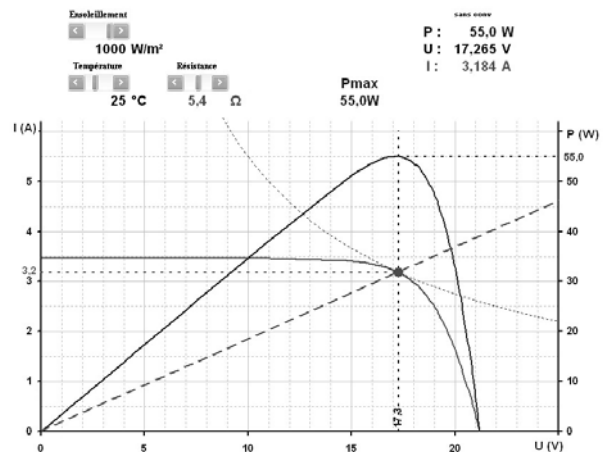


Figure 8 : Fichier gestenerpv.xls

Ce graphique est issu du fichier gestenerpv.xls (élaboré à partir des données contenues dans PVMPPT.xls).

Ceci permet de réaliser graphiquement la prédétermination de points de fonctionnement sur diverses charges.

2.5.2. Distribution électrique (distribuer l'énergie)

La production photovoltaïque se fait en très basse tension.

La prise en compte des chutes de tension est donc un des impératifs lors de l'étude de l'installation.

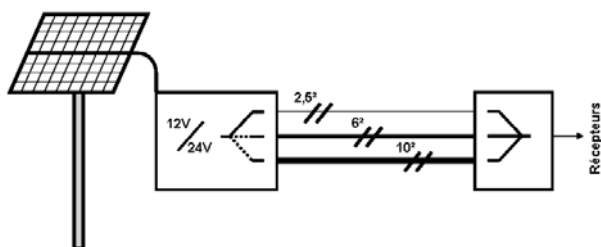


Figure 9 : Installation photovoltaïque fixe

L'exemple d'installation ci-dessus, utilisant des câbles de différentes sections, permet de mettre en évidence les problèmes inhérents à ce phénomène.

3. Gestion d'énergie en site isolé

3.1. Avec stockage dans accumulateurs

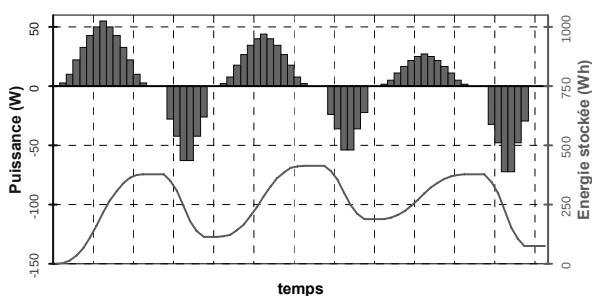


Figure 10 : Exemple de scénario de production trois jours

La corrélation des besoins par rapport à la disponibilité de la source impose, ou non, le stockage de l'énergie. INTEGRAL.XLS permet de simuler différents scénarios et de montrer l'importance de la maîtrise de la consommation sur le dimensionnement du générateur et de la batterie d'accumulateurs.

Ceci introduit la notion d'intégrale numérique :

$$W = \sum P(t_i) \times T_{éch}$$

3.2. Sans stockage, au fil du soleil

Si l'on veut éviter les pertes liées au stockage de l'énergie, on doit la consommer à l'instant où elle est produite.

Le pompage est tout à fait adapté à cet usage, car l'énergie est stockée sous forme d'eau dans un réservoir.

Le souci d'optimisation de l'ensemble met en évidence la nécessité d'adaptation d'impédance.

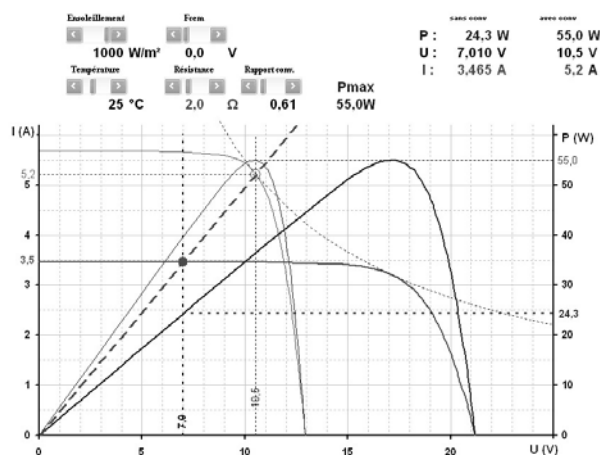


Figure 11 : Débit sur 2Ω avec convertisseur

Exemple sur charge résistive : le convertisseur de tension ($\times 0,61$) permet d'utiliser les 55W disponibles. Seuls 24,3 W seraient utilisés sans lui.

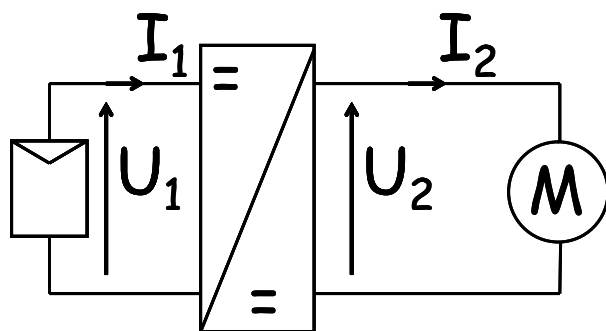


Figure 12 : Adaptateur d'impédance

$$U_1 \times I_1 \approx U_2 \times I_2 \quad U_1 / I_1 \neq U_2 / I_2$$

Mesures réalisées à l'aide du système présenté sur Résélec (panneau incliné pour obtenir ICC 1,5 A, vanne réglée pour 2,8 bars lorsque la pompe est sous 24 V nominal)

		Sans Adapt.	Avec Adapt.
U_1 (V)	Point 1	16,2	25
I_1 (A)		1,5	1,34
P_1 (W)		24,3	33,5
U_2 (V)	Point 3	16,1	18,7
I_2 (A)		1,5	1,73
P_2 (W)		24,1	32,3

Le positionnement des points de fonctionnement P1 P2 et P3 sur le graphique visualise clairement le phénomène.

L'adaptateur d'impédance Shurflo se comporte comme un régulateur de tension à 25 V (fonctionnement optimal des deux panneaux en série à 75°C environ)

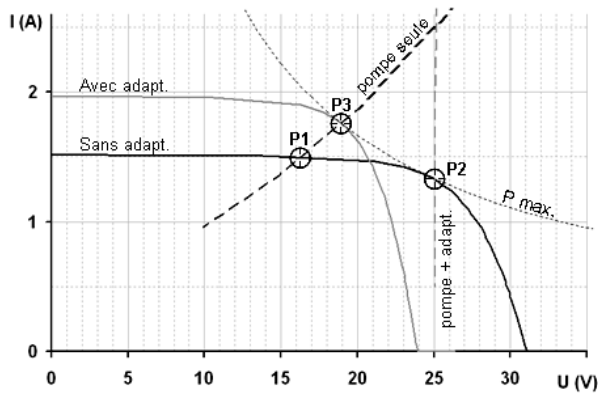


Figure 13 : Points de fonctionnement

Les mesures de pression, débit et puissance utile complètent cette manipulation par le calcul du rendement de l'ensemble.

Par ailleurs l'aspect visuel et sonore de la pompe en fonctionnement permet d'appréhender concrètement la dimension des grandeurs physiques mises en jeu et leur rapport direct avec la source d'énergie, le soleil.

4. Générateur photovoltaïque connecté au réseau

Réflexion pédagogique élaborée lors de l'installation d'une centrale photovoltaïque au lycée Victor Hugo de Colomiers.

La centrale est connectée au réseau avec revente totale de la production. Elle est en service depuis janvier 2006 et obéit à un cahier des charges académique.

4.1. Mise en situation

Pour dimensionner ce générateur il a été pris en compte la consommation d'énergie électrique annuelle d'une famille de quatre personnes habitant une maison individuelle de 120 m² (hors chauffage et eau chaude sanitaire).

On peut estimer cette consommation à 4500 kW.h par an (source ADEME).

L'installation globale est complétée par un tableau d'abonné standard d'un logement T4. Ce tableau comprend les trois compteurs d'énergie, les protections et les départs protégés.

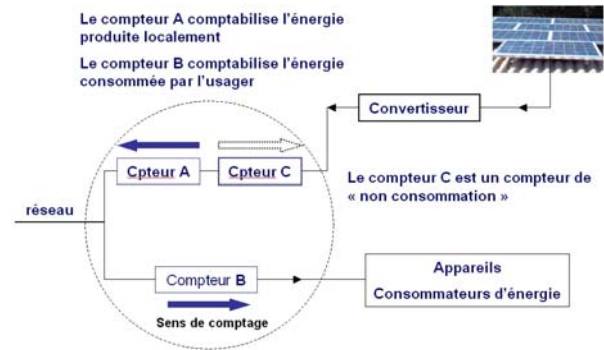


Figure 14 : injection de la totalité de la production

4.2. Les caractéristiques techniques de l'unité de production

• L'implantation dans le lycée :

Quelques contraintes sont à prendre en compte pour l'installation de panneaux solaires photovoltaïques : l'exposition pour avoir le meilleur rendement possible et l'intégration dans l'architecture générale du bâtiment concerné (esthétique et résistance des supports).

Le bâtiment choisi est exposé à 20° sud à proximité des laboratoires STI pour minimiser la longueur des câbles DC.



Figure 15 : panneau sur toiture en surimposition (21 m²)

• Modules photovoltaïques poly-cristallins installés en surimposition :

14 panneaux de 1,5 m² soit 21 m² au total. Champ constitué de 2 branches de 7 panneaux

200 Wc/panneau installé à plat sur toiture pour 18 kg et une dimension de 150×100 cm

(Wc : puissance crête normalisée délivrée sous un ensoleillement optimum de 1 kW/m² à 25°C)

Référence des panneaux : TENESOL TE 2000 A

Puissance typique : 200 Wc / 18 Vcc)

Orientation : Sud-Sud-Est 20°, inclinaison 25°,

Albédo : 0,2

Rendement des panneaux : environ 14 %

(capteur poly-cristallin)

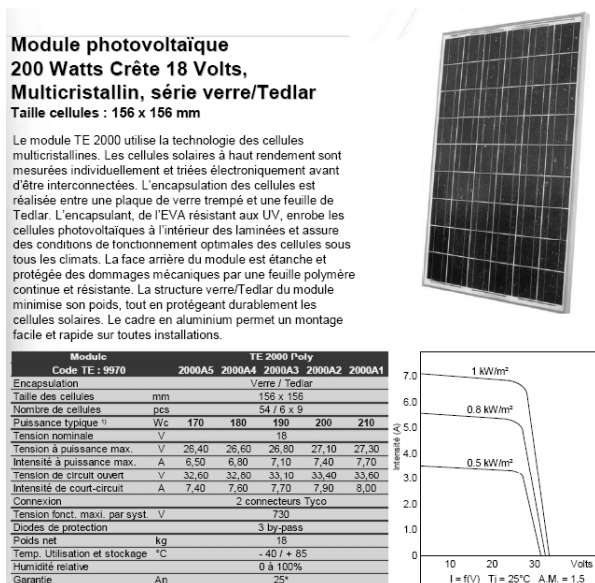


Figure 16 : Module TE 2000 (TENESOL)

• **Puissances :**

Puissance installée : 2,8 kWc avec injection de la totalité de la production sur le réseau
Puissance photovoltaïque maximale pour l'onduleur
 TENESOL GRIDFIT 2500 : 3,06 kWc
Puissance de sortie onduleur : 2,2 kW sous 230V

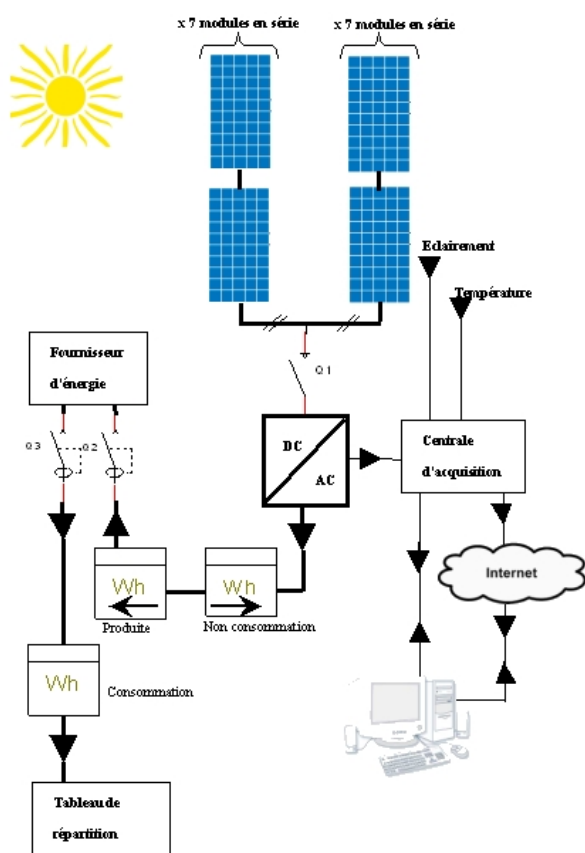


Figure 17 : Synoptique de l'installation

- **Autres spécificités imposées par le cahier des charges pour les développements pédagogiques proposés :**

Implantation à proximité du champ de panneaux :

Un capteur d'éclairement et un capteur de température ambiante

Les données de production (données instantanées, journalières et cumulées)

issues de l'onduleur et des capteurs sont accessibles via une centrale d'acquisition et une liaison Ethernet ("data logger" IP et logiciel associé pour la base de données)

Implantation d'un compteur modulaire d'énergie

produite (lecture directe sur afficheur) avec sortie sur contact TOR libre de potentiel.

Ceci permet le mesurage de l'énergie produite par comptage d'impulsions.

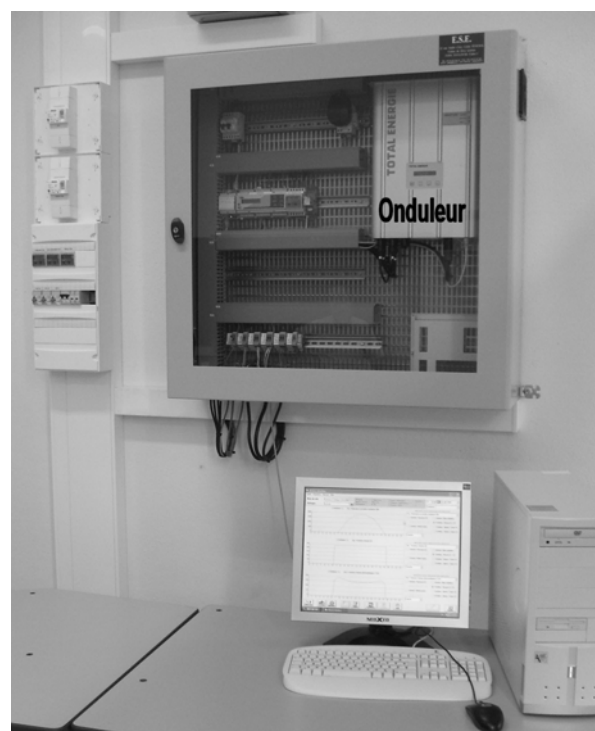


Figure 18 : Installation au laboratoire GE



Figure 19 : Centrale Energrid IP, compteur et relais TOR

Pose d'un grand panneau d'affichage de la production dans le hall du lycée (*communication à destination de l'ensemble de la communauté scolaire pour sensibilisation aux énergies renouvelables*)

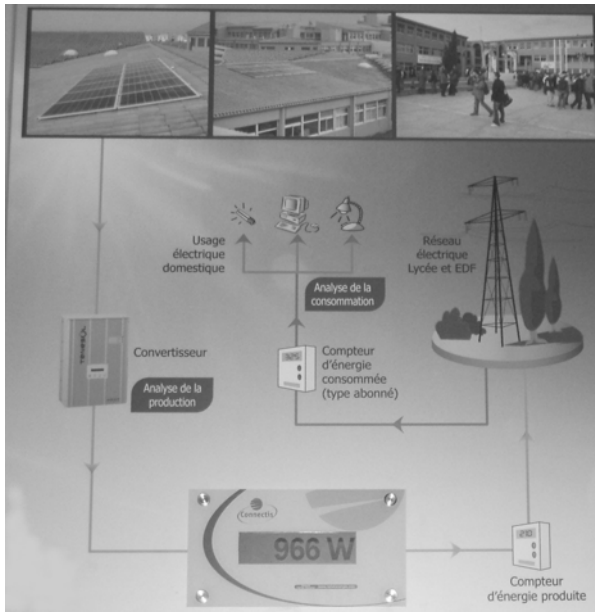


Figure 20 : Affichage déporté dans le hall du Lycée

- **Matériel installé :** TENESOL-TECHNOLOGIES
Unité de production de panneaux solaires à Saint Martin du Touch (TOULOUSE)
- **Ressource solaire disponible, productible et production réalisée au Lycée :**

Rayonnement solaire moyen journalier en Midi-Pyrénées :

4,3 kW.h/m²/jour (soit environ 1550 kW.h/m²/an)

Estimation de la production annuelle d'énergie électrique : 3200 kW.h (logiciel calsol/INES et évaluation du solariste installateur)

Production réalisée du 1^{er} janvier 2006 au 27 juin 2007 : **4300 kW.h**

- **Coût/rentabilité :**

Coût de l'installation : 25000 € soit 1190 € le m² (ou de 6 à 9 € par Wc pour une installation bien instrumentée).

Le plan Climat adopte des mesures fiscales en faveur des énergies renouvelables. La loi fixe à 50% le crédit d'impôt correspondant.

Base France	Tarifs TTC
Prix de base à la consommation	0,11 €/kWh
Prix de rachat (surimposition)	0,31 €/kWh
Recette de la production annuelle	992 €
Commentaires :	
Prix d'achat sur réseau à EDF inférieur au tarif de revente	
Objectif de production (productible) : 3200 kWh/an	

Une famille de 4 personnes consomme environ 4500 kW.h électrique par an (soit une dépense de 495 € sur une base de 11 centimes d'€ le kWh) mais reçoit 992 € pour sa production de 3200 kW.h (rachat à 31 centimes d'€ le kWh en surimposition).

Le gain brut est de 497 € par an.

Elle percevrait 1824 € avec une des panneaux en intégration de toiture (rachat à 57 centimes d'€ le kWh en solaire PV intégré). Le gain brut serait alors de 1329 € par an.

Autres frais à comptabiliser pour calculer le gain net et la rentabilité :

- Coût des crédits de financement,
 - Assurance et maintenance de l'installation,
 - Abonnement EDF (*compteurs spécifiques*),
 - Impôt sur le revenu lié à la revente de l'énergie.
- **Quantité de CO₂ évitée par année : 1523 kg/an**
de CO₂ évités (1,5 Tonnes pour une production de 3200 kW.h)
Soit 476 kg de CO₂ pour 1000 kW produits en Europe (*Source INES*).

- **Matières hautement radioactives à longue vie évitée : 10,88 g/an** (Soit 0,0034g/ kW.h)

- **Relevés typiques issues du logiciel GRIDSOFT:**
En plus des mesurages en temps réel, on peut accéder aux informations journalières et annuelles via la base de données.

- **Relevés pour une journée d'été :**

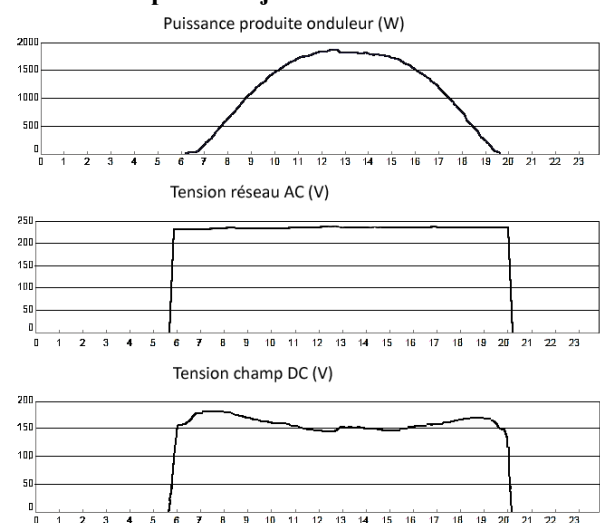


Figure 21 : Mesurage journalier du 31 Juillet 2007

La puissance produite suit la courbe d'ensoleillement (un jour d'été "parfait" sans nuage).

L'onduleur est assisté au réseau alternatif EDF (tension et fréquence constante) malgré les variations de tension continue issue du champ photovoltaïque. La régulation autour du point de puissance maximal est donc valide.

- Analyse de la production en 2007 :

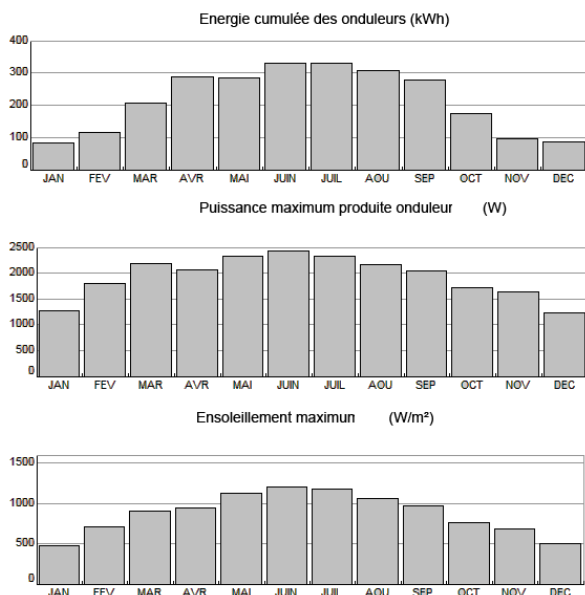


Figure 22 : Production énergétique cumulée 2007 (kWh), Puissance maxi produite (W) et Ensoleillement maxi (W/m²)

La production est optimale au mois de juin 2007. L'énergie cumulée, la puissance produite et l'ensoleillement sont maximums.

Ceci en raison d'une durée des jours importante et d'une température ambiante moins forte qu'en juillet et août.

4.3. Objectifs et cadre pédagogique

Maîtrise des technologies actuelles de production décentralisée à partir de travaux scientifiques et techniques sur une centrale connectée au réseau. Ce système industriel documenté est identique à celui qu'on peut trouver chez un particulier (non homothétique).

Quelques développements pédagogiques possibles :

Les panneaux solaires : technologie et fabrication. Problèmes posés par l'approvisionnement en silicium, principe de l'éco-conception appliquée à la fabrication et cycle de vie.

L'intégration dans le paysage, l'architecture et les modalités de pose.

Les modes de raccordements au fournisseur "historique" EDF, législation, tarifs de revente, contrat.

Analyses économiques préalable avec calcul du productible pour analyse rentabilité / viabilité du projet (topographie et ressource solaire).

Analyses économiques post installation avec les données de productions réelles :

- Mesurages et analyse des différentes grandeurs successivement transformées pour obtenir une énergie utilisable,
- Mesurages et analyse de la production instantanée, journalière, mensuelle...

Analyse du risque et des précautions lors d'investigations ou de mise en service de l'installation (isolement des deux sources, habilitation...).

Développement par des étudiants de STS : transfert et traitement des données prélevées sur la carte d'acquisition de l'onduleur avec sauvegarde sur une base de données via TCP-IP, liaison série, e-mail ou GSM. Mise en ligne des données sur le Web.

Activités développées au Lycée Victor Hugo :

- ##### 4.3.1. Etudier les données d'exploitation disponibles via un dispositif d'acquisition de données

Identification des fonctions et prise en main de la centrale (repérages topographiques, analyse des schémas, logiciels installés et applications associées).

- ##### 4.3.2. Faire des mesurages en temps réel pour effectuer un bilan de puissance

Point de fonctionnement instantané, rendement en puissance et identification du fonctionnement MPPT de l'onduleur associé aux panneaux solaires.

Mesurages en temps réel des paramètres de fonctionnement de l'onduleur avec le logiciel GRIDSOFT pour deux échantillons M1 et M2 du 22 juin 2007 :

	Eclairement	DC (Côté champ photovoltaïque)		
	G (W/m²)	Ia (A)	Va (V)	Pcont (W)
M1	464	6,7	163	1092,1
M2	1019	13,9	164	2279,6

	AC (Sortie onduleur)		
	Ig (A)	Rendement ond. (%)	Pg (W)
M1	4,4	95	1037
M2	9,2	95,3	2170

Analyse des résultats :

Le rendement moyen de l'onduleur est conforme à celui donné par le constructeur (*rendement de l'onduleur GRIDFIT 2500 > 93,5 %*).

Si on place les points de fonctionnement M1 et M2 sur la caractéristique $I=f(U)$ d'un panneau, on s'aperçoit qu'ils sont optimisés en fonction de l'éclairement (*MPPT recherché en permanence par l'onduleur*).

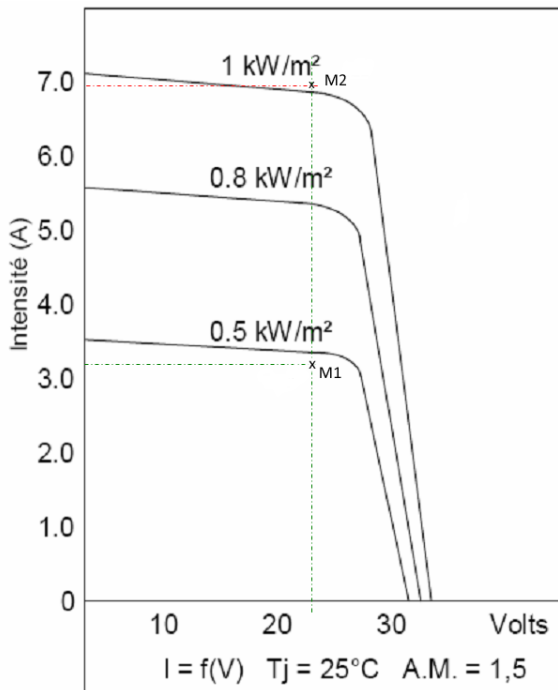


Figure 23 : M1 et M2 sur la caractéristique $I = f(U)$

Le point de fonctionnement M2 à $G = 1019 \text{ W/m}^2$ est particulièrement intéressant : la puissance de 2279 W en entrée de l'onduleur est inférieure à la puissance crête du champ photovoltaïque (*2279 W au lieu de 2800 Wc pour 1000 W/m²*).

En effet, on n'aura 2800 Wc que si la température est de 25°C, AM 1,5 et des pertes en lignes négligeables. Ce qui n'est pas le cas en été (22 juin 2007).

Un calcul ultérieur permet de mettre en évidence les pertes dues à la température ambiante élevée et à la longueur des câbles côté DC.

On peut faire ce travail à tout moment en accédant aux paramètres stockés dans la base de données.

4.3.3. Mettre en relation la production réelle avec le productible

Justification du dimensionnement proposé par l'installateur en fonction du cahier des charges (*énergie produite disponible via la base de données*).

- **Estimation de l'Irradiation Globale dans le Plan et du productible par simulation logicielle :** (logiciel **CALSOL/INES** : <http://ines.solaire.free.fr>)

Irradiation Globale dans le Plan : IGP

IGP = 1485 kWh/m².an (*cohérent avec les cartes d'irradiation et d'ensoleillement qui donnent la ressource solaire à un point donné*).

Productible annuel prévisible : 3119 kWh.an (*très proche de l'objectif de production = 3200 kWh.an*).

- **Energie électrique produite par an** si le coefficient de production (rendement électrique moyen sur l'année) **Kp** estimé de l'installation vaut **75 %** :

$2,8 \text{ kWc} \times 1485 \text{ h} \times 0,75 = 3118 \text{ kWh}$ électrique par an (productible identique à celui prévu avec CALSOL). Ceci correspond à un fonctionnement pendant 1480 heures à 1 kWc /m².

Avec la même centrale de 2,8 kWc à Lille on aurait un IGP = 1141 Kwh/m².an; soit un productible de 2394 kWh.an. Soit un fonctionnement pendant 1141 h à 1 kWc/m² soit 344 h de moins qu'à Colomiers.

- **Chute de tension, perte de puissance et fonctionnement en énergie :**

En général, il est demandé à ce que la **chute de puissance due au câblage** soit inférieure à 1 %. On est à 1,16 % sur notre centrale car la distance panneau/onduleur est importante (*2×35 m de câble continu pour 0, 298 Ω*).

Les pertes en puissances provenant de l'élévation de la température des cellules sont les plus importantes (*la perte théorique est évaluée à -0,43 %/°C*).

Vérification du fonctionnement en énergie à l'aide des données archivées :

- **Un jour en ETE : Kp réel = 0,71**
= 13,844 / (2,8 × 6,942)

Energie produite effective : 13,844 kWh avec 2,8 kWc pendant 6,942 heures. Soit l'équivalent de 6,942 heures de soleil à 1000 W/m² pour 13 h de fonctionnement réel de la centrale le **23/8/2006**.

L'estimation de Kp théorique moyen à 0,75 est mauvaise en été avec 29 % de pertes réelles au lieu des 25%. Ceci est dû au mauvais rendement des panneaux photovoltaïques en cas de fortes températures.

- **Un jour en HIVER : Kp réel = 0,86**
= 7,199 / (2,8 × 3)

Energie produite effective : 7,199 kWh avec 2,8 kWc pendant 3 heures. Soit l'équivalent de 3 heures de soleil à 1000 W/m² pour 9 h de fonctionnement réel de la centrale le 27/1/2007.

Kp réel est meilleur en hiver : 14 % de pertes réelles au lieu des 25% en théorie.

Kp réel augmente sensiblement en hiver lorsque la température diminue car les pertes sont essentiellement liées à l'élévation de températures.

A Colomiers, le productible moyen annuel correspond bien à celui estimé. La valeur de **Kp moyen** annuel égal à 75 % est donc valide.

En été, les pertes importantes sont très largement compensées par une irradiation et une durée du jour beaucoup plus importante qu'en hiver.

4.3.4. Mettre en relation la puissance instantanée et l'énergie produite par comptage

Utilisation du compteur et du relais TOR installé avec un automate programmable (*compteur Socomec COUNTIS AMD avec relais finder installé dans l'armoire électrique la centrale*).

Le principe est de compter les impulsions d'un contact sec. Chaque impulsion calibrée correspond à une énergie produite constante de 100 Wh.

Il s'agit de traiter cette information donnant l'énergie produite en faisant le lien avec le nombre d'impulsions émises par unité de temps lors de la mesure (20 impulsions/heure à 2 kW).

Suit naturellement l'étude économique et la réflexion sur le retour sur investissement.

La démarche serait différente avec des installations à plus grande échelle: toit du conseil général Midi Pyrénées ou d'un supermarché. Une étude comparative des différentes solutions technico-économique adoptées serait alors très intéressante.

5. Exemple d'expérience pédagogique : Voyage d'étude sur les énergies renouvelables à Barcelone

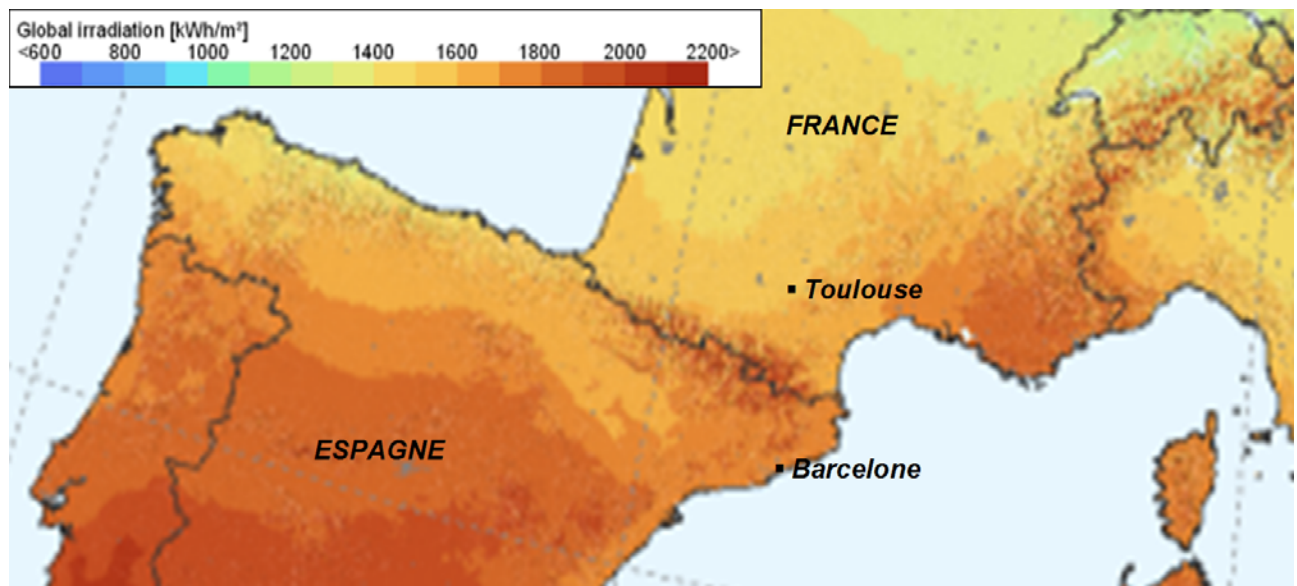


Figure 24 : Extrait de carte européenne de l'irradiation globale incidente sur une surface inclinée de façon optimale orientée au sud en kWh/m² (source Communauté Européenne)

5.1. Introduction

Nous organisons un voyage d'étude, d'une durée de 3 jours, sur les énergies renouvelables avec les élèves de première STI Génie électrique. Ce voyage s'inscrit pleinement dans la formation car durant l'année les élèves étudient les énergies renouvelables, notamment le solaire photovoltaïque où des activités pratiques sont dispensées sur notre micro-centrale photovoltaïque.

5.2. Choix de la destination

Un pays comme l'Espagne est précurseur dans ce domaine. Barcelone, capitale de la Catalogne, a été une ville active dans le mouvement des Agenda 21 en Espagne. Elle a adopté cette démarche dès 2002, en partenariat avec de nombreuses institutions.

<http://www.bcn.es/agenda21/>

Les systèmes solaires thermiques et photovoltaïques sont installés à grande échelle.



Figure 25 : Photo de groupe sous la voile solaire

L'Espagne est devenue le pays le plus avancé en matière de législation solaire. Elle a adopté le 17 mars 2006 un nouveau code de la construction (CTE – Código Técnico de la Edificación) établi sur le succès des ordonnances solaires. Ce code donne obligation,



Figure 26 : installation P.V sur un bâtiment de la mairie

pour toutes nouvelles constructions ou bâtiments entièrement réhabilités, de couvrir entre 30 et 70 % des besoins d'eau chaude à partir de solaire thermique. Cette mesure représente le dispositif clé qui permettra d'atteindre l'objectif de près de 5 millions de m² de capteur posés d'ici 2010 dans le pays.

Au cours des visites nous avons pu nous rendre compte de l'implication de la mairie de Barcelone à la promotion et au développement des énergies renouvelables. Nombreux sont les bâtiments publics (**Figure 26**) équipés de panneaux solaires photovoltaïques (édifices municipaux et établissements scolaires).

Toutes ces installations totalisent une superficie de captation solaire de 8075 m² et produisent environ 1187 MWh/an et évitent un rejet de 209 tonnes de CO₂/an dans l'atmosphère. Les écoles de la ville sont intégrées au plan d'action (*agenda 21*) de Barcelone. Elles y participent en sensibilisant les élèves sur l'intérêt de l'utilisation des énergies renouvelables.

Depuis un accès Internet, les données de production sont disponibles.

Les écoles et les équipements sportifs sont également équipés de panneaux solaires thermiques : 52 installations municipales d'une superficie de captation de 4341 m² et une production énergétique annuelle dépassant les 3.545.000 kWh.

5.3. Forum de Barcelone

C'est en 2004 que fut décidée la conversion d'une zone industrielle et marginale en une zone centrale de services et de loisirs, en y intégrant les infrastructures environnementales (Forum Barcelona 2004).



Figure 27 : Voile solaire du Forum

L'efficacité énergétique et l'utilisation des énergies renouvelables ont été prises en compte pour la réalisation des constructions principales de la zone : une centrale photovoltaïque et un système centralisé de climatisation (l'eau froide ou chaude est distribuée aux édifices de la zone du Forum et de ses alentours).



Figure 28 : La pergola du Forum

La centrale photovoltaïque se compose de deux éléments :

- la voile solaire (**Figure 25 et 27**),
- la pergola solaire (**Figure 28**), structure offrant des zones d'ombre dans la place du Forum.

La voile solaire s'étend sur une superficie de 3780 m² pour une puissance de 440 kWc et une production annuelle de 553 MWh.

La pergola solaire (partie offrant de l'ombre à la place) s'étend sur une superficie de 6920 m² pour une puissance de 860 kWc et une production annuelle de 1080 MWh.

Les importantes puissances mises en jeux permettent d'aborder le dimensionnement à grande échelle d'une centrale PV.

La diversité des installations liées aux énergies renouvelables est une ressource technologique majeure pour nos élèves.

Barcelone est également intéressante sur le plan culturel : centre historique gothique, Sagrada Familia, casas de Gaudi, ses musées et sa dimension de capitale de la Catalogne.

6. Conclusion

L'efficacité des installations et leur aspect développement durable sont les fils conducteurs de toutes les applications pédagogiques. L'accueil, la motivation et les multiples questionnements issus de ce type de travail avec les élèves est extrêmement positif.

Plus largement, la pratique de ces enseignements montre qu'il est possible d'aborder les enjeux énergétiques nationaux voir mondiaux.

Bibliographie :

- *Revue 3Ei n° 50 septembre 2007 : pratiques pédagogiques Académie de Lille*
- *Le photovoltaïque pour tous : Conception et réalisation d'installations / Observ'ER Editions LEMONITEUR*

Liens Internet :

- <http://www.iufmrese.cict.fr> (Reselec : centre de ressources électrotechnique)
- <http://www.tenesol.com/fr/> (documentation constructeur)
- <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/> (centre de ressource de la communauté européenne)

Expérimentation sur la problématique de l'efficacité énergétique dans le domaine du pompage

Pierre LORMEAU p.lormeau@ac-toulouse.fr

Lycée Alexis MONTEIL RODEZ

Résumé : Je propose une expérimentation sur le système "IRIS" dont l'objectif est de montrer que l'efficacité énergétique est meilleure avec un dispositif de régulation de la pression par action sur la vitesse variable d'un groupe motopompe plutôt que par action sur une vanne de perte de charge. Après une introduction au concept d'efficacité énergétique je présente le système didactisé "Iris" puis rappelle quelques notions d'hydraulique. Je décris ensuite la démarche adoptée pour la conception de l'expérimentation et son insertion dans une progression sur la même problématique. Je donne les résultats obtenus et leur analyse et propose des pistes pour améliorer cette expérimentation.

1. Introduction au concept d'efficacité énergétique

Définition possible :

"L'efficacité énergétique est une stratégie qui permet de réduire les consommations d'énergie, à service rendu égal, et qui entraîne la diminution des coûts écologiques liés à la production et à la consommation d'énergie" [1].

L'efficacité énergétique est un thème résolument d'actualité. Avant les premières Assises de l'Efficacité Énergétique qui se sont tenues à la Cité des Sciences de la Villette le 15 janvier 2008, il y avait eu, plusieurs fois, les Rendez-vous de l'efficacité énergétique organisés par le GIMELEC [2]. L'ADEME [3] est à l'origine de nombreux documents incitant à une réflexion et des actions en vue de réduire la consommation énergétique et les émissions de CO². Les grands constructeurs se sont fortement investis dans le domaine de la motorisation à haut rendement énergétique (variateur de vitesse / moteur / entraînements) [4].

L'efficacité énergétique est un thème dont nous sommes des acteurs à part entière et il nous appartient, dans nos actions de formation, de sensibiliser nos élèves et nos étudiants à cet aspect de l'électrotechnique. La figure 1 représente la consommation d'énergie électrique dans le domaine industriel en France.

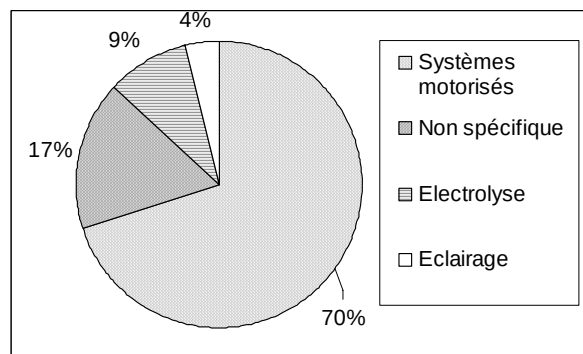


Figure 1 : Consommation d'énergie électrique dans le milieu industriel en France (données ADEME [3])

Une part non négligeable (33%) du gisement potentiel d'économie réalisable se situe dans les domaines de la ventilation et du pompage centrifuge : voir figure 2.

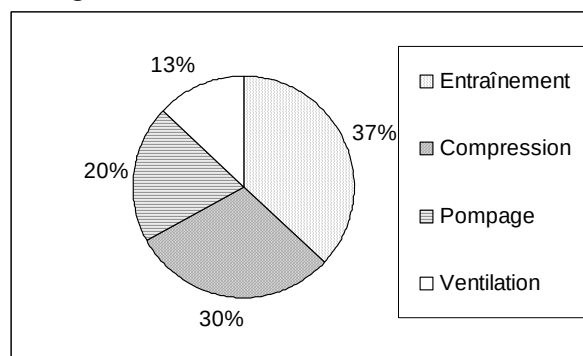


Figure 2 : Parts de la consommation électrique dans les systèmes motorisés. (données ADEME [3])

Tant que l'énergie électrique était d'un coût relativement faible, du fait des relativement faibles coûts des énergies primaires, et que des préoccupations comme les rejets de gaz à effet de serre et le réchauffement climatique n'étaient pas à l'ordre du jour personne ne se préoccupait vraiment d'améliorer

l'efficacité énergétique de chacun des différents constituants d'une chaîne de conversion d'énergie. Le premier choc pétrolier, en 1973, a été à l'origine d'une évidence : les coûts de fonctionnement ne pouvaient plus être négligés. La prise de conscience du réchauffement climatique et l'influence, reconnue par la grande majorité des scientifiques, du rejet des gaz à effet de serre ont incité d'avantage à la recherche d'une meilleure efficacité globale et aussi à une meilleure utilisation des chaînes de conversion de l'énergie.

J'ai choisi le système "IRIS" comme support des expérimentations que je propose à mes élèves et j'ai choisi, pour plus de simplicité lors des mesures, pour un service rendu par ce système bien défini (débit – pression), de faire mesurer les puissances absorbée et utile (en W, VA, VAR) plutôt que les énergies (Wh).

2. Présentation du système IRIS

Le système IRIS est un système didactisé de distribution d'eau asservi en pression développé par la société Leroy Somer [5]. La quasi totalité des établissements de l'académie de Toulouse préparant au baccalauréat STI Génie Electrique sont dotés de ce système.

Le système est semblable en débit et en pression à une petite station d'irrigation située en ARIEGE. La surface d'arrosage doit rester constante, les buses (ou arroseurs ou asperseurs) sont calibrées en débit pour une pression donnée. Le nombre de buses en service peut varier, donc le débit varie aussi. **Le service rendu par ce système est le maintien de la pression à une valeur constante quel que soit le débit afin de garder constante la surface d'arrosage par arroseur.**

2.1. Partie hydraulique : (voir figure 3)

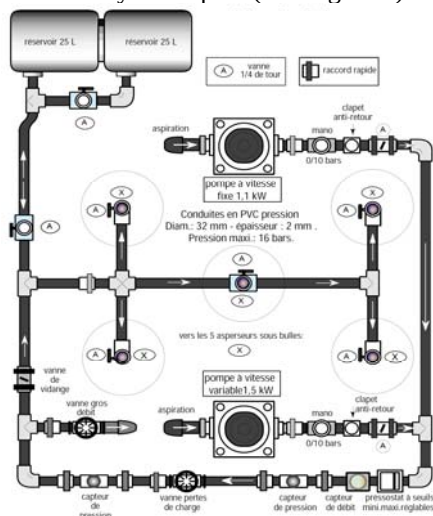


Figure 3 : schéma de la partie hydraulique

Pour la Partie Opérative (PO), le système IRIS est un système qui possède les caractéristiques de l'installation d'irrigation réelle. Pour la Partie Commande (PC), il est possible de mettre en œuvre cinq principes de fonctionnements différents. Le débit maximal est de $7,5 \text{ m}^3/\text{h}$ sous une pression de 5 bars. Les circuits sont réalisés en PVC "pression". Le système fonctionne en cycle fermé, l'eau pompée est refoulée dans la bache (réservoir).

Electropompes :

2 groupes électropompes, (pompes centrifuges multicellulaires verticales), sont montés sur l'installation :

- l'un fonctionne à fréquence de rotation fixe.
- l'autre fonctionne à fréquence de rotation variable associée à un convertisseur de type "MLI", $U/f = C^{\text{te}}$.

Mise en charge :

Les variations de débit sont obtenues avec les 5 électrovannes, fonctionnant en tout ou rien, qui alimentent des buses à ouverture calibrée ($1,5 \text{ m}^3/\text{h}$ pour 5 bars, ce qui correspond au débit maximum des 5 arroseurs soit $7,5 \text{ m}^3/\text{h}$). Pour augmenter le débit une vanne "gros débit" ramène l'eau pompée directement dans la bache, ce qui permet d'obliger le système à fonctionner au-delà des limites de l'asservissement de pression.

Accessoires hydrauliques :

Une vanne montée entre les 2 capteurs de pression assure une perte de charge volontaire.

Capteurs de mesures :

- 2 manomètres à aiguille à la sortie des pompes.
- Trois capteurs analogiques :
 - . 1 débitmètre : $0/12 \text{ m}^3/\text{h}$; 2 capteurs de pression $0/10 \text{ V}$
- Un pressostat à seuil utilisé lors du fonctionnement en "semi automatique".

2.2. Partie motorisation - pompage

Electropompe à fréquence de rotation fixe :

(cf. figure 4) Elle peut fonctionner seule en marche forcée.

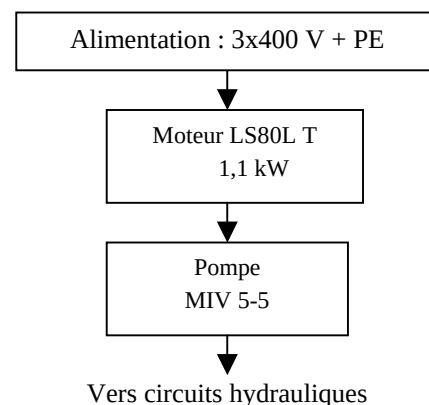


Figure 4 : électropompe à fréquence de rotation fixe

Electropompe à vitesse variable :

(cf. figure 5)

Elle peut fonctionner seule en marche automatique sous réserve que le fonctionnement demandé soit tel que la fréquence de rotation ne dépasse pas 80% de la fréquence de rotation nominale ; c'est possible si la valeur de consigne pour la pression en aval de la vanne de pertes de charge est réglée à 2 bar et si la vanne de perte de charge est complètement ouverte. (pas de perte de charge supplémentaire)

Alimentation : 3x400 V + PE

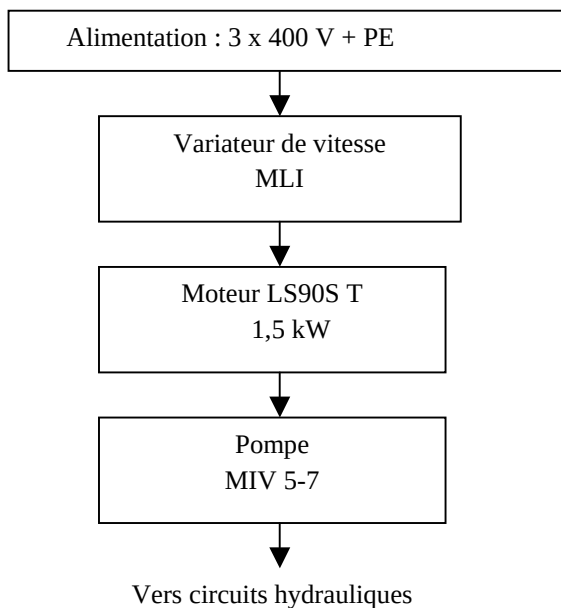


Figure 5 : électropompe à fréquence de rotation variable

2.3. Fonctionnements possibles :

1 Automatique : fonctionnement à pression constante. Les 2 électropompes sont pilotées par la carte électronique de régulation (PI) en boucle fermée en fonction du débit demandé.

2 Semi-automatique : la pompe à fréquence de rotation fixe associée aux deux réservoirs est asservie à la pression par le pressostat à seuil.

3 Marche forcée : seule la pompe à fréquence de rotation fixe est alimentée. Le relevé du graphe $P=f(Q)$ est possible.

4 Automate : l'automate installé dans le coffret assure la commande et le contrôle du système à partir d'un logiciel dédié. Ce logiciel assure également la supervision du fonctionnement du système.

5 Boucle ouverte : le système fonctionne dans les mêmes conditions qu'en "Automatique" mais sans asservissement de la pression.

3. Quelques notions d'hydrauliques

(source catalogue technique "POMPES" Leroy-Somer)

3.1. Le débit:

Le débit est la quantité d'eau recueillie à la sortie de la pompe en un temps donné. Cette quantité s'exprime en mètres cube/heure (m^3/h) ou en litres/heure (l/h).

3.2. La pression :

La pression utile : c'est la pression d'eau en bar (ou kg/cm^2) nécessaire au point d'utilisation (arroseurs, robinet, entrée d'une machine, etc.).

3.3. Les pertes de charge :

Tout liquide véhiculé à l'intérieur d'une tuyauterie est soumis à des contraintes et des frottements appelés "pertes de charge". Ces pertes de charge s'expriment en mètres de colonne d'eau (mCE) et sont liées à la section du tuyau, au débit véhiculé et à la température de l'eau.

Contrôle par vanne de régulation :

Contrôler une pompe centrifuge par une vanne de régulation constitue une perte d'énergie. Le contrôle par vanne de régulation est, cependant, moins gaspilleur d'énergie que deux autres moyens largement utilisés : l'absence de contrôle et le délestage. Les vannes peuvent, donc, être un moyen d'économiser l'énergie. [6]

3.4. Les caractéristiques des motopompes :

La figure 6 permet le choix d'une pompe de type MIV-5 en fonction du débit et de la HMT (Hauteur Manométrique totale).

Remarque : les constructeurs donnent rarement les courbes de rendement des pompes ; les valeurs de rendement usuelles pour des pompes centrifuges vont de 0,3 à 0,8.

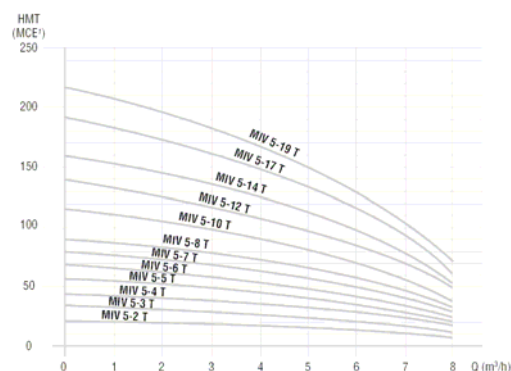


Figure 6 : caractéristiques $HMT = f(Q)$ (source catalogue technique "POMPES" Leroy-Somer)

4. La démarche de conception du TP

4.1. La progression

Depuis 2002 nous nous efforçons de développer une stratégie inductive de type "apprendre en faisant" autour de centres d'intérêts clairement identifiés. Pour faire simple la démarche, du point de vue de l'élève, est représentée par la figure 7 qui représente le déroulement d'une progression type.

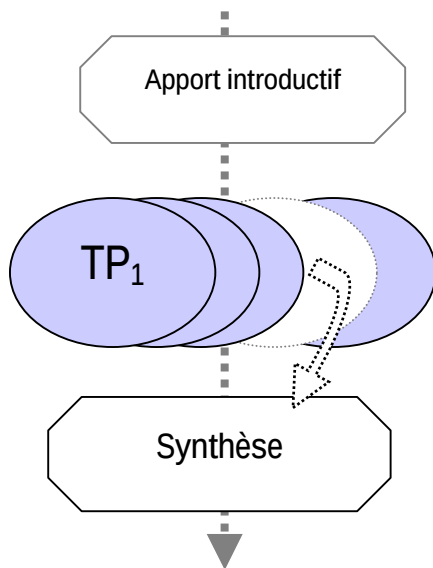


Figure 7 : déroulement d'une progression type [7]

Un apport introductif permet une mise en situation et le "lancement" de la série de TP (3 TP relatifs au même centre d'intérêt ; 2 centres d'intérêts "électrotechnique" par série)

Les différents sujets de TP, d'une durée de 3 heures en terminales, sont successivement abordés par l'élève aux cours des différentes séances lors de la progression. Pour chaque TP est définie une "situation problème" ou une problématique.

La séance de synthèse permet la formalisation des savoirs ; les élèves sont acteurs de cette formalisation. La synthèse est suivie par une série de TP/TD qui constituent autant de possibilité de transfert, dans une démarche globalement déductive, de ces connaissances nouvellement acquises.

Le sujet de TP présenté ici est relatif au centre d'intérêt "Comportement énergétique des systèmes", plus précisément "architecture, puissance et rendement d'une chaîne d'énergie donnée". Il constitue un sujet parmi 3 sujets sur le même centre d'intérêt, les deux autres sujets étant traités sur deux autres systèmes, un système malaxeur et un système de levage. Les séances de travaux pratiques sont relativement courtes (3h) et pour un élève l'ensemble (apport introductif + les

séances de TP + la synthèse + une séance de transfert) dure environ 2 semaines (soit 16 h élève). Ce centre d'intérêt est abordé lors du second trimestre de l'année de terminale pour un candidat au baccalauréat "Génie électrotechnique".

L'activité d'apport introductif peut être traitée en cours et aborder les points suivants :

- présentation du centre d'intérêt
- présentation du contexte industriel pour le pompage
- nécessité de diminuer les coûts d'utilisation des systèmes et les rejets de CO² par une diminution de la consommation énergétique, pour un service rendu équivalent, sinon meilleur.
- intérêt de la variation de vitesse dans le cadre du pompage à débit variable.

4.2. La synthèse

La synthèse revient sur les savoirs et les savoirs faire essentiels que l'élève doit s'être approprié à la suite des différentes séances de travaux pratiques.

Les notions suivantes sont visées :

- rendement d'un convertisseur d'énergie
- rendement global d'une chaîne de conversion d'énergie (avec la mise en évidence que le constituant le moins performant est celui qui contribue le plus à dégrader le rendement global)
- efficacité énergétique plus ou moins importante de tel ou tel procédé (ici la mise en pression à faible débit en utilisant un dispositif moto pompe à fréquence de rotation variable présente l'efficacité énergétique la meilleure des deux procédés étudiés).

5. Les essais (le sujet de Travaux d'expérimentation ou Travaux Pratiques)

5.1. La situation problème :

Dans le cas de l'utilisation d'une pression constante au niveau utilisateur deux solutions peuvent être utilisées :

- agir sur le circuit hydraulique par l'intermédiaire d'un dispositif de réglage de la pression à la valeur d'utilisation souhaitée par introduction de perte de charge. Dans ce cas le moteur d'entraînement fonctionne à fréquence de rotation fixe. (cf. figure 8)

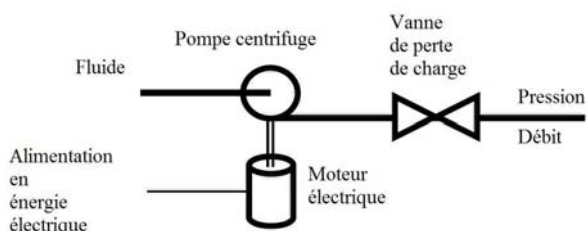


Figure 8 : pression fixe avec vanne de perte de charge [8]

- agir sur le circuit électrique avec un dispositif de modulation d'énergie en amont du moteur (variateur de vitesse) (cf. figure 9)

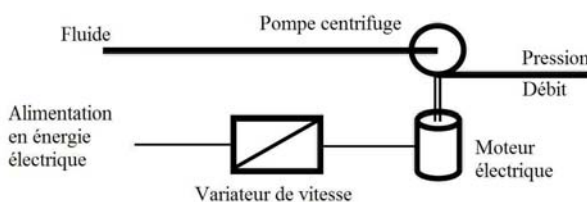


Figure 9 : pression fixe avec variateur de vitesse [8]

Le problème consiste à effectuer un choix entre les deux solutions et les expérimentations proposées permettent d'apporter des éléments en faveur de telle ou telle solution. Il s'agit de comparer les valeurs de rendements énergétiques pour les deux solutions envisagées.

Remarque préliminaire : pour que les mesures aient du sens et compte tenu d'un réseau d'alimentation en énergie électrique triphasé assez perturbé il faut utiliser des moyens de mesure performants (ici un "Three Phase Power Quality Analyzer 433" de FLUKE). L'utilisation de ces moyens devient indispensable lors des mesurages sur le groupe motopompe à fréquence de rotation variable.

L'élève a accès à des ressources documentaires uniquement pendant la période d'expérimentation : notice d'utilisation des nouveaux appareils de mesure, schémas développés des circuits électriques, schémas des borniers, etc....

5.2. Essai 1 – (essai préliminaire)

En fonctionnement en "marche forcée", pour des pertes en charge minimales (vanne de pertes de charge ouverte au maximum) et pour les utilisations successives de 1 à 5 buses (arroseurs), relever :

Les grandeurs électriques :

- la valeur de la puissance active absorbée par le moteur,
- la valeur de la puissance apparente,
- la valeur de la puissance réactive,

Les grandeurs hydrauliques :

- la valeur de la pression en amont de la vanne de pertes de charge.
- la valeur de la pression en aval de la vanne de pertes de charge,
- la valeur du débit.

Noter la valeur de la pression obtenue en aval de la vanne de pertes de charge pour l'utilisation de 5 arroseurs ; c'est cette valeur qui sera maintenue constante au niveau des arroseurs pour les prochaines expérimentations.

5.3. Essai 2

En fonctionnement en marche forcée, pour des pertes en charge variables (action manuelle sur la vanne de pertes de charge) afin d'obtenir une pression en aval de la vanne de pertes de charge constante et pour les utilisations successives de 1 à 5 arroseurs, relever les mêmes grandeurs que dans l'essai 1.

5.4. Essai 3

En fonctionnement en marche automatique, pour des pertes en charge minimales (vanne de pertes de charge ouverte au maximum) et une valeur de consigne de pression égale à la valeur notée lors de l'expérimentation 1 et pour les utilisations successives de 1 à 5 buses, relever les mêmes grandeurs que dans l'essai 1.

5.5. Analyse et exploitation des résultats

Le service rendu est la puissance hydraulique utile : c'est le produit du débit aval par la pression utile.

$$Pu = Q \cdot p, \text{ avec } \begin{array}{l} Pu \text{ en W} \\ Q \text{ en m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \\ p \text{ en Pa (1Pa} = 10^{-5} \text{ bar)} \end{array}$$

Vérifier que le service rendu est sensiblement le même pour le même nombre de buses pour les essais 2 et 3. Tracer les évolutions des puissances utiles en fonction du nombre de buses en service.

Tracer les évolutions des puissances actives relevées lors des essais 2 et 3 sur un même graphique. Comparer les évolutions des puissances actives pour les essais 2 et 3.

Tracer les évolutions des puissances apparentes relevées lors des essais 2 et 3 sur un même graphique. Comparer les évolutions des puissances apparentes pour les essais 2 et 3.

Tracer les évolutions des puissances réactives relevées lors des essais 2 et 3 sur un même graphique. Comparer les évolutions des puissances réactives pour les essais 2 et 3.

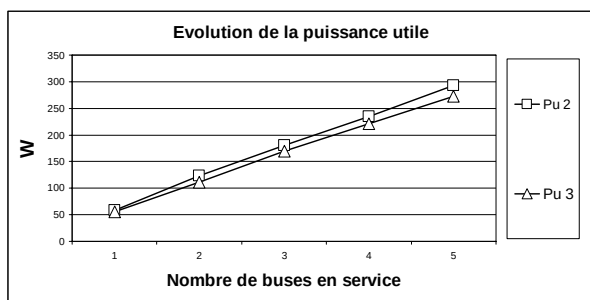
Tracer les évolutions des pressions amont et aval et des débits pour les essais 2 et 3. Comparer les évolutions.

Evaluer les valeurs des rendements énergétiques globaux de la chaîne d'énergie pour 1 à 5 buses pour chacun des essais 2 et 3. Pourquoi peut-on dire que l'efficacité énergétique est meilleure pour le fonctionnement à fréquence de rotation variable (essai 3) plutôt que pour le fonctionnement à fréquence de rotation fixe et utilisation de la vanne de perte de charge (essai 2) pour régler la pression utile ?

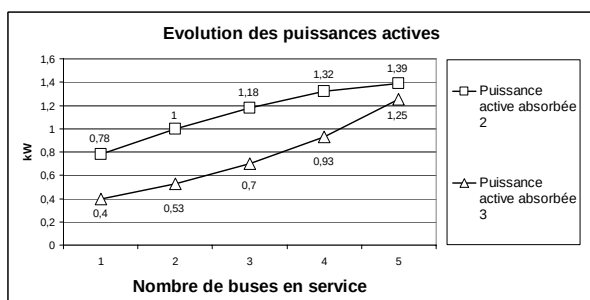
Pour 3 buses en service calculer l'énergie consommée et le coût de la consommation sur une saison d'arrosage dans le cas 2 et dans le cas 3 avec les données suivantes :

- arrosage pendant 6 heures par 24 h
- saison moyenne de 120 jours
- coût du kWh : 0,12 € (consommation type, tarif bleu EDF, aout 2007)

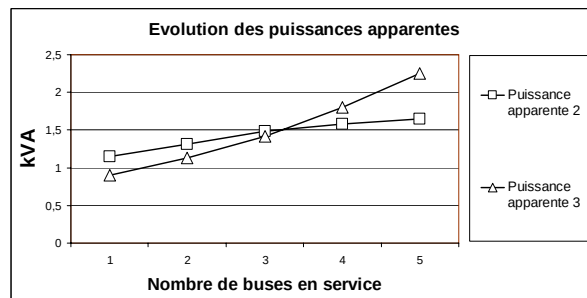
6. Les résultats obtenus et leur analyse



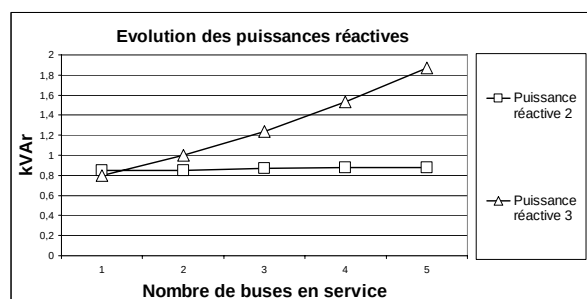
La puissance hydraulique utile (le service rendu) a sensiblement les mêmes valeurs dans les deux types de fonctionnement.



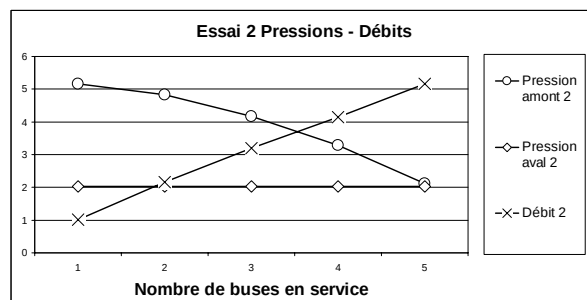
La puissance active absorbée par le moteur fonctionnant à fréquence de rotation fixe est plus importante que celle absorbée par le moteur fonctionnant à fréquence de rotation variable pour chaque point de fonctionnement. Les valeurs se rapprochent pour 5 buses en services (il n'y a plus de perte de charge supplémentaire pour l'essai 2). Du point de vue énergétique le fonctionnement à fréquence de rotation variable est globalement plus intéressant.



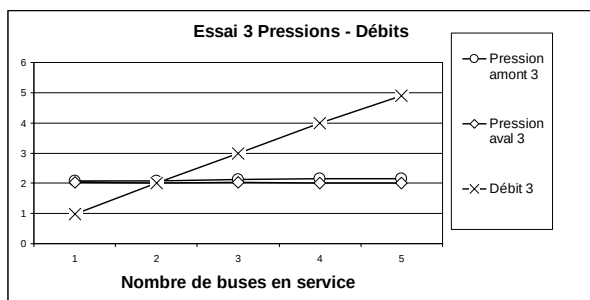
La puissance apparente devient plus importante pour 4 et 5 buses en service pour le fonctionnement à fréquence de rotation variable. Du point de vue du réseau c'est plutôt un inconvénient qui est dû d'une part au type de variateur de fréquence utilisé et d'autre part à la faible puissance du moteur. (Il est vraisemblable qu'avec une motopompe de forte puissance la valeur relative de la puissance apparente serait plus faible)



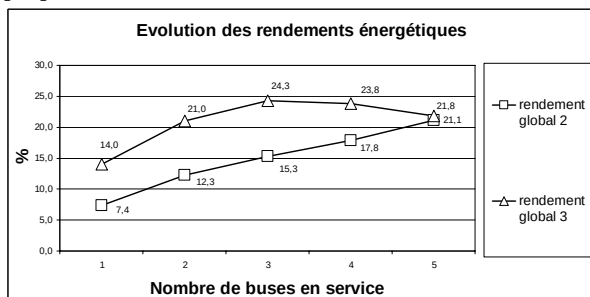
La puissance réactive augmente avec le nombre de buses en service (donc avec le service rendu). C'est plutôt un inconvénient. (Il est vraisemblable qu'avec une motopompe de forte puissance la valeur relative de la puissance réactive serait plus faible)



La pression aval est maintenue constante par réglage de la vanne de perte de charge. La différence de pression se retrouve donc au niveau de la vanne de perte de charge. A pression de service constante le débit augmente proportionnellement au nombre de buses en service.



Il y a régulation de pression ; la valeur de pression constante est obtenue grâce au fonctionnement à fréquence de rotation variable du groupe motopompe. A pression de service constante le débit augmente proportionnellement au nombre de buses en service.



Le rendement global est meilleur dans le cas de l'utilisation d'une moto pompe à fréquence de rotation variable dès lors que 1 à 4 buses sont utilisées ; il n'y a aucun système de "réglage" de la pression par pertes de charge, donc aucune perte de charge autre que celle propre aux canalisations. Les valeurs de rendements globaux se rejoignent pour 5 buses en service ; c'est le fonctionnement sans perte de charge supplémentaire pour le groupe motopompe à fréquence de rotation fixe.

Du point de vue de l'exploitant de la station d'irrigation, qui paye l'énergie électrique, on peut faire le calcul du coût de l'énergie consommée sur une saison (*prix du kWh : 0,12 € - tarif bleu -EDF- aout 2007*). En considérant un arrosage de 6 heures par 24 h pendant 120 jours en moyenne sur une saison :

Energie consommée sur une saison dans le cas 2 :

$$W_2 = 1,18 \times 6 \times 120 = 850 \text{ kW.h}$$

Coût de l'énergie consommée sur une saison :

$$C_2 = 850 \times 0,12 = 102 \text{ €}$$

Energie consommée sur une saison dans le cas 3 :

$$W_3 = 0,7 \times 6 \times 120 = 504 \text{ kW.h}$$

Coût de l'énergie consommée sur une saison :

$$C_3 = 504 \times 0,12 = 60,5 \text{ €}$$

L'économie réalisée sur le coût de l'énergie électrique est de l'ordre de 60% si c'est un dispositif motopompe à fréquence de rotation variable qui est utilisé.

7. En guise de conclusion

L'expérimentation est concluante en ce qui concerne la meilleure efficacité énergétique obtenue pour le fonctionnement avec le système motopompe à fréquence de rotation variable car, du point de vue de l'exploitant, pour un même service rendu la facture est moins lourde. Toutefois, du point de vue du réseau, dès lors que la puissance apparente est supérieure pour l'essai 3 à celle pour l'essai 2, c'est l'essai 2 qui est le plus intéressant (tant que les variateurs utilisés pour l'essai 3 n'ont pas d'étage d'entrée à absorption...). Il est néanmoins très vraisemblable que pour des puissances mises en jeu plus grandes la puissance apparente serait, relativement, moins importante et de ce fait le système motopompe à fréquence de rotation variable deviendrait intéressant aussi du point de vue exploitant du réseau. Une suite à donner consiste à obtenir des résultats de mesure effectuées sur une installation réelle de plus forte puissance.

Un autre point à envisager pour rendre cette expérimentation plus convaincante pour nos élèves ou étudiants : faire fonctionner le même groupe motopompe soit en fréquence de rotation fixe, soit en fréquence de rotation variable, ce qui n'est pas prévu actuellement sur le système et qui nécessite une modification de câblage...

Bibliographie – sources internet

- [1] Yves Cochet – Rapport au premier ministre "Stratégie et moyens de développement de l'efficacité énergétique et des sources d'énergie renouvelable en France" – année de publication : 2000.
- [2] GIMELEC : groupement des industries de l'équipement électrique, du contrôle-commande et des services associés
www.gimelec.fr
- [3] ADEME www.ademe.fr
- [4] J3E Journal de l'Equipeement Electrique et Electronique n° 759, novembre 2006, article "Quand eau et automatisation font bon ménage" et n° 765, juin-juillet 2007, article "Variation de vitesse, maillon fort de la performance énergétique". www.j3e.com
- [5] documentation Leroy Somer www.leroysomer.com
- [6] source COMMISSION EUROPEENNE Programme "Motor Challenge" 2003 www.motorchallenge.fr
- [7] Publication relative au séminaire académique des 13 et 14 mai 2003 "Contribution à la réflexion sur l'enseignement des Sciences et Techniques Industrielles ... et de la technologie au collège" rédigée par Marc RUBAUD, IA-IPR – Manuel MUSIAL, formateur IUFM – Pierre STEPHAN, formateur IUFM
- [8] "Propriétés générales de la variation de vitesse des machines électriques", document libre de Christian GLAIZE, formateur à l'Université Montpellier II et l'IUT de Nîmes

Etude et exploitation pédagogique du dimensionnement d'une pompe à chaleur

Olivier PLOUVIEZ et Fernand RODRIGUES – Enseignant en électrotechnique - Lycée Charles de Gaulle 31600 Muret

Mustapha LABRAGA - Enseignant en électrotechnique - Lycée Pierre Paul Riquet 31650 St-Orens

Philippe RODIER – Formateur - IUFM Midi-Pyrénées Toulouse Rangueil

Résumé : Pour sensibiliser les élèves de STI Génie Electrotechnique aux économies d'énergie et aux problèmes environnementaux, il est nécessaire de s'intéresser aux postes à fortes dépenses énergétiques dans le bâtiment ; le chauffage représente environs 60 % de la consommation énergétique. Notre choix s'est porté sur la pompe à chaleur, car elle s'inscrit dans le cadre de la politique européenne du développement durable.

Dans un premier temps, après une analyse du cahier des charges de l'habitation à chauffer, les élèves calculent le besoin énergétique. Ils s'intéressent ensuite au fonctionnement de la pompe à chaleur. Ils dimensionnent alors le matériel dans le cadre de notre application. Enfin, ils comparent d'un point de vue financier et environnemental, l'installation d'une pompe à chaleur par rapport à d'autres systèmes de chauffage

Cette action pédagogique est expérimentée avec des élèves de secondes en enseignement de détermination « Informatique et Systèmes de Production » au lycée Charles de Gaulle de Muret. Elle est transposable à d'autres niveaux d'enseignement.

Nous nous limiterons dans cet article à décrire une démarche pédagogique possible.

1. Situation et contexte d'utilisation dans notre application

L'énergie devenant de plus en plus chère et rare (diminution des ressources fossiles) il devient nécessaire de mieux la gérer.

Dans la maison individuelle, la majorité des dépenses énergétiques se situe au niveau du chauffage. Il est donc important de choisir un mode de chauffage peu gourmand en énergie.

Actuellement, il existe sur le marché plusieurs types de chauffage utilisant les énergies renouvelables : chauffage solaire, chauffage géothermique et pompes à chaleur.

Dans le cadre de leur formation, nos élèves de S.T.I. Génie Electrotechnique doivent être sensibilisés à ces problèmes énergétiques. Le chauffage géothermique et les pompes à chaleur utilisent le même principe thermo-dynamique. Cependant, la mise en œuvre de tels process est délicate, c'est pourquoi nous limiterons notre champ d'étude à la pompe à chaleur (PAC) air/air.

2. Objectifs de formation

L'élève devra être capable de dimensionner une PAC à partir du besoin réel d'un client et d'en comprendre son fonctionnement.

Pour cela, l'étude du système se décomposera en sept séquences.

Objectifs	- Dimensionner une PAC - Appréhender le fonctionnement d'une PAC
Centres d'intérêts ^[1]	<u>C.I.1.</u> : Fonctionnalité, architecture et structure d'un système <u>C.I.2.</u> : outils de représentation et schématisation <u>C.I.3.</u> : alimentation en énergie d'un système <u>C.I.5.</u> : distribuer l'énergie en protégeant les biens et les personnes <u>C.I.7.</u> : comportement énergétique des systèmes <u>C.I.8.</u> : pilotage, contrôle et comportement des systèmes
Matériels	-Système Didactique PAC Didatec - Appareils de mesure : Anémomètre, hygromètre, thermomètre, wattmètre.
Documents	Fichiers PDF de constructeurs (CIAT) Logiciel de bilan thermique (ATLANTIC)

Vocabulaires

PAC : Pompe à Chaleur

Chaleur : Energie thermique d'un fluide

Enthalpie : Energie thermique pour un kilogramme de fluide

Température Sèche :

Température mesurée avec un thermomètre

Humidité Relative ou Degré Hygrométrique (HR) :

$$HR = \frac{\text{Masse de vapeur d'eau contenue dans l'air}}{\text{Masse MAXIMALE de vapeur d'eau que pourrait contenir ce même air (à la même température)}}$$

COP : Coefficient de performance en chauffage

EER : Coefficient de performance en climatisation

3. Développement des séquences

3.1. Séquence 1 : « Définir le besoin »

Objectifs	- Définir le confort thermique - Calculer un bilan thermique
Centres d'intérêts	<u>C.I.7</u> : comportement énergétique des systèmes

3.1.1. Présentation du cahier des charges :

- Plans de la maison, et CCTP (cf. figure 1)
- Objectifs de l'étude

3.1.2. Le confort dans l'habitat

A l'aide du document fourni (cf. figure 4), compléter le questionnaire afin de déterminer les paramètres importants influençant le confort thermique (degrés d'hygrométrie, températures, vitesse de l'air...).

3.1.3. Calcul du bilan thermique

A l'aide du cours, définissant la notion de bilan thermique et les différents modes de transmission de chaleur, déterminer avec le logiciel (cf. figure 3) le bilan thermique de la maison. Les différents paramètres nécessaires à ce calcul, se trouvent dans le cahier des charges (nombre d'occupants, ventilation, isolation...) et sur les plans architecturaux (cotation des murs et fenêtres)

3.2. Séquence 2 : « Contextualiser le support »

Objectifs	- Définir les différentes technologies de PAC - Mettre en service la maquette
Centres d'intérêts	<u>C.I.1</u> : Fonctionnalité, architecture et structure d'un système

3.2.1. Les différentes technologies dans leur contexte réel

A l'aide de documents multimédia, effectuer le bilan des différentes technologies sur le marché (eau/eau, eau/air, air/air, air/eau).



Unité extérieure



Unité intérieure type gainable



Unité intérieure type Split

Figure 2 : Exemples d'installations de Pac Air/Air^[2]

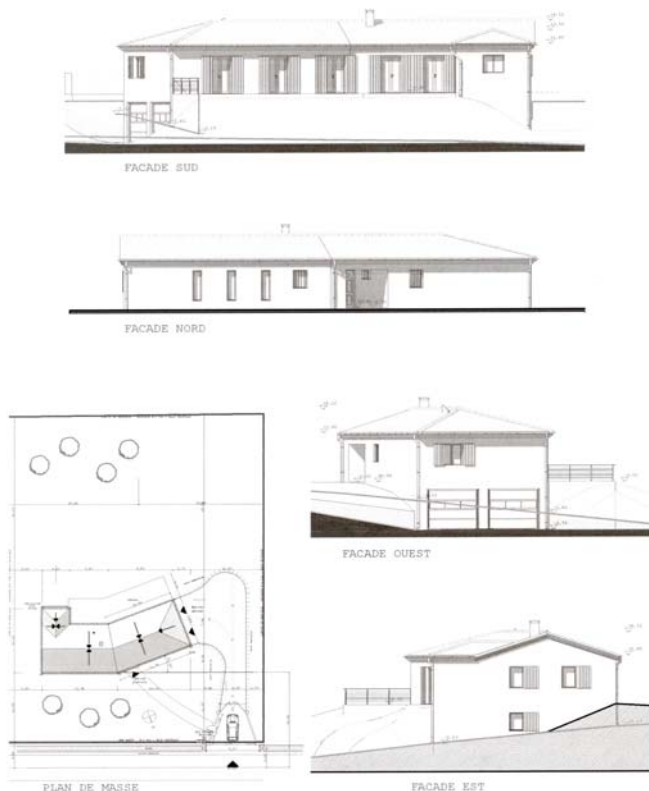


Figure 1 : plans architecturaux

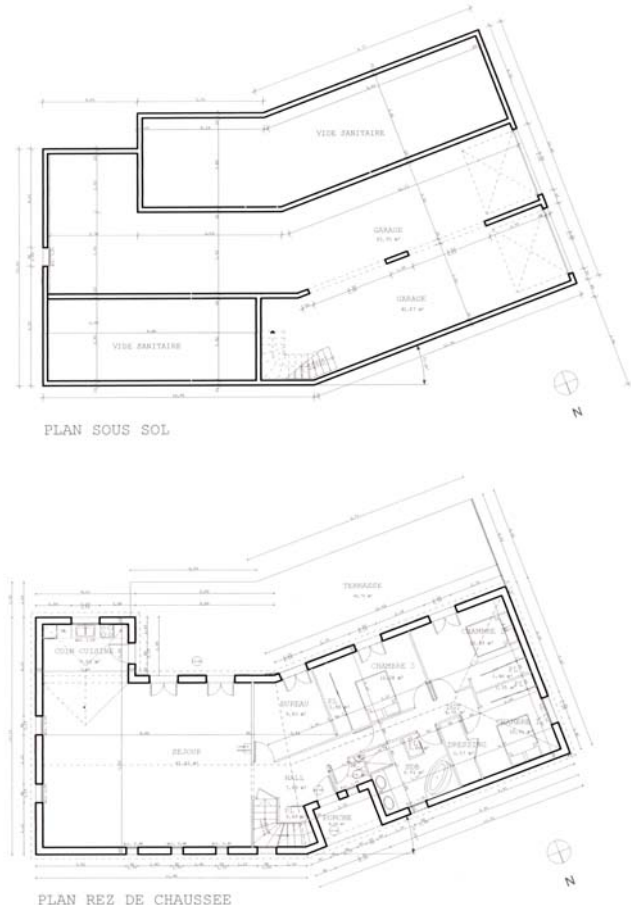


Figure 3 : Logiciel de bilan thermique (ATLANTIC)

CIAT Confort et traitement d'air 04/05/00 version 1.01

Chapitre 1 : Le confort

Les principaux facteurs de confort

Diversité des facteurs

Certains auteurs citent plus d'une quinzaine de paramètres susceptibles d'influer sur la perception de confort. La figure suivante énumère les facteurs influents de confort pour l'être humain :

Domaines concernés

Ces facteurs de confort peuvent être diversement liés :

- soit à l'installation de climatisation,
- soit à l'aménagement du local.

Figure 4 : Le confort thermique (Extraits du document CIAT)

3.2.2. Approche matérielle de la PAC (cf. figure 5)
A l'aide de documents multimédia et du système didactique, identifier les différents éléments ainsi que les liaisons énergétiques et informationnelles.

3.2.3. Approche expérimentale
Mise en service du système didactique. Mesurer les températures intérieures et extérieures avant et après la mise en service.

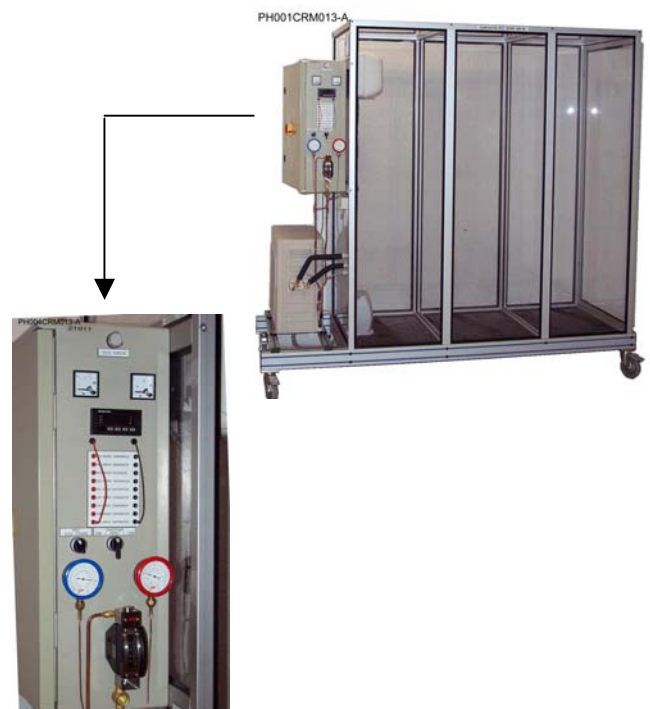


Figure 5 : Système didactique

3.3. Séquence 3 : « Fonctionnement de la Pac – Niveau fluide caloporteur »

Objectifs	- Définir les notions de base nécessaires au fonctionnement de la PAC - Décrire le fonctionnement de la PAC - Définir le diagramme enthalpique
Centres d'intérêts	<u>C.I.1.</u> : Fonctionnalité, architecture et structure d'un système <u>C.I.2.</u> : outil de représentation et schématisation

3.3.1. Notions de base

Acquisition sous forme de cours des notions de base nécessaires à la compréhension des phénomènes thermo-dynamiques (pressions relatives et absolues, vaporisation et condensation d'un fluide...)

3.3.2. Fonctionnement interne d'une PAC

Acquisition sous forme de cours de la structure interne de la PAC (évaporateur, condenseur, compresseur, capillaire, ventilateurs) (cf. figure 8).

A partir d'un exemple, définir et tracer le diagramme enthalpique (cf. figure 7)

3.3.3. Mesurages

Mesurer sur le système didactique les pressions et les températures du fluide (cf. figure 6) et tracer son cycle sur le diagramme enthalpique. En déduire les différentes puissances mises en jeu :

- puissance mécanique du compresseur

$$P_{\text{méca}} (\text{kW}) = \text{débit R410A} (\text{kg/s}) \times W (\text{kJ/kg})$$

$$P_{\text{méca}} (\text{kW}) = \frac{37 (\text{kg/h})}{3600} \times (472 - 426) (\text{kJ/kg}) = 0,472 \text{kW}$$

-puissance frigorifique de l'évaporateur

$$P_{\text{évap}} (\text{kW}) = \text{débit R410A} (\text{kg/s}) \times Q_{\text{évap}} (\text{kJ/kg}) = 1,79 \text{kW}$$

- puissance calorifique du condenseur

$$P_{\text{cond}} (\text{kW}) = \text{débit R410A} (\text{kg/s}) \times Q_{\text{cond}} (\text{kJ/kg}) = 1,81 \text{kW}$$



Figure 6 : Manomètres (DELMO)

Fonctionnement d'une PAC

Une pompe à chaleur utilise les propriétés thermodynamiques d'un fluide frigorigène (ex : R410A). Ce fluide évolue à travers quatre éléments (cf. figure 5) dans lesquels il va changer d'état.

Pour passer de l'état liquide à l'état gazeux (évaporation du fluide), il est nécessaire d'apporter une quantité de chaleur à celui-ci. Dans le cas d'une PAC cette chaleur est prise dans le milieu ambiant (refroidissement de ce milieu)

Pour passer de l'état gazeux à l'état liquide (condensation du fluide), le fluide cède une quantité de chaleur au milieu ambiant (réchauffement de ce milieu).

Les températures d'évaporation et de condensation sont identiques à pression constante (ex : à pression atmosphérique l'eau s'évapore et se condense à 100°C).

Les changements d'état du fluide frigorigène s'effectuent dans des conditions de températures ambiantes différentes, il est donc nécessaire des faire varier la pression du fluide.

En effet, en diminuant la pression, on baisse la température de changement d'état tandis qu'en augmentant la pression on élève cette température (ex : à 0,6 bars l'eau s'évapore à 90 °C et à 2 bars l'eau s'évapore à 120 °C).

Le processus fonctionne en cycle fermé divisé en quatre zones suivant l'état du fluide et sa pression.

En mode chauffage :

L'évaporateur se situe en dehors de l'habitat, le fluide prend de la chaleur au milieu extérieur. Les caractéristiques du fluide frigorigène permettent de récupérer de la chaleur à basse température même négative.

Le condenseur se situe dans l'habitat, le fluide cède de la chaleur au milieu ambiant.

Le compresseur permet d'augmenter la pression entre l'évaporateur et le condenseur.

Le capillaire permet d'abaisser la pression entre le condenseur et l'évaporateur.

En mode climatisation (PAC réversible) :

L'évaporateur est à l'intérieur de l'habitat et le condenseur à l'extérieur.

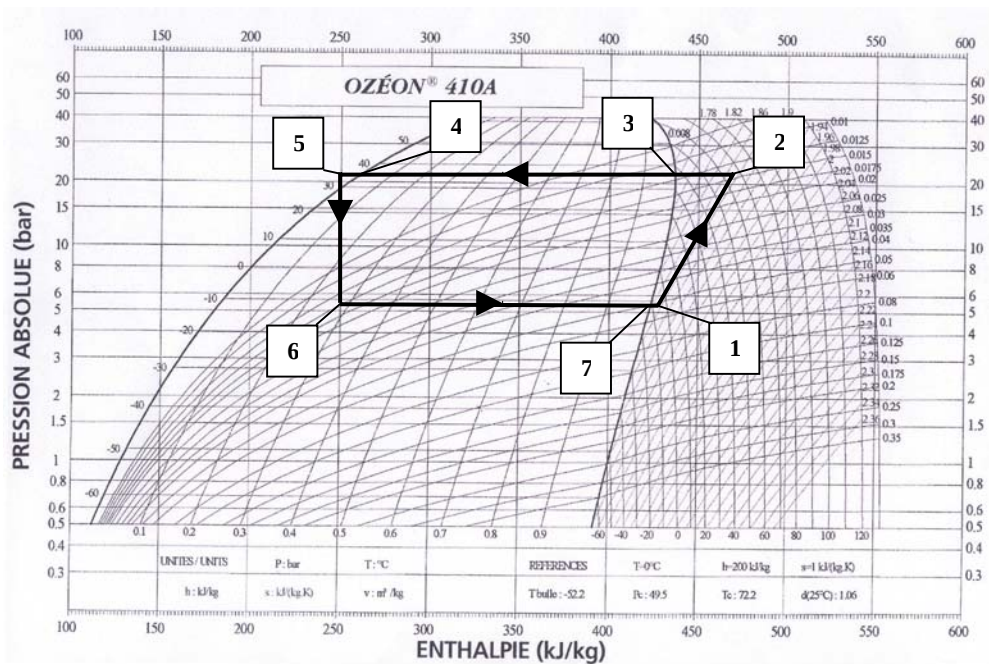


Figure 7 : Diagramme enthalpique du R410A

Le diagramme enthalpique

Ce diagramme permet de représenter et de relier graphiquement les paramètres essentiels d'un fluide : son état (liquide ou vapeur uniquement), sa pression, sa température, son enthalpie. A chaque fluide frigorigène correspond un diagramme enthalpique qui permet de suivre l'évolution (état, P, T°) de ce fluide dans un circuit de pompe à chaleur. Il est l'outil indispensable du technicien frigoriste.

Le diagramme est constitué :

- d'une échelle d'enthalpie (axe des abscisses)
- d'une échelle de pression absolue (axe des ordonnées)
- d'une courbe en « cloche » dite courbe de saturation qui découpe le diagramme en trois zones : liquide, liquide-vapeur et vapeur.

A partir de ce diagramme, on peut tracer le cycle d'évolution du fluide dans la pompe à chaleur et en déduire les différentes quantités de chaleur échangées dans chaque constituant. Ce tracé permet de vérifier (par un technicien) le bon réglage du circuit frigorigène.

Les évolutions élémentaires du fluide frigorigène au cours de son cycle sont :

- 1 à 2 : compression
- 2 à 3 : désurchauffe (diminution de la température dans le tuyau entre le compresseur et le condensateur et à l'entrée du condensateur)
- 3 à 4 : condensation
- 4 à 5 : sous-refroidissement (diminution de la température du liquide en sortie du condensateur)
- 5 à 6 : détente
- 6 à 7 : vaporisation
- 7 à 1 : surchauffe (augmentation de la température en sortie de l'évaporateur et dans le tuyau entre l'évaporateur et le compresseur)

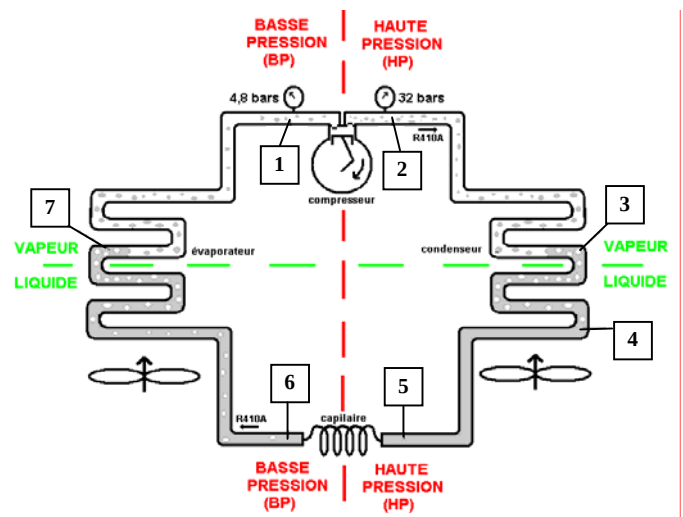


Figure 8 : Schéma de principe

3.4. Séquence 4 : « Action de la PAC dans son contexte »

Objectifs	- Définir les caractéristiques de l'air - Définir le diagramme psychrométrique
Centres d'intérêts	C.1.7. : comportement énergétique des systèmes

3.4.1. Fonctionnement externe d'une PAC

Acquisition sous forme de cours des notions de base nécessaires des différentes caractéristiques de l'air.

A partir d'un exemple, tracer l'évolution de l'air sur le diagramme psychrométrique (cf. figure 9).

Le diagramme psychrométrique

Ce diagramme met en relation toutes les caractéristiques de l'air.

Il est établi à la pression atmosphérique (altitude = 0 m).

Il permet, lors du passage d'un air dans un appareil (condenseur par exemple), de suivre l'évolution des caractéristiques de cet air, et de calculer la puissance calorifique qu'il cède ou qu'il reçoit.

Le diagramme est constitué :

- d'une échelle des températures (axe des abscisses)
- d'une échelle de teneur en eau (axe des ordonnées)
- d'une échelle des enthalpies
- d'une courbe de saturation qui découpe le diagramme en deux zones : la zone utile où l'eau dans l'air est à l'état de vapeur (HR < 100%) et la zone de brouillard où l'eau est à l'état liquide (HR ≥ 100%).

A partir des relevés des températures et des degrés d'hygrométrie de l'air entrant et sortant de l'unité intérieure, on peut tracer le cycle d'évolution des caractéristiques de l'air sur le diagramme psychrométrique. On en déduit la puissance calorifique de la PAC.

3.4.2. Mesurages

Mesurer les caractéristiques de l'air sur le système didactique en fonctionnement (température, humidité et vitesse) (cf. figures 10 et 11), et tracer le diagramme psychrométrique.

Mesures :

Section de passage d'air soufflé (S_p) : 70 cm x 5 cm

Vitesse d'air soufflé (V) : 4 m/s

Enthalpie entrée (h_e) : 26 kJ/kg

Enthalpie sortie (h_s) : 39 kJ/kg

Volume spécifique (V_s) : 0,862 m³/kg

Puissance électrique absorbée (P_{elec}) : 840W

Calcul du débit volumique :

$$Q_{V(m^3/s)} = V \times S_p = 0,14 m^3 / s$$

Calcul de la puissance calorifique :

$$P_{Calorique(kW)} = \frac{Q_v \times (h_s - h_e)}{V_s} = 2,12 kW$$

Calcul du coefficient de performance (COP) :

$$\varepsilon = \frac{P_{calorique}}{P_{elec}} = 2,53$$

Comparer avec les données du constructeur.

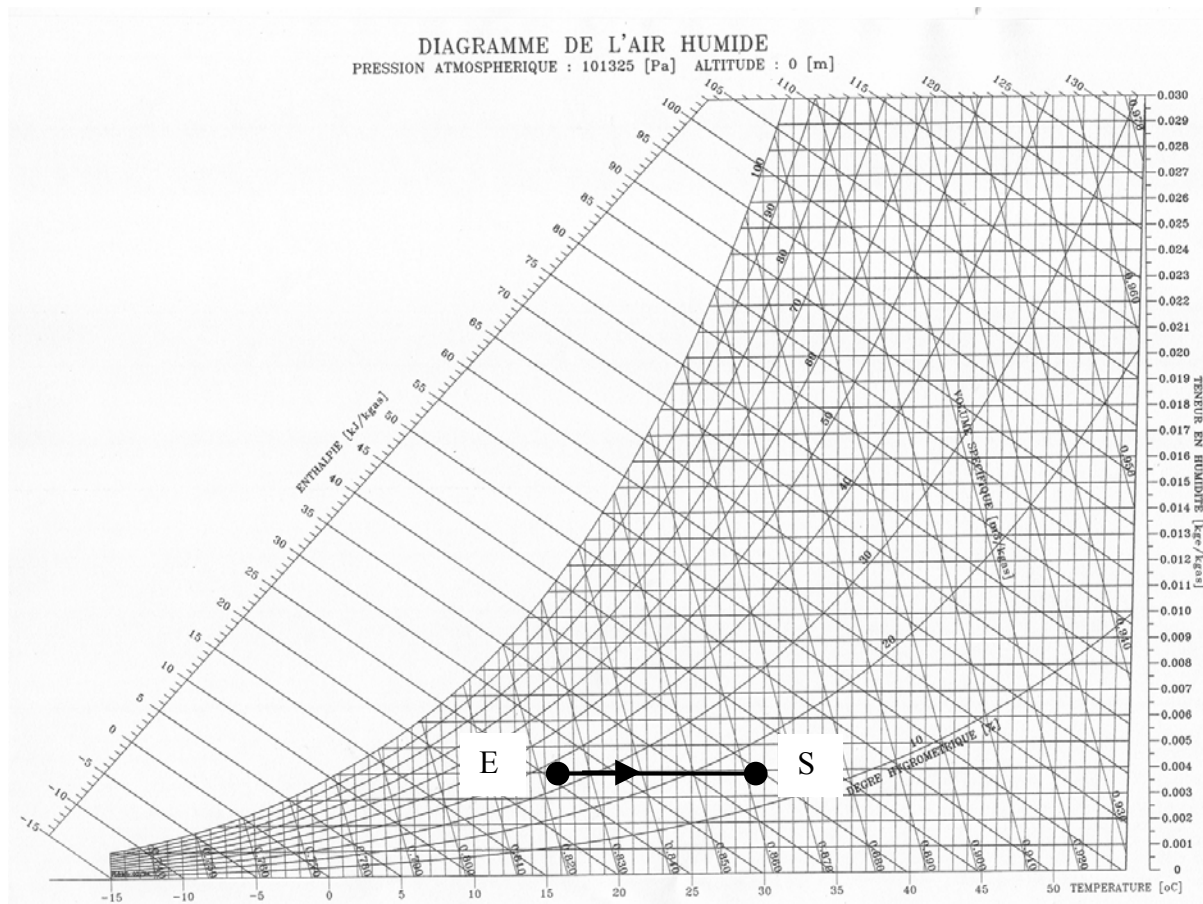


Figure 9 : Diagramme psychrométrique



Mesure de la température (KIMO HD100)

Mesure de la vitesse de l'air (KIMO VT200)

Figure 10: Mesures des caractéristiques de l'air



Figure 11: Mesure de la puissance électrique absorbée (PM-EXF100)

Remarques :

- En climatisation, on parle d'Energy Efficiency Rating ($EER = \frac{P_{\text{Frigorifique}}}{P_{\text{élec}}}$) pour définir les performances du climatiseur.
- Une PAC réversible présente un meilleur coefficient de performance en chaud qu'en climatisation

3.5. Séquence 5 : « Dimensionnement de la PAC »

Objectifs	- Choisir la PAC et ses accessoires
Centres d'intérêts	<u>C.I.3.</u> : alimentation en énergie d'un système <u>C.I.5.</u> : distribuer l'énergie en protégeant les biens et les personnes

3.5.1. Choix des unités de la PAC

A partir du bilan thermique (cf. séquence 1), choisir les différentes unités composant la PAC, en utilisant les catalogues constructeurs (Atlantic, Toshiba, Fujitsu...).

3.5.2. Dimensionnement des accessoires

Réaliser le métrage et le dimensionnement des liaisons frigorigènes et aérauliques.
Dimensionner les protections électriques.

3.6. Séquence 6 : « Comportement de la PAC »

Objectifs	- Analyser le comportement du système
Centres d'intérêts	<u>C.I.8.</u> : pilotage, contrôle et comportement des systèmes

Observer et analyser l'évolution de la température du « local » (sur le système didactique), en fonction des changements de consignes et des perturbations.

3.7. Séquence 7 : « Comparaison avec différents moyens de chauffage »

Objectifs	- Réaliser un bilan financier de l'installation de la PAC - Comparer avec d'autres modes de chauffage
Centres d'intérêts	

3.7.1. Réaliser le bilan financier pour la PAC

A partir du besoin énergétique, calculer le prix de revient de l'installation :

- coût du matériel (chez différents distributeurs)
- coût de la pose (à l'aide de Batiprix^{[3][4]})
- aides de l'état^[5]

Déterminer le besoin en énergie calorique annuel.

$$B_{wh/an} = 24_h \times \text{Déperditions}_{W/^{\circ}C} \times \Sigma \Delta T \times N$$

- les déperditions ont été calculées lors du bilan thermique (cf. séquence 1).
- $\Delta T = T_{\text{intérieure de confort}} - T_{\text{extérieure}}$. Or pendant la période de chauffe, la température extérieure varie. Les données météo d'une région définissent $\Sigma \Delta T$ qui unifie ces variations.
- N: Coefficient tenant compte de l'occupation et des apports gratuits

3.7.2. Réaliser une étude comparée

Le besoin énergétique est égal au besoin en énergie calorique divisé par le rendement du système de chauffage.

Energies	Rendement Chaudière
Electrique	1
PAC	2 à 3
Chaudières à bois (bûches)	0,75
Chaudières à bois (granulés)	0,9
Fioul (Haut Rendement)	0,9
Propane (Haut rendement)	0,9
Propane (Condensation)	1,1
Gaz Naturel (Haut rendement)	0,9
Gaz Naturel (Condensation)	1,1
Solaire appoint électrique	1,3 à 1,5
Solaire appoint bois	0,82 à 0,88

A partir des données précédentes, calculer le retour sur investissement de la PAC par rapport au chauffage tout électrique, gaz et fuel. Le coût de la maintenance devra être pris en compte.

3.7.3. Impact sur l'environnement

Classer les différents modes de chauffage suivant leur impact sur l'environnement, après avoir ramené leurs besoins en énergie primaire en équivalent pétrole.

Conversion en tonne équivalent pétrole

1 Mtep : Million de tonnes équivalent pétrole, unité de mesure permettant de comparer les différentes énergies entre elles, il s'agit de l'énergie produite par la combustion d'une tonne de pétrole.

1 tonne de pétrole = 1,000 tep

1 tonne de charbon = 0,619 tep

1 tonne de charbon pauvre = 0,405 tep

1 tonne de bois = 0,300 tep (environ)

1 tonne de gaz butane ou propane = 1,095 tep

1 Mwh d'électricité = 0,086 tep (énergie finale)

1 Mwh d'électricité = 0,222 tep (énergie primaire)

1 Mwh de gaz naturel = 0,077 tep

1 000 litres de fuel lourd = 0,950 tep

4. Conclusion

4.1. Genèse du projet pédagogique

Le lycée technologique Charles de Gaulle de Muret est singulier par le fait qu'il possède uniquement les filières S.T.I. Génie Energétique et Génie Electrotechnique. Il a donc été naturel pour les équipes pédagogiques enseignant en secondes I.S.P., d'orienter l'enseignement sous forme de projets ayant la coloration de ces filières.

Les élèves travaillent sur un projet électrotechnique (soit domestique, soit industriel) et sur un projet énergétique. Pour ce dernier, le thème choisi est l'installation d'une pompe à chaleur d'une villa.

L'organisation des séquences pédagogiques a été réfléchi afin de permettre aux élèves de choisir une installation de pompe à chaleur sans aucun pré-requis.

4.2. Retour d'expérience

Pour des raisons de mise en œuvre (dimensions, déplacement du système...), de temps d'inertie et d'accessibilité des mesures, le type de PAC choisi est Air/Air.

Il est difficile d'utiliser la PAC en mode chauffage, car la température ambiante des laboratoires est déjà à sa valeur de confort (parfois supérieure). La PAC est donc utilisée en mode climatisation.

Pour une meilleure compréhension du fonctionnement de la PAC par les élèves, il est nécessaire d'apporter des notions de physique (changements d'états, utilisations des différents diagrammes...). En constatation, le temps passé en cours est bien plus important que celui passé en travaux pratiques. Dans le cadre de la formation en S.T.I. Electrotechnique, il serait donc intéressant que ces notions soient traitées par l'enseignement de physique appliquée.

Pour nos élèves de secondes, certains éléments théoriques (les différents diagrammes...) sont difficilement compréhensibles. Dans notre démarche pédagogique, ces éléments ne sont utilisés que pour illustrer le fonctionnement de la PAC.

Nous constatons que nos élèves ont porté énormément d'intérêt à la découverte du fonctionnement de la PAC. En effet, c'est un système d'actualité répondant à la politique du développement durable à laquelle les élèves sont de plus en plus sensibilisés. De plus, le processus de fonctionnement qu'ils ont découvert, fait partie de leur environnement sous forme de PAC, de climatisateur et de réfrigérateur.

Notre système didactique permet d'observer, de ressentir et de mesurer rapidement les différents phénomènes thermodynamiques.

4.3. Conclusion

Ce projet peut-être traité à des niveaux de formations différents. Dans le cadre de notre expérimentation en secondes, nous avons abordé des notions complexes en ayant des exigences de connaissances assez faibles (l'élève est intéressé au génie thermique). Pour les niveaux STI et STS, le degré taxonomique sera supérieur (l'élève doit appréhender le fonctionnement d'une PAC).

Références

- [1] : Définitions des centres d'intérêts www.iufmreselec.cict.fr/catalogue/2004/Toulouse/CIstOrens/CI.shtml
- [2] : Photographies fournies par JARLAN Génie climatique Z.A. le Rival 82130 Lafrançaise
- [3] : Batiprix (édition Groupe Moniteur)
- [4] : BATIPRIX : www.batiprix.com
- [5] : www.industrie.gouv.fr/energie/developp/econo/textes/mesures-ee.htm

Webographie

- Didatec : www.didatec-technologie.com/
- Ciat : www.ciat.fr
- Altantic www.atlantic-climatisation.com

Amélioration de l'efficacité énergétique d'un système d'éclairage.

Daniel SCANDELLA⁽¹⁾, Marc FABRE⁽²⁾, Mustapha LABRAGA⁽²⁾, Philippe RODIER⁽³⁾

daniel.scandella@orange.fr; Lycée Jolimont (TOULOUSE)

marc_fabre@voila.fr, m.labraga@voila.fr; Lycée Pierre Paul RIQUET (SAINT-ORENS DE GAMEVILLE)

philippe.rodier@toulouse.iufm.fr; IUFM (TOULOUSE)

Résumé : Suite aux accords de Rio et de Kyoto du 16 février 2005 qui fixent des objectifs de limitation de gaz à effet de serre, la France s'est engagée à réduire la consommation d'énergie des bâtiments. De plus l'éclairage a été identifié par l'Union Européenne comme un gisement important d'économies d'énergie.

Les pratiques pédagogiques autour de l'éclairagisme conservent donc tout leur intérêt et doivent être envisagées avec un recentrage accru sur la problématique de l'efficacité énergétique et la prise en compte des dimensions économique et environnementale.

La réflexion développée dans cet article permet de faire le lien entre la fonction "convertir l'énergie" du programme STI Génie Electrotechnique existant et le concept d' "efficacité énergétique".

1. Problématique de l'éclairage

1.1. Eclairage et contexte énergétique

L'énergie électrique consommée en France pour l'éclairage représente environ 10% de la production totale nationale soit 42 TWh/an.

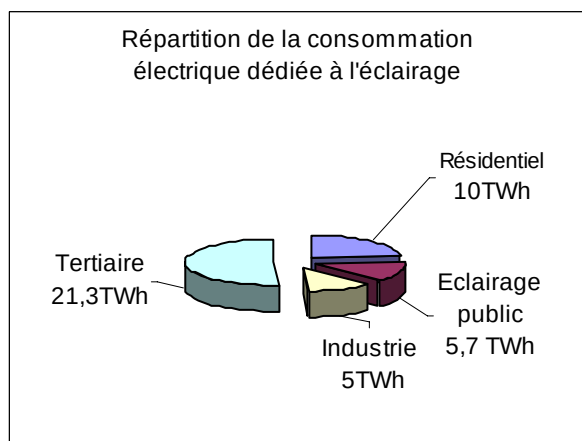


Figure 1 : répartition de la consommation d'énergie électrique dédiée à l'éclairage.

Certaines études menées par l'Union Européenne, montrent que l'éclairage est un gisement important d'économies d'énergie; Pour certaines branches d'activités du secteur tertiaire, l'énergie électrique consommée pour l'éclairage peut représenter plus de 50% de la facture énergétique.

La directive 2000/55/EC du 18/09/2000 impose des exigences de rendement énergétique pour

les ballasts des tubes fluorescents. L'arrêté du 24 mai 2006 relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments (Réglementation thermique RT 2005) fixe les limitations de consommation des systèmes d'éclairage en fonction de la destination des locaux.

Lieux d'activités	Puissance par unité de surface
Établissements sanitaires avec ou sans hébergement, Hôtellerie avec restauration, Commerces et bureaux, Enseignement, Industrie, Salle de spectacle, de conférence, Locaux non mentionnés dans une autre catégorie.	12W/m ²
Établissements sportifs, Stockage, Transport	10W/m ²
Local demandant un éclairage à maintenir de plus de 600 lx.	2,5 W/m ² pour 100 lux avec une limite supérieure de 25W/m ²

Tableau 1 : Seuils de consommation à ne pas dépasser, pour l'éclairage, définis par l'arrêté ministériel en date du 24 mai 2006.

Il nous semble donc important de ne pas négliger l'éclairage dans nos enseignements comme contenu de formation et thème de sensibilisation aux enjeux énergétiques.

1.2. Quel est le but de l'éclairage ?

La qualité de l'éclairage intérieur inclut le confort des occupants, l'économie et l'environnement [1].

Un avant-projet d'éclairage devra donc être mené de façon à assurer le confort visuel et ergonomique tout en limitant les consommations d'énergie électrique.

1.3. Exigences normatives et réglementaires

Du point de vue du confort visuel, pour une salle d'enseignement destinée aux adultes, la norme NF EN 12464-1 impose :

- un éclairement moyen : 500 lux dans la zone de travail; 300 lux dans la zone environnante immédiate.
- un indice de rendu des couleurs : > 80
- un taux d'éblouissement (UGR) : < 19
- un coefficient d'uniformité : $> 0,7$ dans la zone de travail. Ce coefficient ne doit pas être inférieur à 0,5 dans les zones environnantes.

(NB : Si les emplacements et les dimensions des bureaux ou tables sont connus de façon précise, la zone environnante est une bande de 0,5 à 0,7 m entourant la zone de travail).

L'arrêté du 24 mai 2006 stipule que la puissance installée ne doit pas dépasser 12W/m^2 .

1.4. Critères de choix du système d'éclairage

Un système d'éclairage comprend les sources de lumière (lampes), l'équipement électrique (appareillage, ballast), les luminaires et les auxiliaires de gestion (horloges, détecteurs de présence, gradateurs).

Ces éléments constituent un tout indissociable et doivent être choisis de manière optimale.

• Les sources de lumière

Dans le cadre d'une salle d'enseignement le respect de la réglementation contraint à l'emploi de tubes fluorescents à efficacité lumineuse élevée associés à des ballasts électroniques [2].

On utilisera donc de préférence des tubes T8 ($\varnothing 26$ mm) à haut rendement ou des tubes T5 ($\varnothing 16$ mm).

La température de couleur conseillée pour une ambiance confortable sera de 4000K (diagramme de Kruithof).

La référence des tubes à utiliser sera : xxW/840.

• Les ballasts

Les ballasts ferromagnétiques font l'objet d'une interdiction progressive par la réglementation au profit des ballasts électroniques [3]. Ceux-ci permettent de réduire les pertes énergétiques et d'augmenter la durée de vie des tubes.

• Les luminaires

Les luminaires associés aux tubes seront essentiellement des encastrés ou des plafonniers à haut rendement. Ils doivent comporter des optiques performantes qui réduisent l'éblouissement.

2. Intentions pédagogiques

Objectifs pédagogiques :

- Evaluer la conformité d'une installation à rénover par rapport aux réglementations et aux exigences normatives.
- Proposer des solutions (pertinentes) si nécessaire.
- Effectuer des bilans comparés des solutions du point de vue énergétique et environnemental.

Cette démarche peut s'intégrer dans une pédagogie par centres d'intérêts. Le centre d'intérêt concerné pourrait s'intituler : "Conversion d'énergie et Efficacité énergétique".

3. Présentation du support

- Activité : Enseignement.
- Hauteur du plafond : 2,90m
- Dimensions : 10m x 7m
- Couleurs des surfaces :
 - murs et plafond : blanc mat
 - sol : gris clair



Photo de la salle de classe

4. Performances énergétiques et photométriques du système d'éclairage de la salle.

Le tableau suivant permet de synthétiser les informations nécessaires à l'évaluation des performances de la salle.

Caractérisation du lieu	
Mesure du niveau d'éclairement moyen sur le plan de travail par maillage.	610 lx
Surface du local	70 m ²
Hauteur plafond	2,9 m
Taux de réflexion estimé pour le sol, le plafond et les murs.	20%, 70%, 50%
Caractérisation des luminaires	
Type de luminaire	OSRAM DEDRA VATS 4L18C
Symbole photométrique	0,58 C
Nombre de luminaires	15
Caractérisation des sources	
Type de tube	840
Nombre de sources par luminaire	4
Puissance d'une source	18 W
Flux total	4 x 1350 lm
Ballasts ferromagnétiques	4 x 5 = 20 W

Performances photométriques	
Niveau d'éclairement moyen	610 lx
Facteur d'uniformité	0,65
Performances énergétiques	
Puissance totale installée	1380 W
Puissance installée spécifique en W/m ² /100lx	$((1380/70)/610) * 100 =$ 3,2 W/m²/100lx

Les performances photométriques du système d'éclairage sont conformes à la réglementation (voir paragraphe 1.3).

La puissance installée (1380 W) est supérieure à l'exigence de l'arrêté du 24/05/2006 qui est de 840 W pour notre salle.

5. Solutions techniques permettant d'améliorer l'efficacité énergétique.

- Remplacer les ballasts ferromagnétiques par des ballasts électroniques.
- Agir sur l'utilance et plus particulièrement sur le facteur de réflexion des parois.
- Remplacer les sources et les luminaires par des produits plus performants.
- Gérer le niveau d'éclairement en fonction de l'occupation du local (détection de présence) et des apports de lumière extérieure.

La gestion du niveau d'éclairement mise à part, l'impact de chacune des solutions techniques proposées a été mis en évidence à l'aide du logiciel DIALux (DIALux 4.4). www.dial.de

6. Evaluation de l'impact énergétique des solutions retenues

Solution n° 1 : (cf compte rendu de simulation n° 1)

On remplace les ballasts ferromagnétiques par des ballasts électroniques à haut rendement.

Cas n° 1 : Luminaires existants avec ballasts ferromagnétiques.

Référence : **OSRAM DEDRA VATS 4L18C**

Cas n° 2 : Luminaires identiques mais avec ballasts électroniques.

Référence : **OSRAM DEDRA VATS 4L18 HF**

	Emoy (lx)	Puissance totale (W)	Puissance (W/m ² /100lx)
Cas n°1	639	1380	3,08
Cas n°2	640	1155	2,56

Pour un même service rendu (même niveau d'éclairement), bien que la puissance installée ait été réduite de 225W, elle reste supérieure aux exigences de l'arrêté du 24/05/2006.

Solution n° 2 : (cf compte rendu de simulation n° 2)

On agit sur l'utilance de la salle en modifiant les facteurs de réflexion des parois. (Remplacer, par exemple, une peinture ancienne par une peinture brillante et claire pour les murs et les plafonds).

Cas n° 1 : Type de luminaires :

Référence : **OSRAM DEDRA VATS 4L18C**

Facteurs de réflexion : 20%, 70%, 50%

Cas n° 2 : Type de luminaires :

Référence : **OSRAM DEDRA VATS 4L18C**

Facteurs de réflexion : 20%, 80%, 70%

	Emoy (lx)	Emin / Emoy ⁽¹⁾	Puissance (W/m ² /100lx)
Cas n° 1	639	0,65	3,08
Cas n° 2	694	0,68	2,84

(1) Le coefficient Emin/Emoy traduit l'uniformité de l'éclairement

La puissance spécifique a bien diminué mais la puissance absorbée pour l'éclairage de la salle n'a pas été modifiée.

Compte tenu de l'augmentation de l'éclairement, on pourrait être tenté de diminuer le flux lumineux émis : réduire le nombre de sources ou moduler la quantité de lumière émise.

Ces deux solutions ne sont pas économiquement réalistes puisqu'elles nécessitent respectivement le changement des luminaires et le remplacement des ballasts par des appareils dimmables.

Toutefois, pour un même équipement, l'influence des facteurs de réflexion des parois est réelle. Il faut donc être vigilant sur l'environnement des luminaires (la couleur des murs, l'agencement du mobilier, la décoration...).

Solution n° 3 : (cf compte rendu de simulation n°3)

On remplace le couple source et luminaire par des appareils techniquement plus performants.

Cas n° 1 : Type de luminaire (configuration d'origine)

Référence : **OSRAM DEDRA VATS 4L18C**

Symbole photométrique : **0,58C**

Flux total : **5400 lm**

Puissance totale: **92 W**

Cas n° 2 Type de luminaire

Référence: **PHILIPS IMPALA TBS160**

4XTL6-D18W 840 HF C6

Symbole photométrique : **0,66B**

Flux total : **5400 lm**

Puissance totale : **69,5 W**

Cas n° 3 : Type de luminaire

Référence : **PHILIPS INDOLIGHT TBS330**

4XTL5-D14W 840 HF C6-H

Symbole photométrique : **0,84B**

Flux total : **4800 lm**

Puissance totale : **63 W**

	Emoy (lx)	Emin/ Emoy ⁽¹⁾	Puissance (W/m ² /100lx)
Cas n° 1	639	0,65	3,08
Cas n° 2	594	0,75	2,01
Cas n° 3	694	0,66	1,56

(1) Le coefficient Emin/Emoy traduit l'uniformité de l'éclairement

	Nombre de luminaires	Puissance totale W	Prix HT ⁽¹⁾
Cas n° 1	15	1380	40,80
Cas n° 2	12	834	115
Cas n° 3	12	756	170

(1) Prix unitaire hors taxe du luminaire avec les sources

Le fait d'investir sur des luminaires à haut rendement permet d'être en conformité avec la réglementation, la puissance consommée étant réduite d'environ 40%. Cependant l'investissement nécessaire n'est pas négligeable.

7. Analyse comparative des solutions retenues

La solution n° 2 n'a pas été retenue pour ce comparatif ; L'amélioration de la puissance spécifique est due à l'augmentation de l'éclairage, la puissance consommée n'ayant pas changé.

Cette solution sera mise en oeuvre en phase de conception ou de re-conception du système complet d'éclairage.

Trois critères de comparaison ont été retenus pour leur pertinence :

- Consommation énergétique
- Impact sur l'environnement
- Coût et retour sur investissement

7.1. Comparaison basée sur la consommation d'énergie

Type de modification	Existant	Changer les ballasts	Changer les luminaires
Solution et Cas étudié	Cas n°1	Solution 1 Cas n°2	Solution 3 Cas n°3
Puissance spécifique (W/m²/100lx)	3,08	2,56	1,56
Puissance totale installée (W)	1380	1155	756
Durée d'utilisation ⁽¹⁾ (h)	20000	20000	20000
Energie consommée (kWh)	27600	23100	15120
Energie économisée (kWh)	0	4500	12480
Gain énergétique (%)	0%	16,5%	45%

(1) La durée de 20000h a été retenue car c'est la durée de vie économique des sources les plus performantes utilisées dans la solution n° 3.

La solution technique n° 3 (remplacement complet des luminaires et des sources existantes par des appareils plus performants) permet de réduire la consommation énergétique d'environ 45%, pour un même service rendu.

7.2. Comparaison basée sur l'impact environnemental avec émission de CO2 et recyclage.

BILAN CARBONE			
Type de modification	Existant	Changer les ballasts	Changer les luminaires
Solution et Cas étudié	Cas n°1	Solution 1 Cas n° 2	Solution 3 Cas n°3
Puissance totale installée (W)	1380	1155	756
Energie consommée ⁽¹⁾ (kWh)	27600	23100	15120
Quantité de CO ₂ produit ⁽²⁾ (Kg)	2760	2310	1512
Quantité de CO ₂ évité (Kg)	0	390	1188
Gain en CO ₂ (%)	0%	16,5%	45%
Distance (Km) parcourue pour la même quantité de CO ₂ produit ⁽³⁾	23000	19250	12600

(1) La durée de 20000h a été retenue car c'est la durée de vie économique des sources les plus performantes utilisées dans la solution n° 3.

(2) 100gr/kWhelec représente la quantité de CO₂ généré par le système de production d'énergie pour produire 1 kWh d'énergie électrique destiné à l'éclairage. (Source EDF et ADEME).

(3) 120gr/Km : Seuil de CO₂, produit par kilomètre pour une voiture de classe moyenne, ouvrant droit à la prime environnementale définie dans le cadre du Grenelle de l'environnement.

La solution n° 3 entraîne une réduction significative de la quantité de gaz à effet de serre (CO₂) par rapport au système existant. De plus elle permet de limiter le nombre d'opérations de maintenance (changement de tubes) ainsi que les frais de recyclage des tubes.

Remarque : Le mercure contenu dans les nouvelles lampes fluorescentes demeure le principal polluant du point de vue de l'environnement..

C'est pourquoi les tubes fluorescents ainsi que les lampes fluo compactes sont concernés par la Directive

européenne relative aux déchets dangereux qui a été transposée en France par un décret du 15 mai 1997. De ce fait depuis le 1^{er} janvier 1998, les professionnels et les détenteurs finaux des tubes ont obligation de faire collecter et recycler les tubes usagés par des organismes spécialisés. Cette obligation entraîne un coût de 0,2 € HT par tube.

7.3. Coût global hors main-d'oeuvre et maintenance

Type de modification	Existant	Changer les ballasts	Changer les Luminaires
Solution et Cas étudié	Cas n°1	Solution 1 Cas n°2	Solution 3 Cas n° 3
Puissance totale installée (W)	1380	1155	756
Energie consommée ⁽¹⁾ (kWh)	27600	23100	15120
Coût énergétique ⁽²⁾ (€)	3312	2772	1814
Coût du matériel ⁽³⁾ (€)	15x40,8 612	15x64,8 972	12x170 2040
Coût total ⁽⁴⁾ (€)	3924	3744	3854

(1) Energie consommée pour 20000h d'utilisation

(2) Prix moyen du kW/h : 0,12€

(3) Prix HT

(4) Coût total en euros pour 20000h d'utilisation

(comprend l'investissement en matériel et l'exploitation hors coût de renouvellement des tubes)

Les solutions 2 et 3, explorées dans notre étude ont des coûts globaux (investissement + exploitation) similaires.

8. Conclusions de l'étude

Rénover une installation d'éclairage afin de la rendre compatible avec les exigences réglementaires et normatives actuelles conduit à faire appel à du matériel performant en termes d'efficacité lumineuse et énergétique.

Ceci implique des choix techniques :

- tubes fluorescents à haute efficacité lumineuse (> 80 lm/W)
- ballasts électroniques :
 - qui portent la durée de vie des tubes de 10000h à 20000h,

- qui consomment moins que les ballasts ferromagnétiques,
- qui réduisent les apports thermiques dans les locaux climatisés,
- qui constituent le premier élément de la chaîne de gestion du niveau d'éclairage.

- luminaires à haut rendement et de type direct, qui permettent de restituer une plus grande quantité de lumière entraînant ainsi une diminution du nombre de sources.

Il est à noter que l'étude d'éclairage doit également tenir compte des caractéristiques subjectives du local à éclairer influant sur son utilance (couleur des parois, décoration, agencement du mobilier ...).

Le remplacement intégral des appareils d'éclairage existants par des modèles plus performants (solution n°3), représente un investissement conséquent en matériel. Cependant, cet investissement sera assez rapidement amorti car il entraîne une réduction de la consommation énergétique, des coûts de maintenance, de collecte et de recyclage. C'est également l'occasion d'améliorer le confort visuel et le bien-être des utilisateurs.

Une possibilité supplémentaire pour réduire encore la facture d'énergie est la mise en œuvre de systèmes de gestion de l'éclairage.

9. Contexte pédagogique

L'étude présentée ici peut constituer le cadre d'une action pédagogique venant en complément d'une séquence de formation à l'éclairagisme privilégiant une démarche inductive :

- mise en évidence par des manipulations, des critères de choix des sources qui contribuent au confort visuel (IRC, Température des couleurs, Flux lumineux...),
- validation des performances énergétiques et lumineuses par des mesurages (puissance, énergie ...),

Elle s'intégrerait dans un centre d'intérêt « conversion d'énergie et efficacité énergétique » qui pourrait être développé en fin de Première ou début de Terminale STI Génie Electrique.

Le concept d'« efficacité énergétique » devient en effet indissociable de la conversion d'énergie. Il permet de sensibiliser les apprenants aux enjeux énergétiques et à l'impact environnemental de l'utilisation de l'énergie tout en contribuant à l'éducation à l'éco citoyen.

Bibliographie

[1] **LUX** : La revue de l'éclairage n° 228 Mai/Juin 2004

« Les normes européennes de l'éclairage »

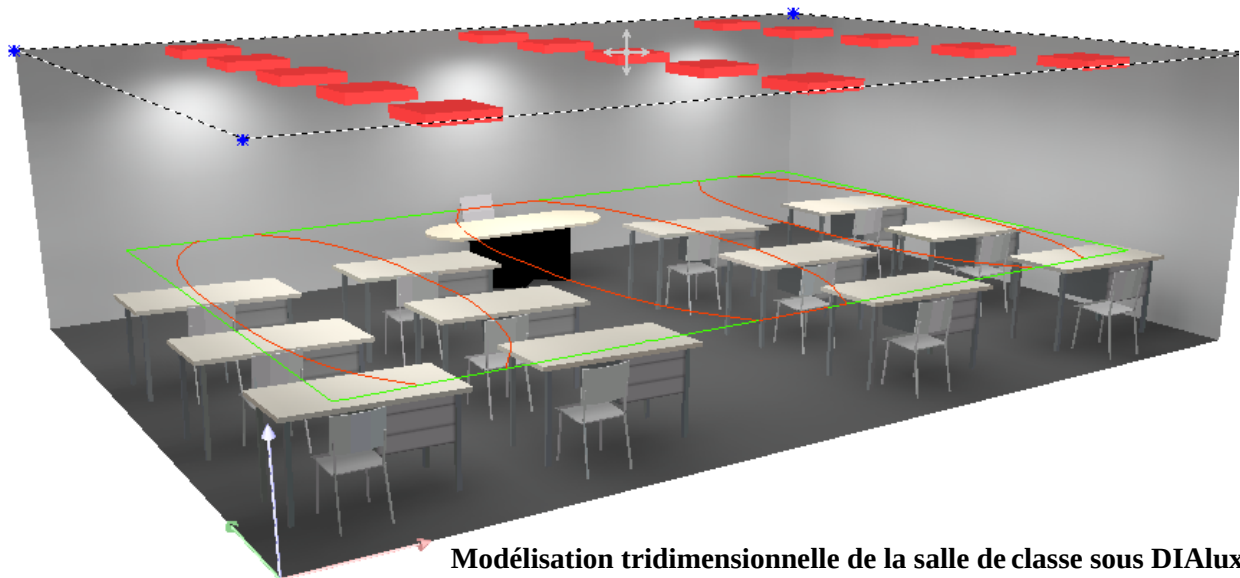
[2] **SYNDICAT DE L'ECLAIRAGE** :

« Bureaux, écoles, mieux s'éclairer à coûts maîtrisés » www.syndicat-eclairage.com

[3] **CELMA** Federation of National Manufacturers for Luminaires and Electrotechnical Components for Luminaires in the European Union : Guide for the application of Directive 2000/55/EC on energy efficiency requirements for ballast for fluorescent lighting www.celma.org

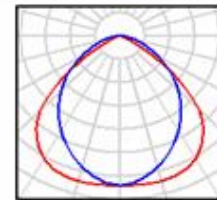
AFE: Association française de l'éclairage, www.afe-eclairage.com.fr

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, www.ademe.fr

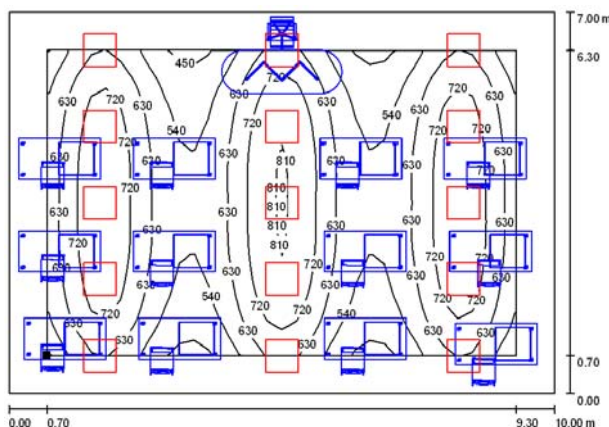


Modélisation tridimensionnelle de la salle de classe sous DIALux

OSRAM SASU DEDRA VATS 4L18 C DEDRA VATS 4L18 C
Article n°: DEDRA VATS 4L18 C
Flux lumineux de(s) lampe(s): 5400 lm
Puissance par luminaire: 92.0 W
Classification des luminaires par UTE: 0.58C
CIE Flux Code: 59 92 99 100 58
Composants: 4 x L18/840-830-827 (Facteur de correction 1.000).



Caractéristiques des sources et des luminaires



Hauteur de la pièce: 2.900 m, Hauteur de montage: 2.900 m, Facteur d'entretien: 0.90

Valeurs en Lux, Echelle 1:90

Surface	ρ [%]	E_{moy} [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	$E_{\text{min}} / E_{\text{moy}}$
Plan utile	/	639	417	831	0.65
Sol	20	363	77	645	0.21
Plafond	70	125	88	153	0.70
Murs (4)	50	226	67	685	/

Plan utile:
Hauteur: 0.900 m
Trame: 32 x 32 Points
Zone périphérique: 0.700 m

Liste de luminaires

N°	qté.	Désignation (Facteur de correction)	Φ [lm]	P [W]
1	15	OSRAM SASU DEDRA VATS 4L18 C DEDRA VATS 4L18 C (1.000)	5400	92.0
Total:			81000	1380.0

Puissance installée spécifique: 19.71 W/m² = 3.08 W/m²/100 lx (Surface au sol: 70.00 m²)

Courbes isolux et compte rendu de simulation sous DIALux

Compte rendu simulation n°1 (DIALux)**Cas n°1: Ballast ferromagnétique:**

Hauteur de la pièce: 2.900 m, Hauteur de montage: 2.900 m, Facteur d'entretien: 0.90						Valeurs en Lux, Echelle 1:90
Surface	ρ [%]	E_{moy} [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	$E_{\text{min}} / E_{\text{moy}}$	
Plan utile	/	639	417	831	0.65	
Sol	20	363	77	645	0.21	
Plafond	70	125	88	153	0.70	
Murs (4)	50	226	67	685	/	
Plan utile: Hauteur: 0.900 m Trame: 32 x 32 Points Zone périphérique: 0.700 m						
Liste de luminaires						
N°	qté.	Désignation (Facteur de correction)	Φ [lm]	P [W]		
1	15	OSRAM SASU DEDRA VATS 4L18 C DEDRA VATS 4L18 C (1.000)	5400	92.0		
				Total:	81000	1380.0
Puissance installée spécifique: 19.71 W/m² = 3.08 W/m²/100 lx (Surface au sol: 70.00 m²)						

Compte rendu simulation n°2 (DIALux)**Cas n°1: Facteurs de réflexion 20%, 50%, 70%:**

Hauteur de la pièce: 2.900 m, Hauteur de montage: 2.900 m, Facteur d'entretien: 0.90						Valeurs en Lux, Echelle 1:90
Surface	ρ [%]	E_{moy} [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	$E_{\text{min}} / E_{\text{moy}}$	
Plan utile	/	639	417	831	0.65	
Sol	20	363	77	645	0.21	
Plafond	70	125	88	153	0.70	
Murs (4)	50	226	67	685	/	
Plan utile: Hauteur: 0.900 m Trame: 32 x 32 Points Zone périphérique: 0.700 m						
Liste de luminaires						
N°	qté.	Désignation (Facteur de correction)	Φ [lm]	P [W]		
1	15	OSRAM SASU DEDRA VATS 4L18 C DEDRA VATS 4L18 C (1.000)	5400	92.0		
				Total:	81000	1380.0
Puissance installée spécifique: 19.71 W/m² = 3.08 W/m²/100 lx (Surface au sol: 70.00 m²)						

Compte rendu simulation n°3 (DIALux)**Cas n°1: Luminaire et source installée**

Hauteur de la pièce: 2.900 m, Hauteur de montage: 2.900 m, Facteur d'entretien: 0.90						Valeurs en Lux, Echelle 1:90
Surface	ρ [%]	E_{moy} [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	$E_{\text{min}} / E_{\text{moy}}$	
Plan utile	/	639	417	831	0.65	
Sol	20	363	77	645	0.21	
Plafond	70	125	88	153	0.70	
Murs (4)	50	226	67	685	/	
Plan utile: Hauteur: 0.900 m Trame: 32 x 32 Points Zone périphérique: 0.700 m						
Liste de luminaires						
N°	qté.	Désignation (Facteur de correction)	Φ [lm]	P [W]		
1	15	OSRAM SASU DEDRA VATS 4L18 C DEDRA VATS 4L18 C (1.000)	5400	92.0		
				Total:	81000	1380.0
Puissance installée spécifique: 19.71 W/m² = 3.08 W/m²/100 lx (Surface au sol: 70.00 m²)						

Cas n°2 : Luminaire et source de qualité moyenne

Hauteur de la pièce: 2.900 m, Hauteur de montage: 2.980 m, Facteur d'entretien: 0.90						Valeurs en Lux, Echelle 1:90
Surface	ρ [%]	E_{moy} [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	$E_{\text{min}} / E_{\text{moy}}$	
Plan utile	/	594	446	729	0.75	
Sol	20	344	56	602	0.16	
Plafond	70	113	74	135	0.65	
Murs (4)	50	186	66	344	/	
Plan utile: Hauteur: 0.900 m Trame: 32 x 32 Points Zone périphérique: 0.700 m						
Liste de luminaires						
N°	qté.	Désignation (Facteur de correction)	Φ [lm]	P [W]		
1	12	Philips IMPALA TBS160 4xTL-D18W/840 HF C6 (1.000)	5400	69.5		
				Total:	64800	834.0
Puissance installée spécifique: 11.91 W/m² = 2.01 W/m²/100 lx (Surface au sol: 70.00 m²)						

Compte rendu simulation n°1 (DIALux)**Cas n°2 : Ballast électronique:**

Hauteur de la pièce: 2.900 m, Hauteur de montage: 2.900 m, Facteur d'entretien: 0.90						Valeurs en Lux, Echelle 1:90
Surface	ρ [%]	E_{moy} [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	$E_{\text{min}} / E_{\text{moy}}$	
Plan utile	/	644	390	883	0.61	
Sol	20	358	67	685	0.19	
Plafond	70	120	79	147	0.66	
Murs (4)	50	206	55	514	/	
Plan utile: Hauteur: 0.900 m Trame: 32 x 32 Points Zone périphérique: 0.700 m						
Liste de luminaires						
N°	qté.	Désignation (Facteur de correction)	Φ [lm]	P [W]		
1	15	OSRAM SASU DED VATS 4L18 HF DED VATS 4L18 HF (1.000)	5200	77.0		
				Total:	78000	1155.0
Puissance installée spécifique: 16.50 W/m² = 2.58 W/m²/100 lx (Surface au sol: 70.00 m²)						

Compte rendu simulation n°2 (DIALux)**Cas n°2 : Facteurs de réflexion 20%, 70%, 80%:**

Hauteur de la pièce: 2.900 m, Hauteur de montage: 2.900 m, Facteur d'entretien: 0.90						Valeurs en Lux, Echelle 1:90
Surface	ρ [%]	E_{moy} [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	$E_{\text{min}} / E_{\text{moy}}$	
Plan utile	/	694	473	879	0.68	
Sol	20	406	104	688	0.26	
Plafond	80	167	125	198	0.75	
Murs (4)	70	268	93	727	/	
Plan utile: Hauteur: 0.900 m Trame: 32 x 32 Points Zone périphérique: 0.700 m						
Liste de luminaires						
N°	qté.	Désignation (Facteur de correction)	Φ [lm]	P [W]		
1	15	OSRAM SASU DEDRA VATS 4L18 C DEDRA VATS 4L18 C (1.000)	5400	92.0		
				Total:	81000	1380.0
Puissance installée spécifique: 19.71 W/m² = 2.84 W/m²/100 lx (Surface au sol: 70.00 m²)						

Compte rendu simulation n°3 (DIALux)**Cas n°3 : Luminaire et source de qualité supérieure**

Hauteur de la pièce: 2.900 m, Hauteur de montage: 2.985 m, Facteur d'entretien: 0.90						Valeurs en Lux, Echelle 1:90
Surface	ρ [%]	E_{moy} [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]	$E_{\text{min}} / E_{\text{moy}}$	
Plan utile	/	694	461	874	0.66	
Sol	20	397	61	718	0.15	
Plafond	70	128	77	156	0.60	
Murs (4)	50	208	55	643	/	
Plan utile: Hauteur: 0.900 m Trame: 64 x 64 Points Zone périphérique: 0.700 m						
Liste de luminaires						
N°	qté.	Désignation (Facteur de correction)	Φ [lm]	P [W]		
1	12	Philips Indolight TBS330 4xTL5-14W/840 HF C6-H (1.000)	4800	63.0		
				Total:	57600	756.0
Puissance installée spécifique: 10.80 W/m² = 1.56 W/m²/100 lx (Surface au sol: 70.00 m²)						

Le vélo à assistance électrique (V.A.E)

Nicolas HOBBE, Stéphane DORBE, Philippe KALINOWSKI

Lycée BOURDELLE, 3 Boulevard HERRIOT
82000 Montauban

Résumé : Après avoir contextualisé et défini l'efficacité énergétique du V.A.E. dans une approche globale intégrant divers impacts environnementaux, une analyse systémique d'un V.A.E. générique est proposée afin de dégager de façon exhaustive les paramètres influant cette efficacité. Sont exposés enfin quelques pistes d'exploitations pédagogiques transversales très orientées « mesures » à partir d'un modèle spécifique de V.A.E. didactisé par nos soins dans le cadre des apprentissages du génie électrotechnique et du génie mécanique.

1. Introduction :

Selon l'ADEME, le transport représente 30 % de la consommation d'énergie française.

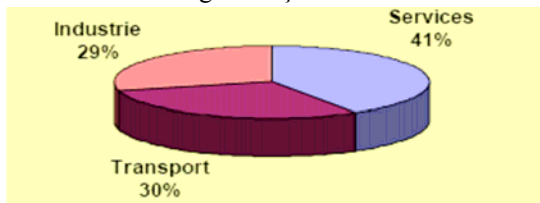


Figure 1 : Part de chaque secteur dans la consommation d'énergie. (Source ADEME)

En 2002, 27% des émissions françaises des gaz à effet de serre avaient pour origine les transports (94% transports routiers, 4% aviation civile, 2% transports maritimes).

Pour comparer l'impact environnemental des différents modes de transports, une entrée peut consister à comparer leur bilan CO₂ à l'aide d'un des nombreux « éco-comparateurs en ligne » qui sont à notre disposition (ADEME, SNCF...).

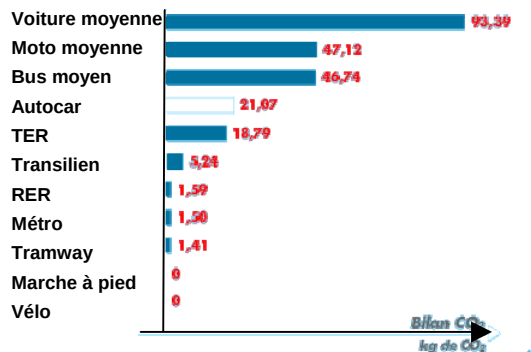


Figure 2 : Pollution des différents modes de transports (source ADEME)

Pour une configuration de déplacement de type urbain (4 km aller/retour pendant 215 jours/an) relatif

à un trajet journalier domicile/travail, par exemple, l'éco-comparateur ADEME (fig.2) montre le faible niveau de pollution pour des modes de déplacements non motorisés et individuels (marche, vélo, roller) ou à motorisation électrique (tramway, métro, RER).

Or la configuration testée correspond à 40% des déplacements urbains qui s'effectuent sur une distance inférieure à 2 km !

De plus la vitesse moyenne de déplacement d'une voiture lors d'un trajet en ville est de 15 à 30 km/h, elle est à rapprocher de celle d'un cycliste estimée à 14 km/h. A l'heure de la vitesse, nous privilégierons l'utilisation du vélo.

Pour comparer les performances des différents moyens de transports, une autre entrée peut consister à comparer l'efficacité énergétique que l'on peut définir simplement comme la capacité d'un dispositif à rendre un service équivalent en consommant le moins d'énergie possible. L'éco-comparateur ADEME (fig.3) met en évidence, les piètres performances énergétiques des véhicules à moteurs thermiques :

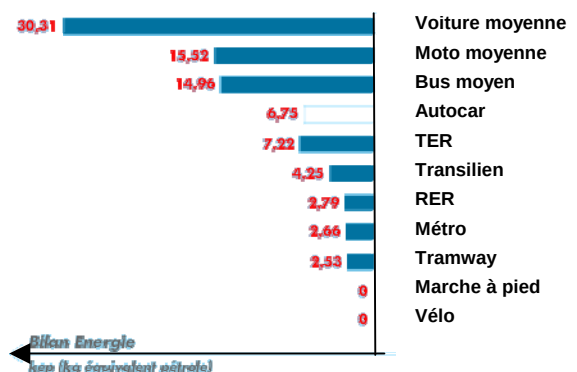


Figure 3 : Consommation énergétique des différents modes de transports (source ADEME)

La pratique (30 minutes par jour) d'une activité sportive fortement recommandée par l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) et l'effet Eco-

Citoyenneté contribuent largement au succès d'opérations Vélib, Vélo-Toulouse...

Tout le monde n'a pas les moyens physiques d'un coureur du Tour de France et on ne peut blâmer personne d'espérer tirer profit des performances des VAE pour éviter d'arriver dégoulinant de sueur au bureau, à condition que la chaîne d'énergie « du puits à la roue » soit énergétiquement la plus efficace pour conjuguer tous les effets bénéfiques.

2. Approche globale du V.A.E.

2.1. Chaîne d'énergie : Principes et structure.

Le V.A.E. est par définition un système mû par 2 chaînes d'énergie ; celle mue par le cycliste est mécanisée et celle de l'assistance est électromécanique.

Le législateur impose au cahier des charges de tout V.A.E. homologable les trois contraintes suivantes :

- ✓ L'assistance ne s'active que si le cycliste pédale.

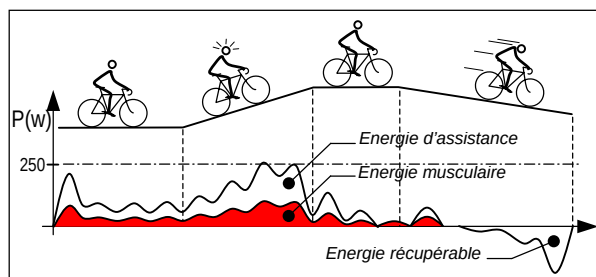


Figure 4 : Principe de l'assistance

- ✓ Elle se désactive dès les 25 km/h atteints.
- ✓ La puissance de l'assistance est limitée à 250W.

Un réglage (25%, 50% etc...) est cependant possible. (Cf directive européenne 2002/24/CE :

<http://www.legifrance.gouv.fr/WAspad/UnTexteDeJorf?numjo=EQU03006974>

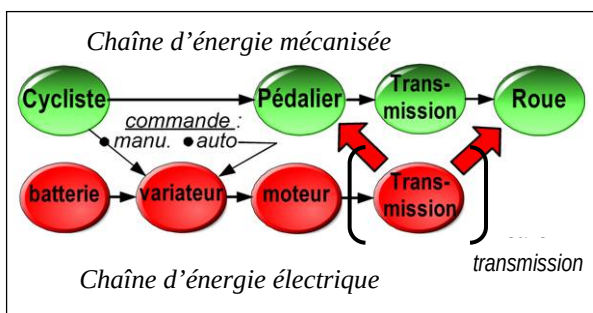


Figure 5 : Structure simplifiée de la chaîne bi-énergie

La chaîne mécanisée (fig.5) varie peu dans sa structure : on trouve certaines transmissions par engrenages coniques (abusivement appelées « cardan ») souvent associées à un moyeu de roue arrière intégrant 3 à 8 vitesses (fig.6). Mais la

transmission par chaîne reste majoritaire grâce au nombre de rapports de vitesses et à son coût relatif.



Figure 6 : Transmission par (faux) cardan.

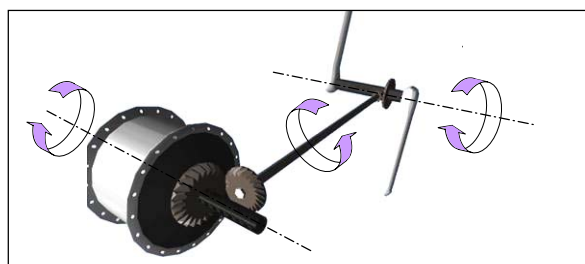


Figure 7 : Transmission par (faux) cardan.

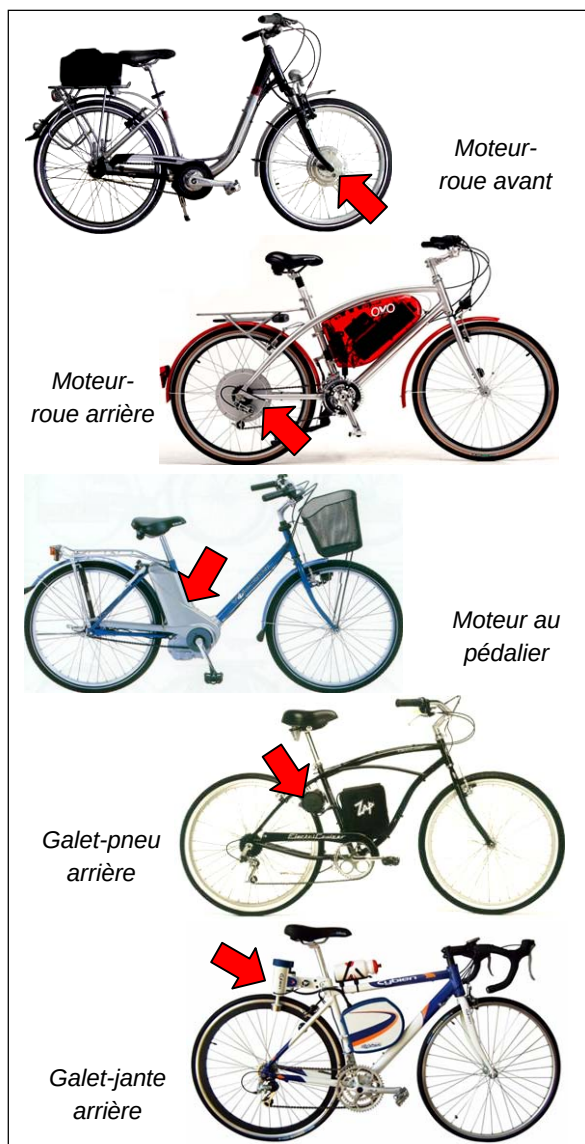


Figure 8 : Exemples de point d'application de l'énergie.

La chaîne électrique varie essentiellement dans sa structure par son point d'application dans la chaîne mécanisée et par l'existence ou non d'une transmission mécanique (fig.5). L'actionneur est toujours un moteur électrique. Dans le cas du moteur-roue, le moteur est directement implanté dans le moyeu et donc sans transmission mécanique.

Si le V.A.E. a le mérite d'être mû par deux énergies « propres » et économiques à l'usage (moins de 0,001 €/km généralement annoncés), il propose une autonomie encore limitée (45 km en moyenne, 120 km dans le meilleur des cas et des modèles). Les deux principaux freins à cette autonomie sont :

- ⇒ la masse embarquée qui varie de 18 à 29 kg dont 2,5 à 4 kg pour la batterie.
- ⇒ la densité énergétique de cette dernière.

C'est ce problème récurrent de l'autonomie qui justifie la recherche d'une efficacité énergétique optimisée, principalement sur la chaîne d'énergie d'assistance.

Mais les facteurs qui conditionnent cette efficacité sont nombreux, le plus souvent indépendant mais parfois en interaction complexe. Une approche fonctionnelle et structurelle s'impose afin de permettre d'en dégager la grande majorité.

Une approche comportementale plus systémique en complètera la liste tout en précisant leurs interactions.

Le V.A.E. étudié demeure volontairement générique et ne préfigure donc aucune solution technique particulière.

2.2. Approche fonctionnelle et structurelle.

Fp1: Transporter l'utilisateur

Fc1: Respecter les normes

Fc2: S'adapter à l'environnement

Fc3: S'adapter au réseau EDF

Fc4: Limiter le vol du VAE

Et de ses composants

Fc5: Faciliter la maintenance

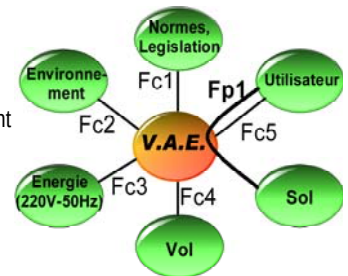


Figure 9 : Analyse fonctionnelle externe (simplifiée) :

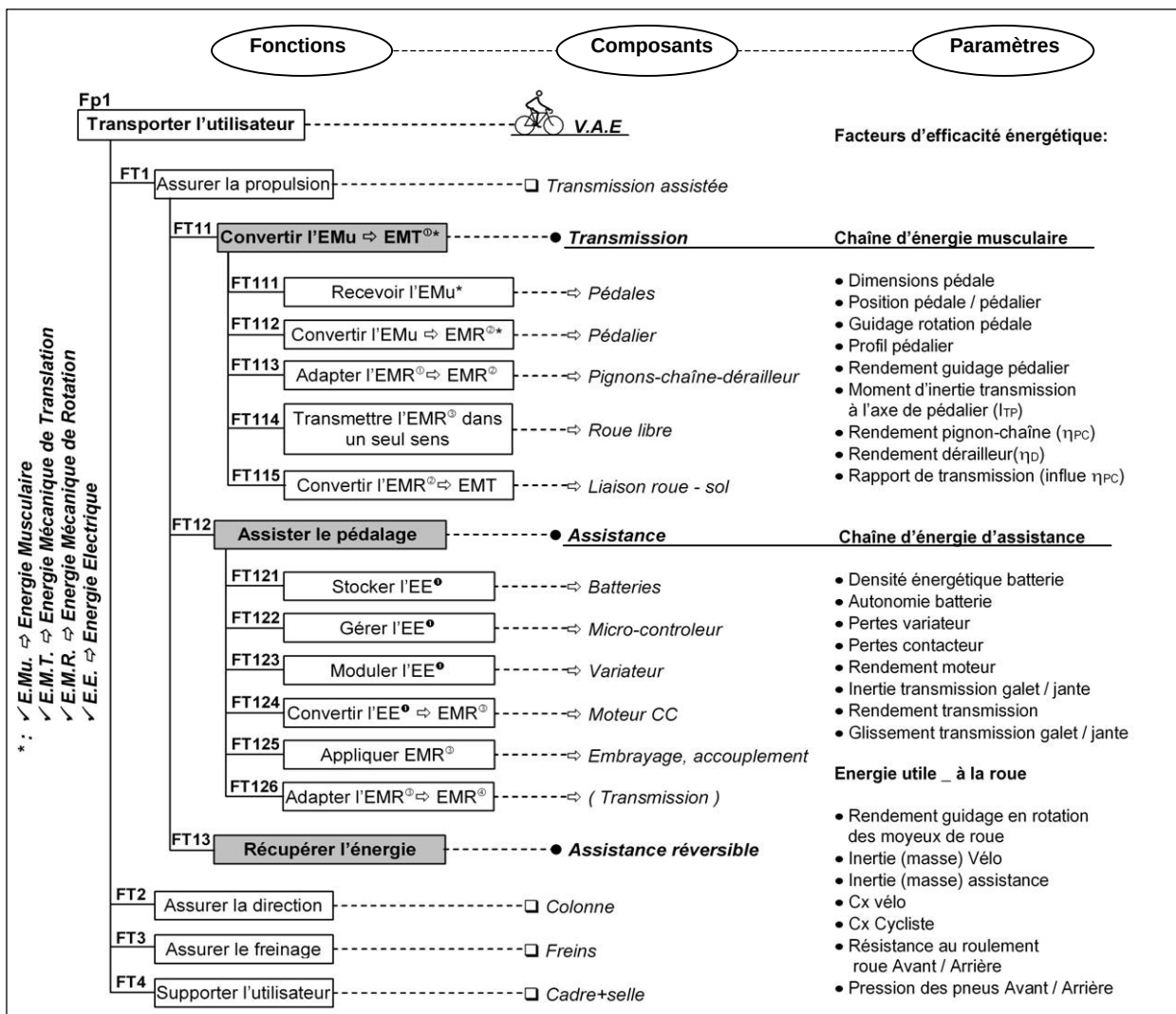


Figure 10 : Analyse fonctionnelle interne

Ainsi chaque composant s'avère énergétivore et parfois à plus d'un titre.

C'est la fonction associée à ce composant qui définit le niveau de performance, les critères pour l'apprécier, voir la flexibilité admise.

Pour la fonction FT12 qui nous intéresse :

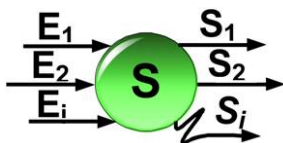
Fonction	Critère	Niveau	Flexibilité
FT12 : Assister le Pédalage	Puissance	250 W	maxi
	Vitesse	25km/h	maxi
	Rendement	80%	mini
	Autonomie	50 km	± 20 km
	Modes	manu/auto	----
	Durée de vie	8 ans	mini

2.3. Approche énergétique globale du V.A.E.

L'énergie est soit stockée, soit transformée, soit transférée.

Dans le cas de la transformation, il y a deux grands principes énergétiques :

Le principe de conservation ($\sum E_i = \sum S_i$) et celui de dégradation (une partie des E_i est dégradée en chaleur).



Par convention :
 $\Rightarrow E_i > 0$
 $\Rightarrow S_i < 0$

Appliqués à notre système cela donne :



$E_M > 0 \Rightarrow$ Musculaire
 $E_{EF} > 0 \Rightarrow$ Electrique Fournie
 $E_C < 0 \Rightarrow$ Cinétique
 $E_{FD} < 0 \Rightarrow$ Fournie Dissipée

$$E_M + E_{EF} = - E_C - E_{FD}$$

L'équation est apparemment simple: si on admet qu'« être autonome électriquement, c'est assurer la pérennité de l'énergie électrique fournie (E_{EF}) ». Soit :

$$E_{EF} = - E_M - E_C(<0) - E_{FD}(<0)$$

Donc **selon une approche strictement énergétique**, le système doit:

❶ Optimiser E_{EF} , c'est-à-dire disposer d'une batterie à haute densité énergétique.

❷ Optimiser E_M , c'est-à-dire disposer d'une énergie musculaire importante!

❸ Minimiser E_C , c'est-à-dire réduire la masse embarquée et à priori la vitesse de déplacement ($E_C = 0,5 \times m_s \times V_s^2 + K(t)$, $K(t)$ fonction des transmissions).

❹ Minimiser E_{FD} , c'est-à-dire réduire toutes les pertes tant électriques que mécaniques.

Suivant une approche temporelle, on ne maîtrise l'énergie globalement dépensée qu'en observant plus ponctuellement ses variations au cours du fonctionnement. Le théorème de l'Energie cinétique appliqué à l'ensemble $S = \{ \quad \} = \{\text{vélo+cycliste}\}$ est tout indiqué:

$$dE_{C/S/Rg}/dt = P_{ext} + P_{int}$$

Avec :

✓ E_C : Energie cinétique de l'ensemble S en mouvement par rapport à un repère Galiléen (R_g)

✓ $P_{ext} = P_M + P_{EF} + P_C$ ($P_C < 0$), puissances extérieures à S en Watt.

✓ $P_{int} = P_{FD} = - (P_M \cdot \eta_M + P_{EF} \cdot \eta_{EF})$, puissances intérieures à S en Watt.

$$\Rightarrow E_C = 0,5 \cdot m_s \cdot V_s^2 + 0,5 \cdot J_{eq,M} \cdot \omega_{pedalier}^2 + 0,5 \cdot J_{eq,EF} \cdot \omega_{moteur}^2$$

$$\Rightarrow dE_C/dt = m_s \cdot V_s \cdot a_s + J_{eq,M} \cdot \omega_{pedalier} \cdot \alpha_{pedalier} + J_{eq,EF} \cdot \omega_{moteur} \cdot \alpha_{moteur}$$

Avec :

✓ m_s : masse de S en kg

✓ V_s : Vitesse linéaire de S en $m.s^{-1}$

✓ $J_{eq,M}$: Inertie équivalente de la transmission mécanisée ramenée à l'axe du pédalier en $kg.m^2$

✓ $J_{eq,EF}$: Inertie équivalente de la transmission d'assistance ramenée à l'axe du moteur en $kg.m^2$

✓ $\omega_{pedalier}$: vitesse angulaire du pédalier en $rad.s^{-1}$

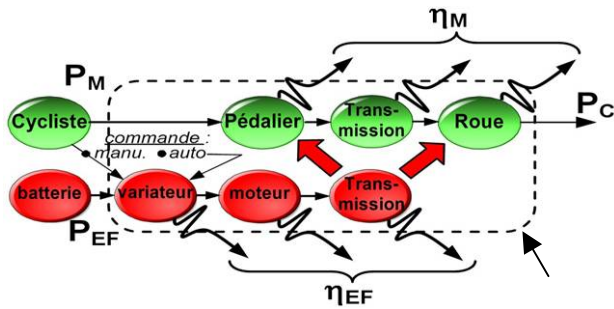
✓ ω_{moteur} : vitesse angulaire du moteur en $rad.s^{-1}$

✓ $\alpha_{pedalier}$: accélération angulaire du pédalier en $rad.s^{-2}$

✓ α_{moteur} : accélération angulaire du moteur en $rad.s^{-2}$

✓ η_M : rendement global de la transmission mécanisée

✓ η_{EF} : rendement global de la transmission d'assistance



$$\Rightarrow P_M + P_{EF} + P_C + P_M \cdot \eta_M + P_{EF} \cdot \eta_{EF} = m_S \cdot V_S \cdot a_S + J_{eq,M} \cdot \omega_{pédalier} \cdot \alpha_{pédalier} + J_{eq,EF} \cdot \omega_{moteur} \cdot \alpha_{moteur}$$

Soit :

$$P_{EF} = -P_M - P_C - P_M \cdot \eta_M - P_{EF} \cdot \eta_{EF} + m_S \cdot V_S \cdot a_S + J_{eq,M} \cdot \omega_{pédalier} \cdot \alpha_{pédalier} + J_{eq,EF} \cdot \omega_{moteur} \cdot \alpha_{moteur}$$

Ce qui implique en outre de:

⑤ Réduire le moment d'inertie $J_{eq,i}$ de chacune des deux transmissions mécaniques embarquées.

⑥ Optimiser η_M , le rendement de la transmission mécanisée sachant qu'étant en parallèle à celle d'assistance le rendement global des deux transmissions fonctionnant simultanément est non plus le produit mais la moyenne des deux :

$$\eta_M = \eta_{pédalier} \times \eta_{transmission} \times \eta_{roue}$$

$$\eta_{EF} = \eta_{variateur} \times \eta_{moteur} \times \eta_{transmission}$$

$$\eta_{global} = (\eta_M + \eta_{EF}) / 2$$

Si chaque chaîne d'énergie a un rendement de 0,8, le rendement global sera non pas 0,64 mais bien 0,8 !!

⑦ Optimiser η_{EF} , voir supprimer toute transmission mécanique dans l'assistance électrique. Ce qui nous ramène au choix crucial du point d'application de l'énergie d'assistance (fig.8) ;

⑧ Choisir sciemment le point d'application (fig.8) :

Le rendement moyen des moteurs-roues (données constructeur) est de 85%, ce qui équivaut au rendement global d'une transmission mécanique à structure série de :

⇒ 3 composants à 95 % de rendement chacun

⇒ 8 composants à 98 % de rendement chacun



Figure 11 : Moteur roue.

C'est cet indéniable intérêt de placer au plus près de la roue le point d'application de l'énergie d'assistance qui a poussé certains constructeurs à développer des moteurs dont le rotor est directement en prise avec le moyeu de roue.

Ainsi l'énergie mécanique est délivrée le plus souvent sans transmission mécanique énergétivore intermédiaire.

Enfin sont à considérer deux points essentiels :

● La gestion d'énergie par la chaîne d'information.

Ce qui caractérise cette gestion est de trois ordres :

⇒ Les informations d'entrée :

✓ les consignes du cycliste (marche/arrêt, mode manu/auto, taux d'assistance)

✓ les états du système (couple au pédalier, vitesse angulaire au pédalier, détection de pédalage, vitesse angulaire à la roue,...).

⇒ Les informations de sortie :

La commande gère le plus souvent l'alimentation du(des) moteur(s) à courant constant en ne modulant que la tension et donc la vitesse.

⇒ Le programme de traitement.

✓ Pas de pédalage (en tout ou rien ou numérique - vitesse ou couple) = pas d'assistance

✓ Vitesse > 25km/h (soit $\approx 200 \text{ tr.mn}^{-1}$ à la roue $\approx 70 \text{ tr.mn}^{-1}$ au pédalier) = pas d'assistance.

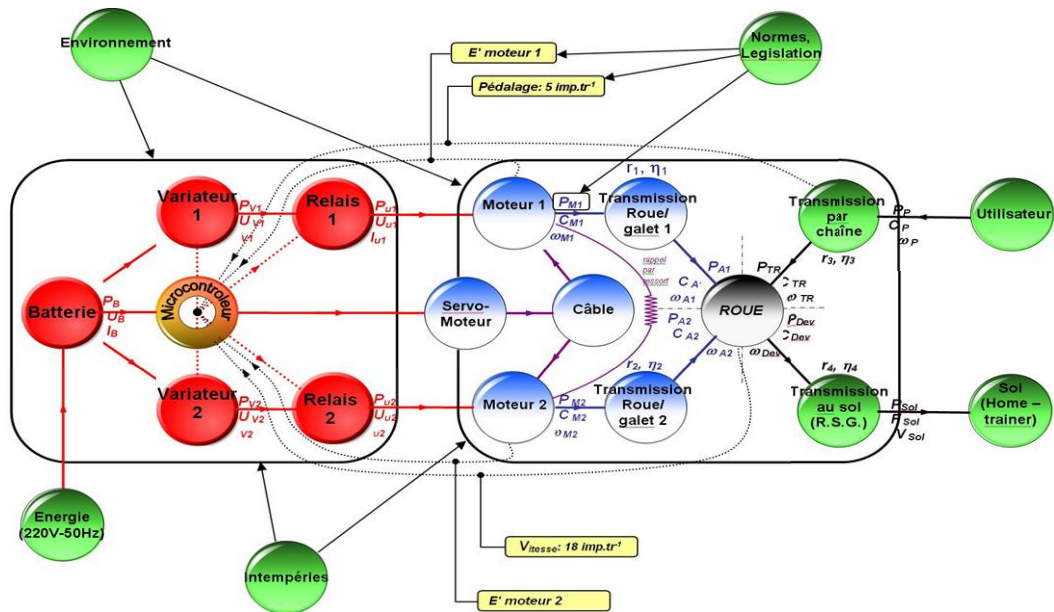


Figure 12 : Analyse structurelle interne spécifique au VAE Cybien.

● Les phases de fonctionnement :

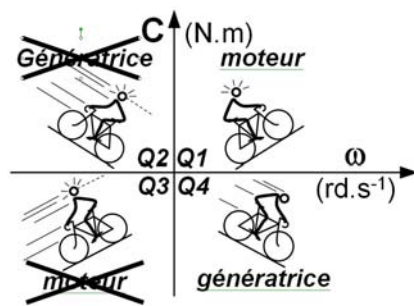


Figure 13 : Les quadrants de fonctionnement.

Quadrant Q1 : dépense d'énergie

⇒ Régime établi :

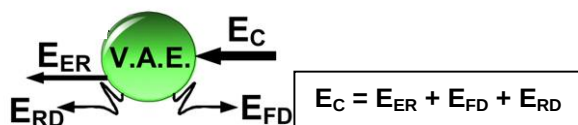
Vitesse linéaire de déplacement et angulaire des composants de transmissions sont constantes. Donc pas d'accélération donc pas d'effets d'inertie, donc pas de couple moteur augmenté.

⇒ Régime transitoire :

Effets d'inerties proportionnels aux inerties propres $J_{eq,i}$ ainsi qu'aux accélérations du moteur requises.

Quadrant Q4 : récupération d'énergie

Dans ce cas, une deuxième phase de fonctionnement et donc une seconde équation sont à



✓ Au roulage : charge électrique suffisante pour un éclairage mais pas pour une batterie de 15 Ah en moyenne

✓ Au freinage : C'est toute l'énergie cinétique qui est alors transformée. A haute vitesse (>25 km/h) la réversibilité de la chaîne d'énergie électrique devient productive de façon plus significative et participe donc, de façon positive cette fois à l'efficacité énergétique de l'ensemble.

Cette approche énergétique globale montre à la fois la complexité mais aussi la richesse d'un point de vue technologique que recèle potentiellement un système de ce type. Cette richesse va naturellement de paire avec la diversité des exploitations pédagogiques possibles dont on propose quelques pistes ci-après.

3. L'application du lycée

Le choix de l'équipe pédagogique s'est orienté en 2006 sur le VAE Cybien, basé sur le concept "CYcle BI ENergie" en raison du caractère transversal (énergétique, mécanique et électrotechnique) des activités pédagogiques.

3.1. Présentation du VAE Cybien :



Figure 14 : Le VAE Cybien version sport

Ce VAE est constitué de deux moteurs à courant continu débrayables de puissance de 120W utiles chacun, qui prennent en sandwich un polymère fixé au niveau de la jante de la roue arrière.



Figure 15 : Les deux moteurs du VAE Cybien

La partie accumulateur convertisseur est contenue dans un boîtier étanche appelé Réservélec qui peut être rechargé par chargeur sur secteur 230V.
Capacité accumulateur: 16 Ah Lithium ion
Tension : 25.2 Volts
Poids avec électronique de gestion : 3,2 kg,
Durée de vie : 500 cycles, 40 à 50 000 km sont envisageables.



Figure 16 : Le Réservélec

Poids du vélo complet : 20,8 Kg
Autonomie : 100 Km en moyenne sur circuit vallonné d'après le fabricant.

3.2. Description des différents accessoires rajoutés pour l'exploitation pédagogique du VAE :

Dans cette approche nous avons voulu conserver le VAE dans un contexte de cyclisme : les éléments de didactisation (banc de charge, capteur de couple) sont issus de matériels utilisés dans le milieu cycliste pro.

Pour pouvoir étudier le VAE Cybien, nous avons rajouté un capteur de puissance de type Ergomo dans le boîtier du pédalier, et placé le vélo sur un banc d'entraînement appelé ergotrainer pour simuler la résistance à l'avancement.

3.2.1. Capteur de puissance Ergomo

L'ergomètre permet la mesure de la puissance développée par le cycliste sur le terrain, la vitesse, la cadence de pédalage, la température, la fréquence cardiaque, la distance parcourue.

Par la suite il est possible de transférer et d'analyser ces données sur un PC à l'aide d'un tableau.

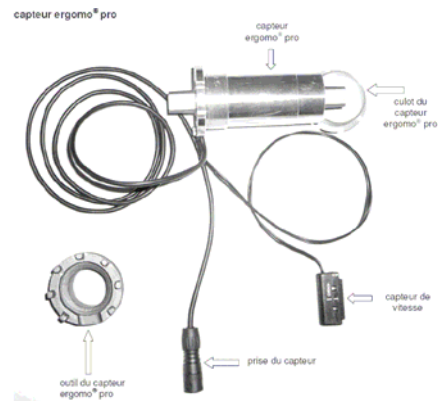


Figure 17 : Le capteur Ergomo pro et ses accessoires.



Figure 18 : Console dialogue placée sur le guidon.

Montés dans le boîtier de pédalier (fig.17), deux capteurs S1 et S2 (fig.18) permettent de détecter l'angle de torsion γ de l'axe par mesure du déphasage des signaux électriques. Connaissant les propriétés des matériaux de l'axe et sa vitesse de rotation, il est alors possible de calculer le couple M produit et la puissance développée.

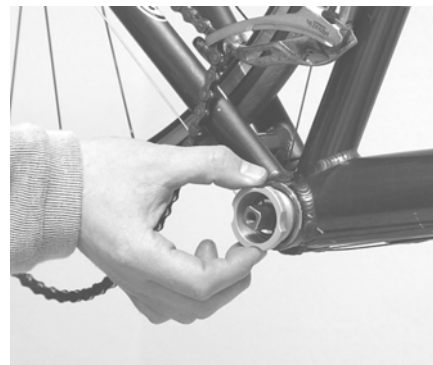


Figure 19 : Montage du capteur Ergomo dans le pédalier

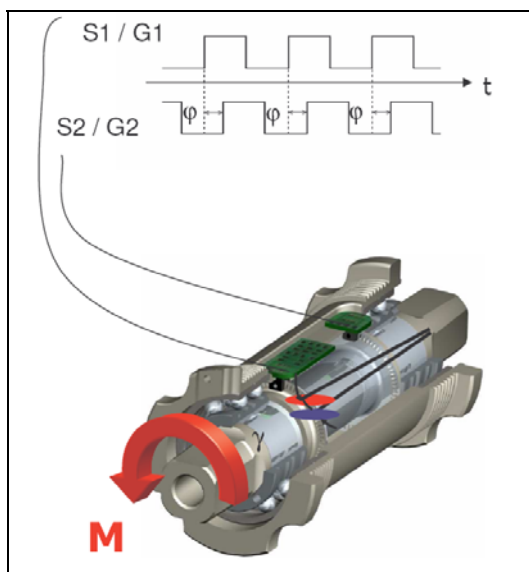


Figure 20 : Principe de mesure du capteur ERGOMO

3.2.1. L'ergotrainer Tacx Cosmos



Figure 21 : L'ergotrainer Tacx Cosmos.

L'ergotrainer est un appareil d'entraînement qui, combiné à un vélo, permet de simuler le relief de la route (fig.19).

Cet ergotrainer est équipé d'un frein moteur, d'une console de dialogue *Cosmos* (fig.20) sur laquelle on programme des entraînements en puissance, en résistance en côte ou en fréquence cardiaque. les performances du cycliste sont enregistrées et exploitables sous la forme d'un fichier de données. Naturellement, il est aussi possible de rouler à allure libre.



Figure 22 : La console Cosmos fixée au guidon.

Ainsi par l'ajout de ces deux composants, il est possible d'obtenir pour un parcours précis le relevé correspondant à la puissance fournie par le cycliste et le relevé correspondant à la puissance de l'ergotrainer, et mettre en évidence l'apport énergétique instantané de l'assistance électrique en faisant la différence des deux relevés (fig.23).

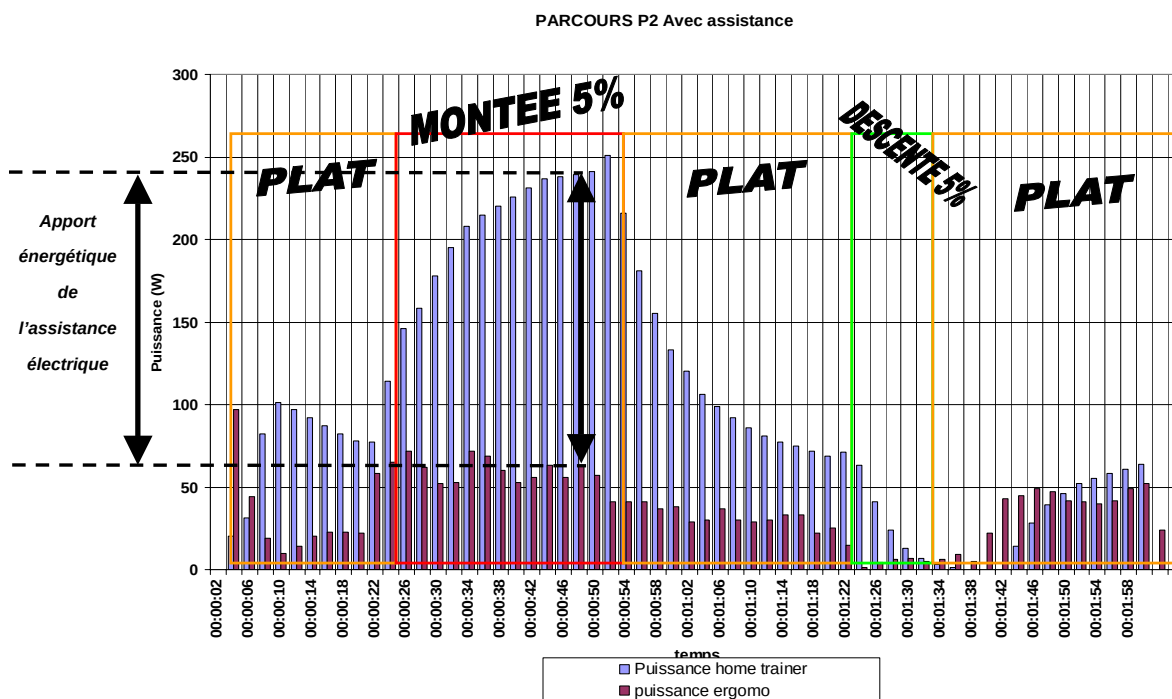


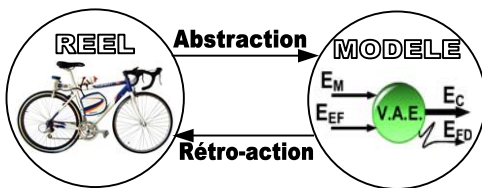
Figure 23 : Relevé extrait sous tableur de l'ergomo et du ergotrainer.

4. Centre d'intérêt transversal, stratégie didactique et problématique communes.

Le centre d'intérêt transversal au génie mécanique et électrotechnique est récurrent ; « Comportement énergétique des systèmes : Architecture, puissance, rendement et réversibilité d'une chaîne d'énergie ».

La stratégie didactique privilégiée est du type inductif (fig. 24). Le V.A.E. Cybien (ainsi que 2 autres systèmes) intégré dans une séquence volontairement courte constitue un support tout à fait adapté à la découverte de phénomènes énergétiques. Ces phénomènes, une fois observés et quantifiés*, sont confrontés à des modèles énergétiques construits par l'élève, ce qui favorise le développement de l'aptitude à l'abstraction (fig.) tout en permettant de rétro-agir efficacement sur le système pour résoudre le problème posé.

(*) : Bon nombre de paramètres énergétiques sont mesurables directement, en temps réel et avec une imprécision inférieure à 3%.



La problématique commune : L'utilisateur se rend très vite compte de l'aide substantielle apportée par l'assistance électrique. Par contre le poids du vélo et de son réservoir d'énergie (25 Kg au total en moyenne) l'amène rapidement à se poser la question de l'autonomie dont il dispose pour une énergie massique embarquée donnée.

Ainsi, pour l'élève, l'objectif de l'activité (sa problématique) est, après avoir constaté l'existence d'un composant ou d'un phénomène énergétivore, d'en quantifier les effets permettant de préserver au final la batterie.

5. Proposition de TP transversal sur l'efficacité énergétique ; rendement d'une transmission par galet :

5.1. Mécanique : Etude énergétique

Centre d'intérêt commun (élec/méca): Comportement

énergétique des systèmes.

Objectif pédagogique : Déterminer le rendement global de tout ou partie du système.

Objectif intermédiaire cognitif :

⇒ **Méca :** Définir et caractériser le rendement élémentaire puis le rendement global (cas des structures série et parallèle).

⇒ **Elec :** déterminer le rendement moteur.

Objectif intermédiaire méthodologique :

⇒ **Méca :** Déterminer un ordre d'isolement énergétique.

⇒ **Elec :** Appliquer/Choisir un protocole de mesure.

Problématique : Evaluer le rendement de la transmission par adhérence pour

étude comparée à un autre V.A.E.

Stratégie : Tout inductif.

⇒ **Activation :** Susciter l'intérêt vis-à-vis des objectifs.

⇒ **Introduction :** Présentation du C.I., du système, de la problématique et de la démarche.

⇒ **Confrontation :** 3 TP transversaux dont un sur le V.A.E. Cybien.

⇒ **Transfert :** 1 TD Méca et un TD Elec sur système et problématique différents.

⇒ **Scénario :**

1) Confronter l'élève au système réel

2) L'amener à construire un modèle porteur des lois

$$\odot \eta = P_s / P_e,$$

$$\odot \eta_{\text{global-série}} = \prod_{i=1}^n \eta_i \text{ x } \dots \text{ x } \eta_n,$$

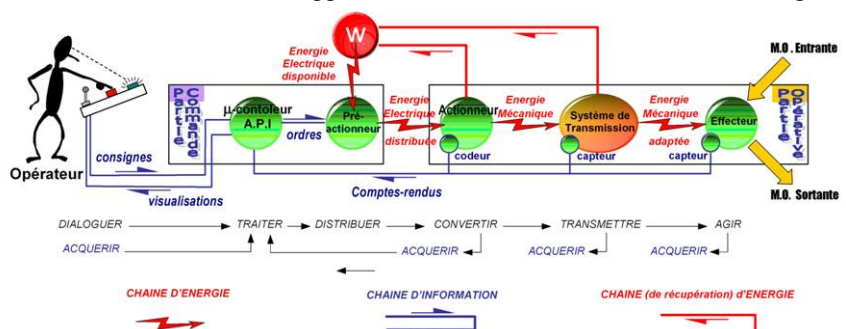
$$\odot \eta_{\text{global-//}} = \sum_{i=1}^n (\eta_i) / n.$$

3) Découvrir ces lois et leur méthode d'application.

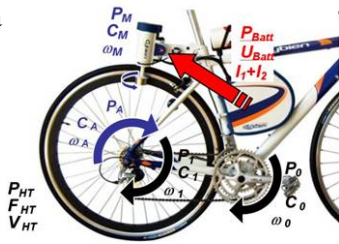
4) Appliquer lois et méthode.

Guidance :

Approche fonctionnelle : chaîne d'énergie,



- Approche structurelle : qui transmet à quoi, compléter la



- Approche Comportementale : Nature des énergies, grandeurs associées, expression de P (C ω , UI)
Un bloc par composant, compléter la figure :



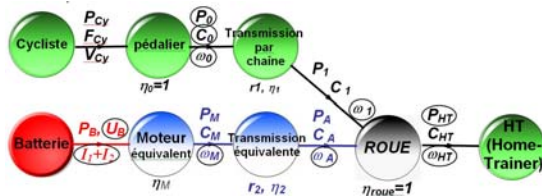
Estimation de la consommation énergétique :

Assistance seule :

- ☒ Mesures de U_{batt} , $I_1 + I_2$ (soit P_{abs})
- ☒ Relevé de PHT = Pergotrainer
- ☒ Quantification des pertes
Différence : $P_{abs} - P_{ergotrainer} = P_{pertes}$
Ratio : $P_{ergotrainer} / P_{abs} = \text{\%age} = \text{rendement}$.

C'est la loi !

- Entourer les grandeurs mesurables par l'ergomo et le Home-trainer.



- A partir de ces valeurs, peut-on mesurer :
- ✓ η_{moteur} ? ☐ oui ☐ non
 - ✓ $\eta_{Transmission}$? ☐ oui ☐ non
 - ✓ η_{EF} ? ☐ oui ☐ non
- Hypothèse : $\eta_{variateur} = \eta_{roue} = 1$

- Comment déterminer dans ce cas $\eta_{Transmission}$?
Réponse : en mesurant η_{moteur} et η_{EF} et en trouvant la relation entre η_{EF} d'une part et ($\eta_{Transmission}$, η_{moteur}) d'autre part !

5.2. Elec : choix d'appareillage de mesure

Centre d'intérêt: Comportement énergétique des systèmes.

Objectif pédagogique : Déterminer le rendement global de tout ou partie du système.

Objectif intermédiaire cognitif :

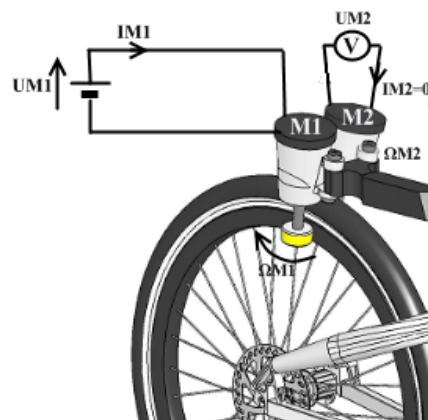
⇒ Elec : Déterminer par des mesures adaptées le rendement moteur ainsi que le rendement global de la chaîne d'énergie électrique.

Objectif intermédiaire méthodologique :

⇒ Elec : Appliquer/Choisir un protocole de mesure.

Guidance :

Pour pouvoir mesurer η_{Moteur} on réalise le montage suivant :



M_1 est utilisé en fonctionnement moteur

M_2 est utilisé en fonctionnement générateur

Les valeurs des coefficients $K_e = K_i = K$ sont connues.

On alimente directement avec la batterie les moteurs sans passer par le convertisseur.

Mais pour déterminer η_T il faut pouvoir mesurer

η_M , car : $\eta_{EF} = \eta_T \cdot \eta_M$

si on néglige les pertes dans le variateur, avec :

✓ η_T : rendement de la transmission mécanique

✓ η_M : rendement du moteur

$\eta_T = P_S / P_M = P_{ergotrainer} / (P_{abs} \cdot \eta_M)$

$= P_{ergotrainer} / (U \cdot I \cdot \eta_M)$

On a de plus :

$\eta_M = P_u / P_{abs} = C_u \Omega / U \cdot I$

si on néglige le couple de perte on a :

$C_{em} = C_u$, et comme $C_{em} = K \cdot I$, alors :

$\eta_M = K \cdot I \cdot \Omega / U \cdot I$

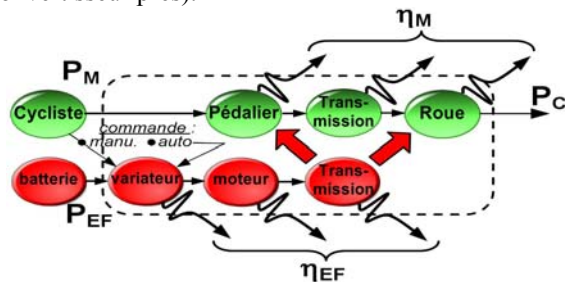
et donc :

$\eta_M = K \Omega / U$

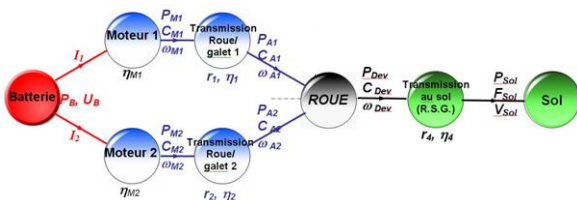
Il suffit donc de mesurer la vitesse de rotation Ω_{M2} et la tension U_{M2} pour déterminer le rendement du moteur η_M

Pour mesurer objectivement η_{EF} , on applique différentes charges constantes imposées par l'ergotrainer (fig. 25).

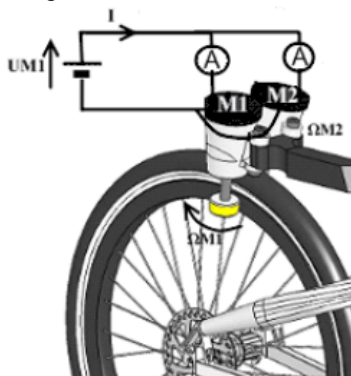
Comme $\eta_{EF} = P_{abs} / P_{ergotrainer}$ (au rendement du convertisseur près).



On mesure les courants des deux moteurs I_{M1} et I_{M2} , la tension de la batterie U_{bat} , les vitesses de rotation de chaque moteurs Ω_{M1} et Ω_{M2} , ainsi que la vitesse de rotation de la roue arrière Ω_{roue} .



Le dispositif est le suivant :



On peut alors déterminer la puissance absorbée :

$$P_{abs} = U_{Bat} \times (I_{M1} + I_{M2})$$

Sachant que la puissance au niveau de la roue est :

$$P_{ergotrainer} = C^{te}$$

Alors on peut calculer le rendement moteur + transmission :

$$\eta_{EF} = P_{abs} / P_{ergotrainer}$$

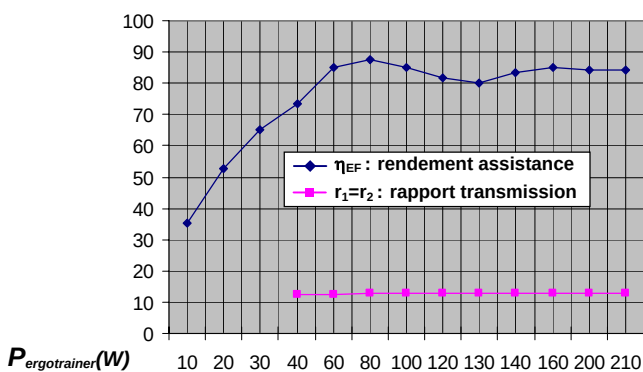
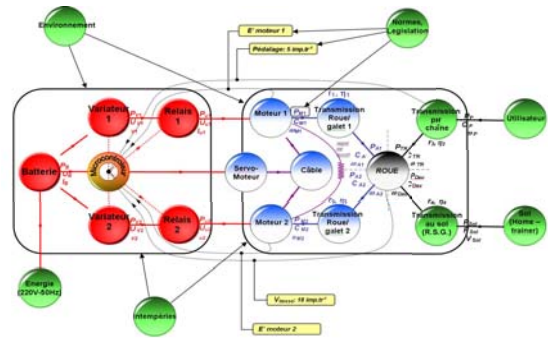


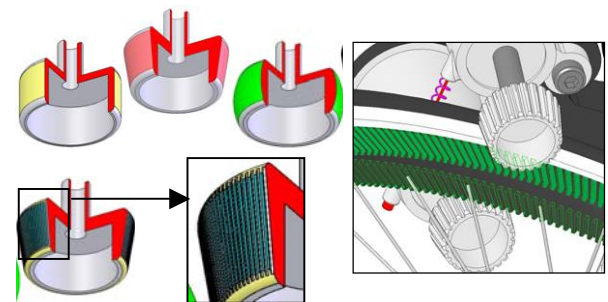
Figure 25: Mesure de η_{EF} sur une large plage de puissance.

Pour aller plus loin ; la chaîne d'information.



Pour aller plus loin - bis;

Découvrir les facteurs influant le rendement précédemment déterminé et recenser quelques solutions technologiques.



Facteurs d'efficacité : forme, rugosité, matériaux, lubrification (pluie, neige)

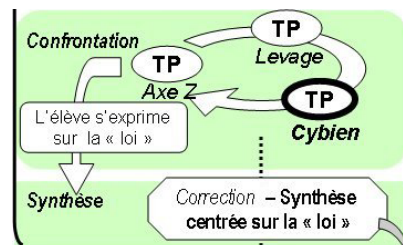
Ces solutions pouvant par ailleurs être éventuellement mises en œuvre dans le cadre d'un mini-projet (en option I.S.I.) ou d'un PPE (en S.S.I.) voire d'un projet plus vaste et ambitieux en BTS.

5.3. Caractérisation d'une variation de vitesse :

5.3.1. étude des 4 quadrants

Objectif :

Caractériser le principe de réversibilité énergétique de l'association source électrique / convertisseur statique / charge pour différents systèmes présents dans l'atelier comme l'axe Z, le système de levage et le VAE Cybien.



Activités :

Activité de mesure à partir d'un protocole que les élèves devront définir.

Problème technique :

L'utilisateur souhaite savoir s'il peut augmenter son autonomie en rechargeant la batterie lors des phases de freinage.

Matériel nécessaire :

En présence du système VAE Cybien instrumenté,
Schéma électrique,
Décomposition fonctionnelle,
Décomposition matérielle.



Figure 26 : Relevé instantané de U et de I du moteur M_1 en sortie du hacheur pour une cote de 5%

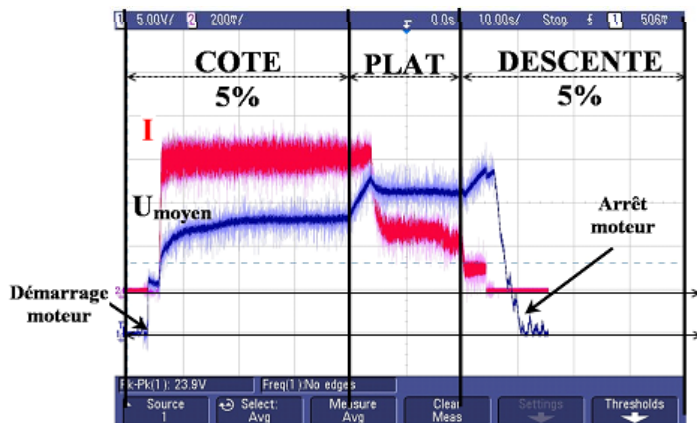


Figure 27 : Relevé de U_{moyen} et I du moteur M_1 pour un parcours complet

Si on tient compte de ces relevés, on peut se rendre compte immédiatement que le système est basé sur un hacheur (fig. 26) qui ne fonctionne que dans le quadrant Q_1 (fig.13).

Si on étudie les différentes zones du parcours d'essai du relevé de la figure 27, on voit que :

✓ La mesure du courant I , nous donne une bonne image du couple qui est bien en relation avec le relief

du parcours, le couple diminue au fur et à mesure que les difficultés du parcours diminuent.

✓ La mesure de la tension U , nous donne une bonne image de la vitesse du vélo. On peut mesurer les différentes vitesses atteinte par le vélo pour chaque portion du parcours d'essai ainsi que la vitesse de débrayage (>25 km/h).

✓ La gestion électronique du vélo assure une régulation de couple, mais de type *tout au démarrage*.

Si on se place du point de vue de l'efficacité énergétique, il peut s'avérer être intéressant de récupérer l'énergie en descente, ce qui est impossible avec le VAE Cybien, d'où l'intérêt de faire une étude comparée de deux VAE de technologie différente.

5.4. Etude comparée de deux VAE de technologie différente :

Le Cybien et le i-step de Matra Sports (équipé du kit BionX)



Figure 28 : Le VAE i-step de Matra Sports.

Le VAE i-step de Matra Sports est basé sur le système BionX, qui s'installe aisément sur la plupart des vélos et s'adapte aux roues de nombreux vélos du 20 au 28 pouces.

Il est composé d'un moteur roue à entraînement direct, c'est-à-dire sans engrenage, et sans balais, d'une batterie amovible et d'une console de commande.

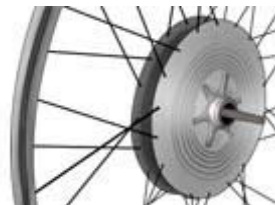


Figure 29 : Le moteur roue BionX.



Figure 30 : La batterie amovible BionX.

Doté de la technologie d'entraînement par champ magnétique, les aimants extérieurs (roue) tournent alors que le stator interne (axe de la roue) ne tourne pas.

Il n'y a donc aucune friction à l'intérieur du moteur et conséquemment aucune usure, Donc une meilleure efficacité énergétique.

De plus, grâce à ses 4 niveaux d'assistance et ses 4 niveaux de régénération, le système BionX assiste le cycliste sans effort à 25 km/h sur une distance jusqu'à 70 km. D'une simple pression sur la console de commande, on peut augmenter la puissance de 25 à 200 %, donnant l'impression de rouler avec un vélo ultra léger en toute circonstance, face au vent ou en côte.

L'assistance est très progressive, fonction du niveau d'assistance choisi et de l'effort produit par le cycliste. Il y a un capteur d'effort au niveau du moyeu AR qui sert à doser l'assistance.

C'est là tout « l'esprit VAE » qui optimise dans la durée des phases de fonctionnement l'énergie électrique d'appoint à la différence du VAE Cybien et de son assistance « tout au démarrage »

La récupération d'énergie est possible, de plus, il permet de gérer un mode « ralentisseur », pour préserver ses patins AR. Très bien dans les fortes descentes, surtout sous la pluie voire sous la neige. On arrive à ralentir de façon très homogène sans risque de blocage de roue. C'est là le principal intérêt de ce mode « générateur ».

De plus, le moteur passe immédiatement en mode générateur dès que l'on presse le levier de frein AR, ce qui accompagne et améliore le freinage.

On peut aussi utiliser le kit en mode « entraînement », en roulant en mode générateur, afin de simuler un relief plus ou moins fort.

Ainsi la comparaison de ces deux procédés d'assistance au pédalage peut être très intéressante.

6. Conclusions

Les applications pédagogiques potentielles de ce type de système sont innombrables. Le vélo à pédalage assisté permet d'aborder la majeure partie du programme du baccalauréat STI Electrotechnique et correspond d'autant plus à l'esprit du programme avorté du bac Energie et Environnement. La plupart des centres d'intérêt (éco-conception, étude comparée d'applications, chaîne d'énergie et d'information, analyse fonctionnelle,...) trouveront du grain à moudre dans le vélo à pédalage assisté, quelque soit le modèle choisi. Simple dans le principe, il devient rapidement complexe d'appréhender l'ensemble des problèmes techniques posés et source de solutions technologiques innovantes et susceptibles d'intéresser nos élèves de la seconde aux classes post-bac.

Références :

- [1] <http://www2.ademe.fr/eco-deplacements/>
- [2] VAE Cybien, <http://www.cybien.fr/accueil-velo-electrique.htm>
- [3] : Ergotrainer Tacx,
<http://www.tacx.com/indexv3.php?fl=&language=FR>
- [4] : BionX,
<http://www.bionx.ca/fr/main/default/1.shtml>
- [5] : Matra sports, <http://www.matra-ms.com/vehicules-legers-electriques/matra-sports.html>
- [6] : Capteur de puissance Ergomo,
<http://www.ergomo.net/>
- [7] : www.velo-electrique.com

Les Défis Solaires un outil pédagogique innovant (Juin 2008, Académie de TOULOUSE)

Julie VRIET (Professeur à l'école Daniel Faucher – Toulouse), **François CHERIGNY**, **Marc DUBREUIL**, **Gérard GAUDRY**, **Jean GONZALEZ**, **Claude HOMPS**, **Eric SAULIERES**
Professeurs au Lycée Déodat de Séverac - 31076 Toulouse cedex 3

« **L'Education au Développement Durable est un enjeu essentiel dans les pratiques pédagogiques actuelles** ». Ce projet pédagogique autour des énergies renouvelables comme le solaire permet aux équipes enseignantes de fédérer les ambitions pour nos élèves en phase d'orientation. Je félicite les enseignants pour leur engagement et leur motivation qui à partir d'activités autour d'expérimentations et de réalisations d'élèves sur des véhicules solaires remporte chaque année un très grand succès et suscite des vocations vers des métiers plein d'avenir.

Bernard ROYANNAIS – Inspecteur Pédagogique Régional Sciences et Techniques Industrielles – Académie de Toulouse

Résumé : Pour la quatrième année consécutive, Planète Science Midi –Pyrénées, le lycée Déodat de Séverac et la Cité de l'Espace organisent les Défis Solaires de l'Académie de Toulouse.

21 lycées techniques ; 7 collèges et 2 écoles primaires se sont engagés dans l'étude et la réalisation de mini véhicules utilisant exclusivement l'énergie solaire pour se déplacer.

Tout en respectant le cahier des charges imposé par les organisateurs, des équipes d'enseignants et leurs élèves s'engagent sur une durée de 1 an dans un véritable projet appelant performance et efficacité dans plusieurs domaines technologiques : mécanique, informatique, électrotechnique et électronique.

Les Défis solaires représentent un formidable moment de valorisation du travail d'équipe effectué pendant l'année ; une journée rythmée par de nombreuses manches et épreuves adaptées aux différents niveaux mettant en compétition les différents prototypes réalisés.

La qualité du travail accompli par les élèves et leurs enseignants concrétisé lors de ce rassemblement au succès croissant, conforte la légitimité de la démarche de projet intégrée dans les enseignements.

1. L'historique des Défis Solaires de Midi Pyrénées

- 2004/2005

Création du challenge inter établissements au niveau académique : 7 lycées techniques ont participé à la première édition.

- 2005/2006 : 12 établissements étaient présents le jour des épreuves.
- 2006/2007 : 14 lycées présents. Intégration du premier degré et des collèges aux épreuves des « Défis Solaires » avec un cahier des charges spécifique.
- 2007/2008 : 17 lycées techniques et professionnels présents.

2 écoles primaires engagées (en expérimentation cette année) et 7 collèges.



Figure 1 : l'épreuve de slalom



Figure 2 : l'épreuve d'endurance

Pour le lycée Déodat de Séverac le Défi solaire est un moyen de promotion des Options ISI et ISP.

Le projet de réalisation de véhicules solaires radiocommandés en lycée est né avec des classes de secondes ISI (Initiation aux Sciences de l'Ingénieur) et ISP (Informatique et Systèmes de Production).

Il est cependant assez riche en contenu pédagogique pour être entrepris avec d'autres niveaux scolaires et dans d'autres cadres :

- par les classes de premières et de terminales SSI (Scientifiques option Sciences de l'ingénieur) à travers des dispositifs comme les TPE (Travaux Personnels Encadrés), ou les PPE (Projet Pluritechnique Encadré) ;
- par les Sections de Techniciens Supérieurs en projet de type industriel ;
- par les lycées professionnels au travers des PPCP (Projet Pluridisciplinaire à Caractère Professionnel).

2. Participer aux « Défis solaires » le principe

Les enseignants qui souhaitent participer aux Défis solaires trouveront tous les éléments sur les sites Internet réalisés par l'association Planète Sciences Midi-Pyrénées et le Lycée Déodat de Séverac.

- Le site de l'Association permet de connaître les caractéristiques techniques des véhicules dans la catégorie choisie et la nature des épreuves des différents défis.

<http://www.planete-sciences.org/midi-pyrenees/solaire/Midi-Pyrenees/index.html>

- Le Site du lycée Déodat de Séverac apporte les renseignements techniques permettant de réaliser un véhicule de base.

http://pedagogie.ac-toulouse.fr/lyc-deodat-toulouse/deodat_html/defi_solaire/index.htm



3. Exploitation pédagogique en primaire

Cette année, les 17 élèves de la classe de CM1/CM2 de l'école Daniel Faucher 2 ont participé à la première édition des défis solaires écoles

élémentaires, organisée par Planète Sciences. L'idée de départ était de faire travailler ensemble une classe de CM et une classe de 6ème du collège voisin, dans le cadre de la liaison école – collège

L'objectif principal de l'action avec le collège est de faciliter l'adaptation des écoliers à leur entrée en 6ème en les familiarisant notamment avec les lieux. Cela permet également d'uniformiser les pratiques lors des rencontres et de construire des outils communs aux CM et aux 6èmes : démarche d'investigation, cahier d'expériences, vocabulaire spécifique, méthodologie,...

Le thème retenu dans le cadre de ce projet était : technologie et maîtrise de la langue. Les enseignants ont décidé de travailler sur le déplacement de véhicules en accord avec les programmes de cycle 3 et ceux de 6ème. La méthode utilisée en classe est celle de la démarche scientifique expérimentale : pour un problème donné, les élèves émettent des hypothèses et les vérifient par l'expérimentation (travail de recherche type « Main à la Pâte »).

Entre novembre et mars, le projet a été ponctué par deux rencontres entre les collégiens et les élèves de CM. Elles ont permis de passer de l'élaboration d'un véhicule qui roule grâce à l'énergie électrique stockée à un véhicule qui roule grâce à l'énergie solaire (voir figure 3).

Organisation des rencontres :

Thème développé par la classe de 6ème : un aéro-rouleur.

- Première rencontre : comparaison des réalisations respectives.

A la suite de cette première rencontre, les élèves du CM ont posé des questions aux élèves de 6èmes afin de résoudre certains de leurs problèmes (comment faire pour que la voiture roule droit ? comment faire pour qu'elle roule sans qu'on la pousse ?).

- Deuxième rencontre : réponses aux problèmes soulevés et présentation des améliorations apportées sur les véhicules (carrosserie essentiellement).

Pour ajouter de l'intérêt et de la motivation au projet, il a été décidé que la classe de CM participerait aux défis solaires de Planète Sciences. Pour la préparation à la course et le perfectionnement des véhicules, le lycée Déodat de Séverac a organisé des rencontres entre les enseignants des écoles et ceux du lycée et des rencontres entre écoliers et lycéens.

Le projet s'est concrétisé le 30 mai, jour des courses des défis solaires à la Cité de l'Espace, où les

élèves de Daniel Faucher 2 se sont mesurés à l'école de Saint-Lys (village de l'agglomération toulousaine).



Figure 3 : véhicules solaires filoguidés des primaires

4. Exploitation pédagogique en seconde option ISI/ISP

L'utilisation des défis solaires a favorisé un fonctionnement original de travail au sein de l'établissement.

En effet, chaque année depuis trois ans, des professeurs de spécialité technologique et des professeurs d'enseignement général se réunissent pour constituer une équipe pédagogique complète qui prendra en charge une classe de seconde ISI/ISP à thème « Energies Renouvelables et Développement Durable » (ERDD).

Tout au long de l'année scolaire, chaque enseignant s'engage à privilégier ce thème dans sa matière et à participer tous les 15 jours à 2 heures d'atelier ERDD.

Les emplois du temps de tous les professeurs de cette classe sont aménagés pour dégager ces 2 heures au même horaire pour l'ensemble de l'équipe. (Ce créneau bénévole est parfois récompensé par quelques HSE).

Pendant cet atelier, l'ensemble de l'équipe se répartit les élèves en 3 groupes : fabrication, conception et communication.

4.1. Fabrication mécanique

L'objectif de cet atelier est de réaliser la partie mécanique du véhicule solaire de l'année et d'en assurer la maintenance pendant la course.

C'est ainsi qu'au cours des générations de voitures plusieurs matériaux ont été travaillés :

- pour les châssis et les porte cellules, bois de balsa, polystyrène extrudé, composite carbone époxy avec et sans nid d'abeille (grâce à l'aide du département composite de l'IUT GMP de Toulouse), carton, (avec le concours de l'IUT département GCE de Castres) ;

- pour les pièces fortement sollicitées, aciers, alliages d'aluminium, alliages de titane. Pour celles qui le sont moins, des polymères comme le PVC le PMMA ou le PTFE.

De nombreux procédés de mise en forme ont été utilisés tels que usinage sur machine conventionnelle ou commande numérique, pliage, soudage, injection, thermoformage ...

Intérêt pédagogique :

- découverte de nombreux matériaux et de leurs procédés de mise en forme ;
- obligation de réussite des pièces fabriquées pour permettre la poursuite du projet ;
- sanction immédiate et concrète du plus petit manque de rigueur technique ;
- mise en évidence de la nécessité de qualité totale pour la réussite des assemblages ;
- mise en évidence du recours permanent obligatoire à l'outil mathématique et physique.

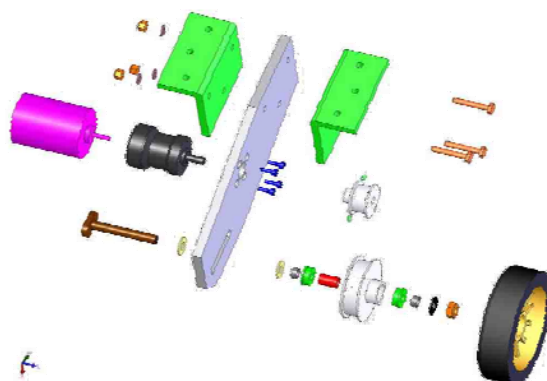


Figure 4 : vue éclatée de la transmission complète

4.2. Fabrication électrique :

L'objectif de cet atelier consiste à former un groupe d'élèves capables de comprendre la fonction de chacun des éléments de la partie électrique de la voiture (voir figure 5), de réaliser l'assemblage des différents constituants sur le prototype de l'année et d'assurer la maintenance du véhicule durant les épreuves du Défi Solaire.

Un des points forts de cet atelier réside dans la nécessité d'obtenir des connexions de qualité entre les différents éléments.

En effet, la fiabilité et les performances du prototype en dépendent.

Cette année, un autre aspect intéressant, d'un point de vue pédagogique, a été l'utilisation d'une carte de télémessure mise au point par la section de BTS Systèmes Electroniques de l'établissement.

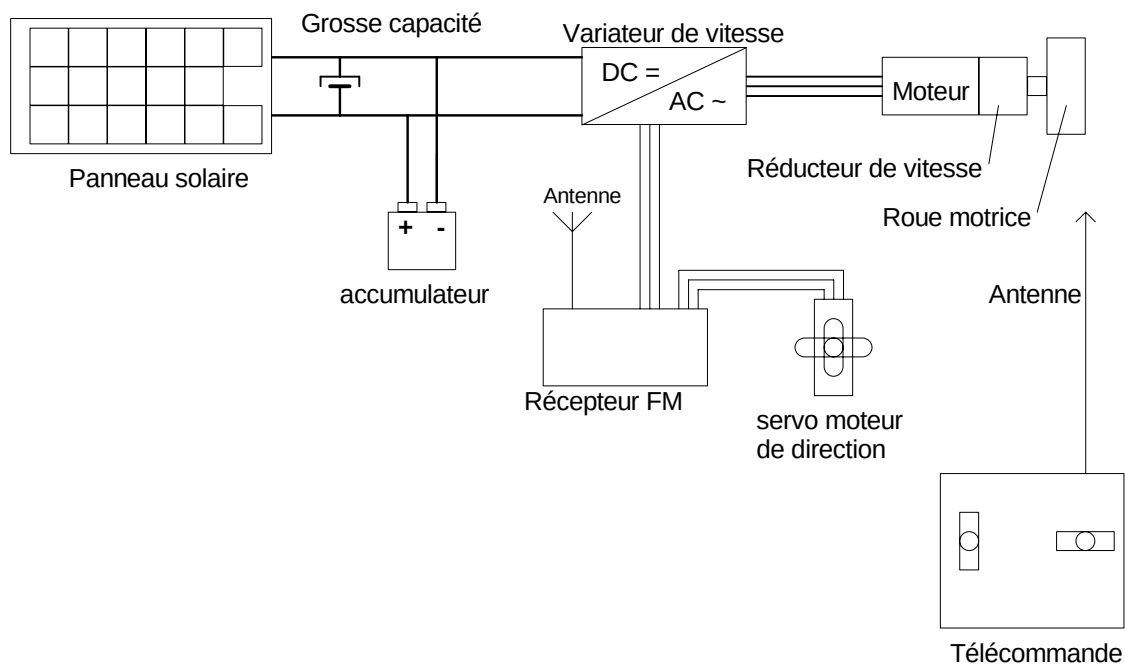


Figure 5 : synoptique d'une voiture solaire radiocommandée

Les élèves de seconde, après raccordement de cette carte sur le prototype, ont appris à utiliser les informations transmises vers un PC portable.

La connaissance de l'état de charge de la batterie en temps réel a permis d'adopter un pilotage économique en énergie pendant la course et à mieux comprendre les échanges de cette énergie entre les différents constituants.

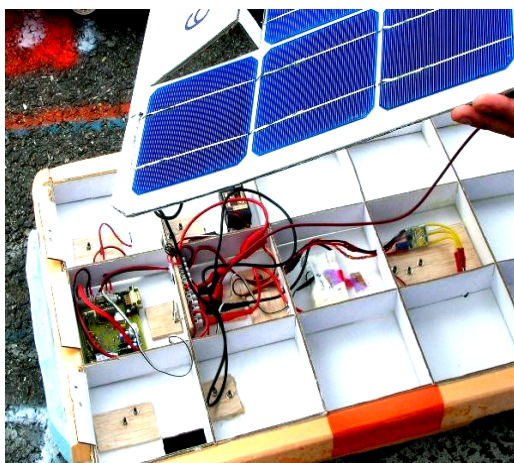


Figure 6 : les éléments électriques de la voiture 2008

- Création de présentoirs pour l'exposition des différents véhicules ;
- Comparaison des technologies utilisées sur les véhicules existants ;
- Modélisation partielle d'un véhicule solaire existant ;
- Assemblage virtuel de pièces et de sous-ensemble ;
- Production de dessins de définition en vue de la fabrication ;
- Définition d'un nouveau profil pour la carrosserie ;
- Conception d'un châssis carton utilisé sur le défi 2008 (partenariat IUT GCE Castres)-voir figure 7 ;

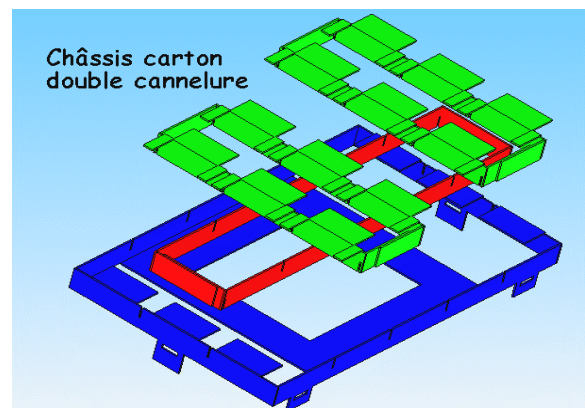


Figure 7 : éclaté des éléments d'un châssis carton

4.3. Conception :
Objectifs de cet atelier :

Intérêt pédagogique :

- Découverte du vocabulaire technique ;
- Utilisation des outils de communication technique (perspective, dessin géométral) ;
- Apprentissage et utilisation d'un modèleur ;
- Conformément aux objectifs de formation d'une filière technologique, le projet met en évidence la nécessité de relations étroites entre les pôles conception et production. La fréquence des échanges démontre que l'acquisition d'un langage technologique est incontournable pour une compréhension sans ambiguïté ;
- La découverte de ces outils de communication donne aux participants la possibilité de s'investir efficacement, et instaure le dialogue ;
- La sélection des solutions technologiques met en évidence des critères de performance de fiabilité, révèle des contraintes de délais et de fabrication ;
- Lien entre modèleur et fabrication (CFAO) ;
- Création d'une banque de données exploitable lors des séquences de TPE et PPE ;
- Réalisation de l'affiche des défis solaires ;
- Information et sensibilisation sur les énergies renouvelables et le développement durable en utilisant différents médias.

Ces activités ont débouché sur la création d'un site Internet consacré à l'atelier solaire, la tenue d'un carnet de bord sur l'avancée des travaux autour du véhicule du lycée, la réalisation d'un diaporama de présentation du projet destiné à différents publics. (participation notamment à deux forums européens et au 50 ans du CNES).

Cette année, la conception de l'affiche a été confiée à une classe de BTS Arts Graphiques 1ère année du lycée des Arènes. Des élèves de l'atelier communication sont allés présenter le projet aux étudiants, ont élaboré un cahier des charges pour orienter la conception, puis ont participé au Jury de sélection de l'affiche.

En projet :

En prolongement de l'étude fonctionnelle l'équipe souhaite faire découvrir la démarche d'éco conception tout au long du cycle de vie du produit. Le souhait de réaliser pour chaque participation au défi solaire un véhicule différent, nous a conduit à concevoir 4 châssis différents tant pour les matériaux utilisés que pour les formes définies.

Dès lors, il est possible d'inventorier les impacts environnementaux pour l'ensemble des contraintes de recyclage ou de destruction liés à nos choix technologiques, et d'aborder de manière concrète l'analyse du cycle de vie.

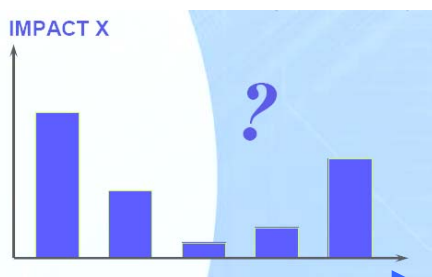


Figure 8 : étapes du cycle de vie du produit

4.4. Communication :

Cet atelier répond à 2 objectifs de communication, l'un interne et l'autre externe. En effet, les élèves doivent faire le lien entre les différents ateliers et assurer la promotion de leur travail auprès de publics divers :

- Travaux à long terme ;



Figure 9 : affiche 2008

Un autre groupe s'est rendu dans une école élémentaire de l'agglomération toulousaine afin d'expliquer, à des élèves de CM2, au travers d'expériences ludiques qu'ils avaient eux-mêmes conçues, les éléments et les principes mis en jeu dans la conception d'un véhicule solaire.

Intérêts pédagogiques :

- Travaux à long terme ;

- Transmission des savoirs et des savoir-faire ;
- Classement, archivage, autogestion ;
- Travail sur l'image ;
- Travail de traduction (anglais, espagnol).

5. Exploitation pédagogique en première et terminale Scientifique, Sciences de l'Ingénieur (SSI)

La richesse et la diversité du support que constitue la voiture solaire permettent d'alimenter de nombreux TPE et PPE des classes de SSI dans les domaines électrotechnique, électronique et mécanique.

Exemples :

- Caractérisation du panneau solaire d'un véhicule ;
- Caractérisation du moteur à courant continu d'un prototype ;
- Choix expérimental du type d'accumulateurs ;
- Dispositif de visualisation de l'état de charge ou décharge de l'accumulateur ;
- Etude d'une transmission par courroie crantée ;
- Etude de la suspension de la roue motrice ;
- ...

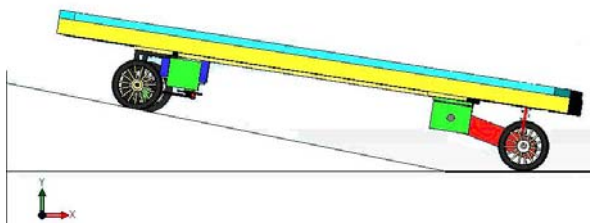


Figure 10 : modélisation de la suspension

Certaines de ces études ont permis d'aboutir à des réalisations concrètes dont ont bénéficié les divers prototypes.

6. Niveau post baccalauréat BTS 1^{ère} année Systèmes Electroniques

6.1. Cahier des charges:

Il nous a été demandé de façon récurrente depuis plusieurs années de fournir un système de télémesure dans le cadre de la course des « Défis solaires ».

L'information principale pour les concepteurs de la voiture et les pilotes est la charge de la batterie. Celle-ci est calculée par l'électronique embarquée en faisant un cumul signé de $i_{batt}(t)dt$ depuis le début de la course.

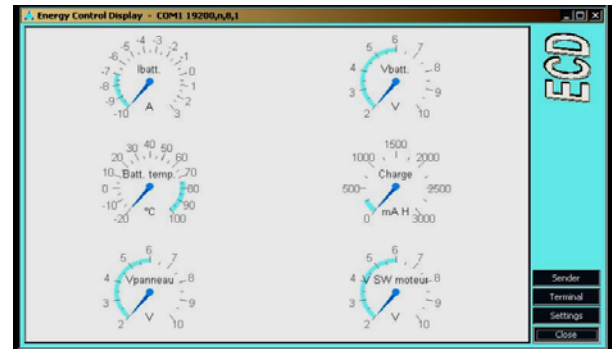


Figure 11 : copie d'écran du logiciel de réception de la télémesure

D'autres informations sont également fournies :

- La température batterie signalant éventuellement un excès de charge ;
- Le courant batterie permettant de juger de la capacité d'un pilote à économiser l'énergie ;
- Les tensions panneau solaire et batterie donnant des indications complémentaires.

6.2. Aspects pédagogiques :

Ce type de travail est trop complexe compte tenu du niveau des élèves et du temps disponible en première année. Nous sommes à la recherche d'une entreprise partenaire afin de le développer en 2^{ème} année de BTS pour répondre au cahier des charges du diplôme.

Le travail des élèves s'est donc limité à :

- Un gros travail de routage (dessin de la carte électronique) ;
- La fabrication nécessitant du soin, de la patience, et un peu d'habileté compte tenu de la taille de certains soudages ;
- Les dépannages matériels au moment des premières mises sous tension du prototype ;
- Les premiers tests du micro contrôleur (μc) embarqué (test programmation, test de quelques entrées/sorties binaires).

En préambule de l'étude, un cours a été fait sur les principes de base des cellules solaires et les problèmes les plus simples de mise à l'échelle des entrées analogiques du μc .

Le reste, calibrage des capteurs de courant et de température, recherche d'erreurs, calculs d'interface, programmation, mesure de durée d'exécution des routines utilisées, etc., a été effectué par les professeurs.

Les élèves de première année ont réalisé trois cartes et certains élèves ont passé quelques nuits sur le routage...

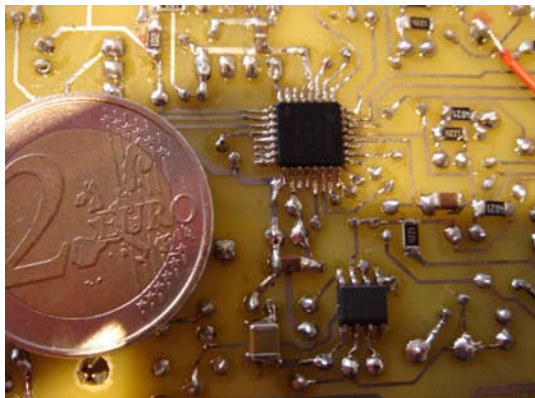


Figure 12 : le microcontrôleur de la carte

6.3. Économiser l'énergie :

La carte de télémessure qui fournit des infos importantes sur le timing (quand faut il économiser, quand faut il arrêter la charge) ne doit pas prélever une énergie significative sur le véhicule solaire.

Lors des premiers tests, on constate une consommation de presque 100mA. On supprime le MAX232 et les 2 voyants de mise sous tension (total environ 8 mA), mais le principal coupable est l'émetteur XBEE spécifié à 45mA. Il faut donc le mettre en sommeil lorsqu'il n'émet pas. L'engin étant gourmand et souvent embarqué, le fabricant a prévu de nombreux modes de sommeil (réveil par le port série, par une réception, par les deux, sommeil profond).

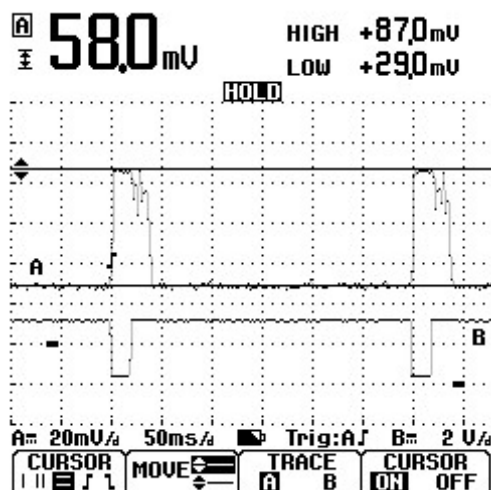


Figure 13 : voie B la commande SLEEP et voie A le courant d'alimentation.

On constate un écart de 58mA entre les phases de sommeil (29mA) et les phases d'émission (87mA). La figure 13 montre qu'il se réveille vite mais s'endort lentement. Cependant, le rapport cyclique reste faible

($\approx 10\%$), entraînant un gain significatif avec une consommation moyenne de 35mA (dont 6mA pour XBEE) qui nous semble acceptable.

Autres pistes à l'avenir :

Le plus gros consommateur est maintenant le μC (20mA typique). Alimenter le μC en 3,3V limite sa fréquence maxi mais ramène sa consommation vers 8 mA. Cela aurait en plus l'avantage de garantir les mesures de ADC exactes jusqu'à des tensions « batterie très basses ». Il faut néanmoins trouver un ampli de shunt bidirectionnel précis et répandu, fonctionnant en 3V. On pourrait envisager d'utiliser aussi les modes de sommeil ou demi sommeil du μC mais ceci rendrait plus complexe une future communication bidirectionnelle entre le PC distant et la carte sachant que les temps possibles de repos du μC sont plus courts que pour l'émetteur.

Autres aspects énergétiques :

Le rendement des batteries NiMh semble excellent ($\approx 90\%$) d'après les premières mesures réalisées.

6.4. Aspects matériels

La réception côté PC s'effectue en utilisant la carte USB du starter kit des modules XBEE. Cette carte génère un port COM fictif sur le PC qui peut être utilisé par n'importe quel logiciel prévu pour un port série. Le logiciel d'affichage utilisé sur le PC est l'adaptation d'un affichage existant fourni par une entreprise.

7. Niveau post baccalauréat BTS 2^{ème} année Génie Optique Photonique

Dans le cadre des projets industriels de deuxième année, une équipe a travaillé sur la conception et la réalisation d'un banc de caractérisation des cellules photoélectriques. Il s'agissait de mettre en évidence la réponse des différentes cellules dans les domaines suivants : éclairage, inclinaison angulaire et température de fonctionnement.

Ce banc a ensuite été agrémenté de filtres pour avoir un ordre de grandeur du rendement des cellules dans les diverses longueurs d'ondes du spectre solaire.

8. Conclusion

A l'occasion des réunions bilans entre enseignants nous avons souvent cherché à analyser l'engouement que suscitait ce projet.

Nous pensons qu'il a des atouts multiples.

En proposant la mise en œuvre de solutions technologiques permettant de réduire la consommation

d'énergies fossiles, ce projet se place au centre de l'actualité et intéresse autant les adultes que les jeunes.

L'utilisation d'une démarche de projet sur une année de l'ensemble de l'équipe pédagogique d'une classe :

- Favorise les échanges entre enseignants ;
- Crée des relations hors cadre scolaire entre les professeurs et les élèves ;
- Améliore les ambiances de cours ;
- Permet à certains jeunes de s'approprier des connaissances générales qu'ils auraient peut être moins bien appréhendées dans un contexte scolaire plus classique ;

D'autre part, la programmation de la course en fin d'année permet, de réaliser une progression pédagogique intéressante et constitue une récompense au travail fourni.

La perspective de la compétition est aussi une motivation pour la plupart des élèves par son côté ludique et peut-être en raison d'un pilotage de la voiture proche de l'univers des jeux vidéo.

Les « Défis Solaires » sont aussi un moyen de promotion de la culture scientifique et technique auprès du grand public et permettent de développer des partenariats diversifiés entre le monde universitaire, scientifique, associatif et le monde industriel.

En créant des liens inter établissements et inter niveaux (primaire – lycée) (collège – lycée) (lycée – Post bac) ce projet participe à la mise en place d'une politique de culture scientifique et technique et favorise l'orientation des jeunes vers des filières actuellement déficitaires.

Parcourir le maximum de kilomètres avec seulement 0.22m² de cellules solaire est un vrai Défi. On peut espérer que ce projet contribue à la recherche systématique de la meilleure efficacité énergétique possible de tous les systèmes, démarche qui doit être au cœur de la culture des techniciens de demain.

Références

[1] Jean-Marc Jancovici, Alain Grandjean

Le plein s'il vous plait !, Ed. Le Seuil, février 2006

[2] *Transport et négaWatt, le chemin pour une mobilité maîtrisée*, <http://www.negawatt.org/>

[3] A. Labouret, P. Cumunel, J.P. Braun, B Faraggi

Cellules solaires, les bases de l'énergie photovoltaïque
4^{ème} édition, ETSF

[4] *Projet de véhicule solaire Solelhada de l'INP de Toulouse* <http://solelhada.inp-toulouse.fr/>

[5] MC68HC908GZ16 Data Sheet

[6] Xbee 802.15.4 modules product manual

[7] AD8210 high voltage bidirectional current shunt monitor data sheet

Supervision des systèmes de la zone Electrotechnique

Invitation au contrôle-commande via le réseau Internet

Patrice MICHEL

Lycée Déodat de Séverac, 26, Bvd Déodat de Séverac BP 97612, 31076 Toulouse Cedex 3

patrice.michel@ac-toulouse.fr Adresse

Résumé : La rénovation du référentiel de BTS électrotechnique a contribué à l'évolution de notre environnement de travail, particulièrement dans la zone d'essais de systèmes. La généralisation de systèmes communicants nous amène naturellement à proposer des sujets qui permettent d'aborder le contrôle et la commande de systèmes automatisés et plus généralement des process industriels grâce aux technologies de l'Internet. Ce travail porte sur la mise en place d'un réseau LAN dans la zone électrotechnique de la section TS du lycée Déodat de Séverac à Toulouse afin de superviser le fonctionnement de trois de nos systèmes. Cette plateforme expérimentale devra permettre d'appréhender ces nouvelles technologies de l'Internet qui font partie désormais de notre univers d'électrotechniciens.

Introduction : Les fonctions du contrôle et de la commande des procédés sont d'assurer sa surveillance et sa maîtrise mais aussi la maintenance d'installations réparties sur différents sites parfois très éloignés les uns des autres. L'intégration des bus de terrain dans les architectures de contrôle et de commande industrielles semble être la genèse de cette évolution. Cette intégration a eu pour conséquence de standardiser les périphériques dits « intelligents » comme les automates programmables industriels qui disposent désormais d'interface Modbus. L'évolution et la généralisation des technologies de l'Internet a gagné le monde industriel si bien qu'aujourd'hui Internet semble être le meilleur vecteur pour contrôler, commander et mesurer à distance, à partir d'une simple page HTML et depuis n'importe quel terminal, en milieu industriel comme en domotique [1].

L'enseignement des essais de systèmes a bien évolué ces dernières années. Faisant suite à la rénovation, des équipements électrotechniques communicants avec serveur Web ont pris place dans notre environnement de travail. C'est dans ce contexte que s'inscrit cette activité menée par trois étudiants dans le cadre d'un projet de deuxième année de BTS électrotechnique (épreuve E5).

Les objectifs de ce projet comme son exploitation sont « multiformes » et incomplètement définis partant d'un constat qu'il eût été regrettable de ne pas mettre en œuvre l'aspect communicant de nos systèmes. D'un point de vue pédagogique, il a pour but de disposer d'une plateforme qui intègre des technologies innovantes qui se sont imposées dans l'industrie

valorisant du même coup la formation vis-à-vis de nos étudiants.

Le cahier des charges prend en compte les exigences sous-jacentes liées à l'application et son contexte, soit :

- une interface homme machine ergonomique et conviviale avec des menus déroulants intuitifs ;
- une émulation de système et de son bandeau de commande. Cela signifie que l'on devra avoir une image en temps réel de l'état du système et de sa signalisation sur la console de supervision ;
- de pouvoir paramétrer le système de la console, la notion de distance vis-à-vis du matériel doit disparaître.

1. Architecture du réseau :

La pose du LAN interne à la zone ainsi que la mise en place de l'armoire de brassage ont fait l'objet d'une épreuve de chantier (Figure 1). Le réseau a pour élément central la plateforme de communication et interface homme machine G308C de Redlion [2]. Cette console à écran tactile est un superviseur équipé d'un système d'exploitation dédié. Elle supporte une plateforme communicante, un convertisseur de protocole ainsi que de 5 ports de communications RS232/422/485, un port USB et Ethernet. Elle donne la possibilité à des produits différents de communiquer ensemble et en particulier avec un automate programmable industriel équipé d'un coupleur Ethernet. Pour ce qui est de sa programmation, le logiciel dédié « Crimson » est conçu pour fournir un accès « rapide et simple » aux fonctionnalités du

contrôleur modulaire. Il est aussi compatible avec les dernières versions de Microsoft Windows. Le nœud local, constitué par un switch industriel, permet d'interconnecter la console G308C ainsi que les systèmes suivants¹ :

« SURPRESSICC » de la société Astriane, qui

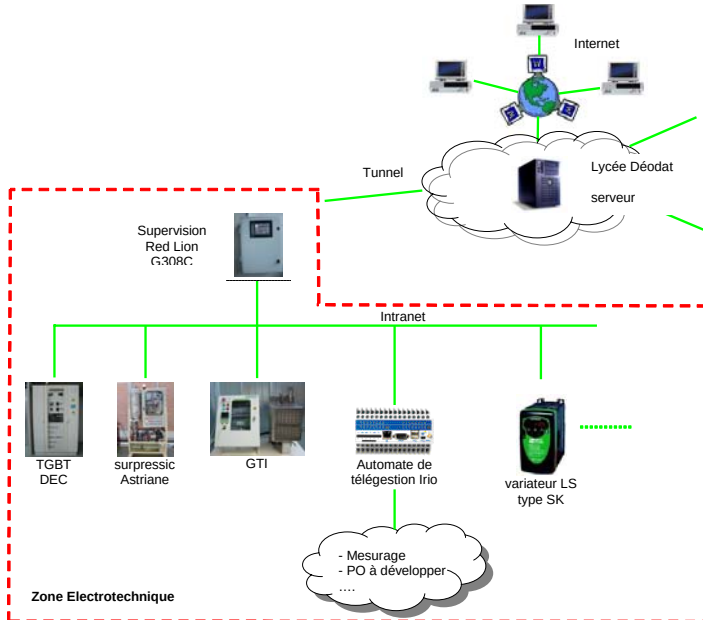


Figure 1 : architecture du réseau

reproduit à échelle réduite une station de pompage et de distribution d'eau.

« TGBT » de la société DEC qui représente le Tableau Général Basse Tension d'une entreprise équipé d'un circuit de secours alimenté par un groupe électrogène.

Le système « BAIN REGULE » en température de la société GTI est représentatif d'un sous-système « chaîne de traitement de surface ».

Afin d'avoir un réseau ouvert pour le contrôle et la commande de parties opératives quelconques, un automate de télégestion industriel modulaire et évolutif Irio de la société Napac (appartenant maintenant au Groupe Schneider Electric) complète notre réseau local. Il est compatible avec les principaux matériels de contrôle commande existants et est équipé de 3 liaisons série, et d'un port Ethernet. Cet automate multi-communicant dispose d'entrées-sorties TOR et analogiques. Un bornier déporté permet de rendre accessible les entrées-sorties de l'Irio. Il permet d'envisager le contrôle et la commande à distance de PO développés ou mises en œuvre dans le cadre d'enseignements spécifiques ou d'épreuves de chantier.

Précisons enfin, qu'une caméra IP permet d'avoir un retour vidéo du système pris en main par la console de supervision, qu'une GTB ainsi qu'un variateur de vitesse Digidrive de la série SK sont sur le réseau mais hors projet.

1.1. Présentation des systèmes

pédagogiques installés sur le réseau

SURPRESSICC : Cette station de pompage (Figure 2) et de distribution d'eau didactisée permet de traiter les thèmes d'application tels que :

- commande de moteurs ;
- détection de défauts ;
- régulation de niveaux et de pression ;
- choix mode de fonctionnement ;
- sécurités.

Le support de cet équipement est constitué d'un châssis qui présente en partie basse un réservoir d'eau (bâche à eau) dans laquelle le pompage est effectué en circuit fermé. Au dessus de la bâche sont installées sur une platine les deux pompes, l'une est à vitesse fixe et l'autre, commandée par un variateur, est à vitesse variable. Le châssis est équipé de nombreux matériels de mesure tel qu'un contrôleur de débit, un débitmètre analogique, des vannes et électrovannes de distribution, manomètre et détecteurs de niveau. En partie haute, à gauche, se trouve fixé un réservoir de stockage sous pression ainsi que le coffret de contrôle commande installé à sa droite. Cette partie comprend également l'équipement du bandeau de commande et de signalisation. La consommation d'eau est simulée par trois circuits différents :

- Un circuit « débit normal » qui comporte quatre points de distribution, équipé chacun d'une électrovanne qui en commande l'ouverture et la fermeture,
- Un circuit « gros débit » équipé d'une vanne manuelle,
- Un circuit « fuite permanente » équipé d'une vanne manuelle.

Chacun des trois circuits est relié à la bâche où retourne l'eau distribuée. Le système « Surpressicc » illustre assez bien les problématiques rencontrées en hydraulique et particulièrement dans les applications de type pompage à vitesse variable (débit, hmt et rendement). D'autre part, il se prête très bien à notre problématique de contrôle-commande.

¹ Ce choix permet d'assurer une couverture importante de l'ensemble des compétences du référentiel.

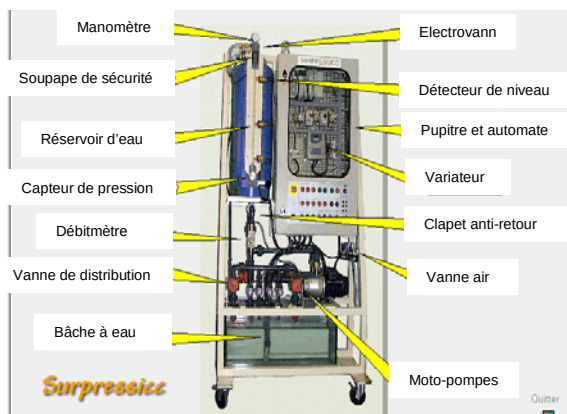


Figure 2 : système Surpressicc

TGBT : Ce système (Figure 3) est le Tableau Général Basse Tension de la zone chantier de la section TS. Il est équipé d'un circuit de secours qui permet son alimentation grâce à un groupe électrogène. La supervision et l'automate présent dans le TGBT gèrent la commutation entre la source normale et la source secours ainsi que le délestage des différents départs motorisés. Une centrale de mesure relève en permanence les informations relatives à la consommation des équipements alimentés par le TGBT. Le logiciel de supervision est en communication avec l'automate (Wago) par liaison Ethernet TCP/IP. Il permet la visualisation des différentes grandeurs de la centrale de mesure ainsi que le pilotage manuel de l'inverseur de sources et des 4 départs motorisés. Le TGBT dispose, sur le coté gauche, d'un connecteur RJ45 encastré pour le raccordement du réseau TCP/IP.

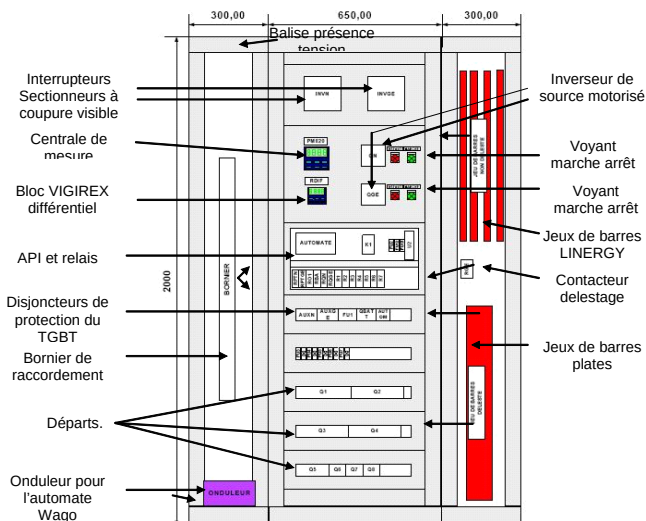
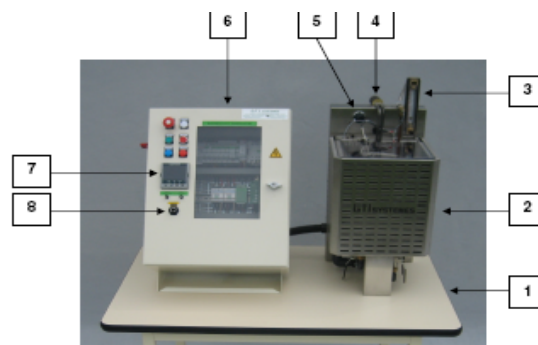


Figure 3 : système TGBT

Ce point de connexion est utilisé pour le raccordement de l'ordinateur de supervision, pour la programmation de l'automate Wago, dans notre cas il est relié au switch placé dans l'armoire de brassage.

Bain régulé GTI : Ce système (figure 4) est représentatif d'une chaîne de traitements de surfaces. Il est constitué d'une cuve d'une capacité de 25 litres d'eau. Le chauffage de ce volume est assuré par un thermoplongeur type amovible monophasé 3 kW 220 V 50 Hz constitué d'un tube blindé enroulé en spirale horizontale au fond du bac. Un récipient cylindrique en acier inoxydable pouvant recevoir directement ou au travers d'une isolation une perturbation de 3,7 litres d'eau permet d'étudier la réponse indicielle du système et éventuellement de le modéliser. Les applications pédagogiques sont nombreuses et permettent une étude approfondie des phénomènes électrothermiques en introduisant des notions aussi variées que la résistance thermique, les analogies thermique-électrique, la régulation de température, ... Le contrôle du bain est assuré par un régulateur numérique communicant de marque Eurotherm.



- 1 : Table multifonctions
- 2 : Partie Opérative
- 3 : Débitmètre à flotteur
- 4 : Thermoplongeur
- 5 : Thermostat
- 6 : Coffret de commande
- 7 : Régulateur numérique
- 8 : Connecteur RJ45 (Ethernet) relié au régulateur

Figure 4 : système GTI

1.2. Configuration des matériels et mise en œuvre du réseau

Les systèmes mis en réseau possèdent tous une adresse IP, mais Surpressicc comme TGBT ont un mode de fonctionnement supervisé et disposent de pages HTML dans le serveur WEB embarqué (module ETZ 510 pour Surpressicc). Cette situation relève de l'exception et de nombreux systèmes n'ont qu'une adresse IP comme « BAIN REGULE » de GTI, mais aussi le variateur mis sur le réseau. La supervision n'utilise donc pas cette fonctionnalité lorsqu'elle existe. Un environnement graphique spécifique est développé à l'aide du logiciel Crimson et permet d'avoir la main

sur chacun des systèmes en émulant la PO aussi que le bandeau de commande sur l'écran tactile.

La supervision d'un système automatisé est une contrainte qui doit être prise en compte du cahier des charges à la programmation. La console G308C n'a aucune vue sur une sortie de l'automate (par exemple), par contre, elle est capable de positionner des mots ou des bits. Ainsi, les entrées-sorties de l'automatisme devront être l'image du contenu d'une « boîte aux lettres » accessible du bandeau de commande ou de la console. Il conviendra donc qu'à chaque sortie physique soit associée une variable de type booléenne (%Mi) ou mot (%MWi) de la mémoire de l'automate qui est une copie de l'entrée ou de la sortie correspondante. Cette façon d'étudier et de concevoir un système automatisé a aussi le mérite de le rendre « ouvert » donc facilement accessible. Cette évolution du modèle fonctionnel est fastidieuse mais nécessaire, elle le rend compatible avec l'outil de supervision qu'il ne reste plus qu'à configurer.

Configuration : L'écran principal de la console indique les icônes qui sont utilisées pour configurer les différents aspects du comportement du contrôleur modulaire G308C. Nous présentons brièvement la fonction de trois icônes qui sont nécessaires pour la plupart des applications.



MODULES : Cette icône est utilisée pour configurer les modules dans le système. On peut alors accéder à chaque module pour configurer ses propriétés

spécifiques.



COMMUNICATIONS : Cette icône sert à indiquer les protocoles qui sont utilisés sur les ports série et sur le port Ethernet. Il sert également à déplacer des données d'un périphérique distant à un autre via le convertisseur de protocole de la console.



ETIQUETTES DE DONNÉES : Cette icône est utilisée pour renommer les éléments de données à partir des modules, mais aussi pour définir les éléments

auxquels on accède dans les périphériques distants (les bits et les mots évoqués ci-dessus). Chaque étiquette possède différentes propriétés qui lui sont associées. La propriété de base est la mise en forme des données, utilisée pour définir la façon dont les données contenues dans une étiquette s'affichent dans l'IHM virtuelle du maître et sur les pages Web. Les propriétés d'étiquette plus avancées comprennent, entre autres, des alarmes qui peuvent s'activer lorsque différentes conditions relatives à l'étiquette se produisent.

Le système à superviser a maintenant son modèle compatible avec la console qui vient d'être prise en main. Nous disposons de la correspondance entre les entrées-sorties physiques et les mots ou bits internes du système. La configuration de la console est désormais une procédure récursive systématique qui s'applique à chacun de ces mots ou bits internes. Une étiquette de données est une entité nommée, un mnémonique, qui représente l'élément de donnée dans le maître, la console. L'étiquette est, en quelque sorte, « mappée » sur sa variable correspondante dans le registre du périphérique distant, l'automate par exemple, sa création est décrite ci-dessous :

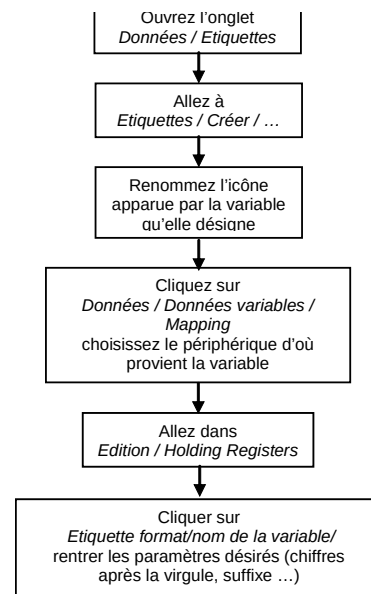


Figure 5 : création d'une étiquette

Cette description passe sous silence les problèmes rencontrés de configurations tels que le choix du port de communication, de paramétrage d'adresses IP, de sélection de pilote,...qui font désormais partis des problèmes quotidiens.

Présentation de l'IHM : L'étude de l'interface Homme-machine doit être le résultat d'un compromis cognitif entre ergonomie, compacité et mise en œuvre intuitive. Il se présente sous la forme d'une page « menu général » accessible grâce à un mot de passe qui nous est demandé dès la connexion à la console de supervision G308C. Ce « menu général » propose quatre choix :

- Surpressicc ;
- Irio (l'automate de télégestion qui porte aussi la vidéo) ;
- Bain régulé ;
- TGBT.

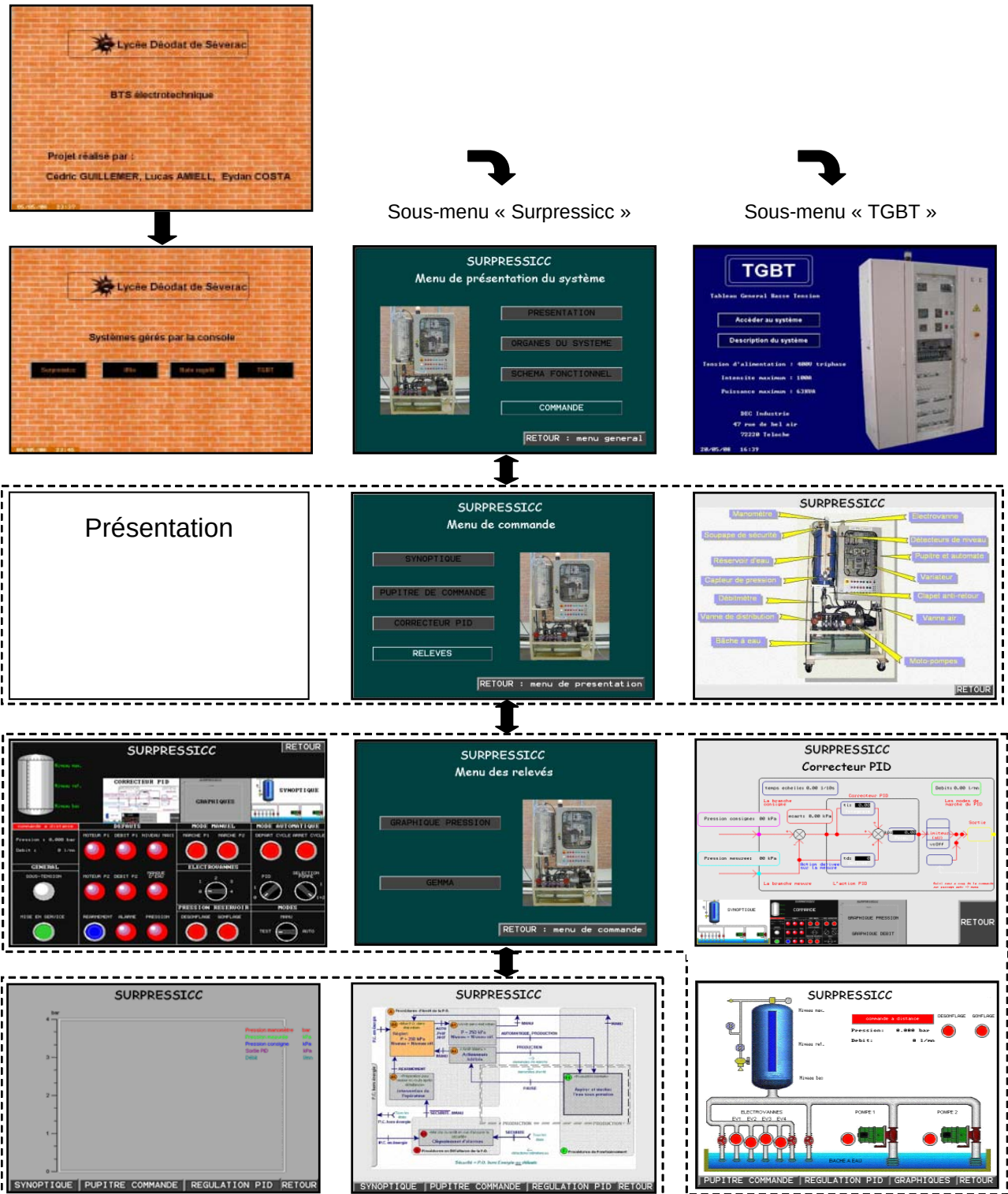


Figure 6 : Structure partielle de l'IHM pour le système "Surpressicc"

La sélection d'un de ces systèmes donne accès à une page de menus et sous-menus hiérarchisée qui permet :

- de prendre la main sur le contrôle et les commandes du système sélectionné comme on pourrait le faire en présentiel devant le système (commande des actionneurs, modification des paramètres,...) ;
- l'observation dynamique de différentes grandeurs physiques ;
- de faire du mesurage et des relevés graphiques (représentations temporelles) ;
- de configurer des alarmes.

Les IHM associés à chacun des systèmes sont tous conçues de la même façon. Ainsi, dans le cas de « Surpressicc », le sous-menu associé (Figure 5) donne accès à trois choix possibles qui sont de type informationnel. L'un d'entre eux, « contrôle et commande », propose quatre autres choix :

- « synoptique » est une représentation symbolique du système. Certaines des grandeurs physiques sont mises à jours de façon dynamique (pression, débit, état des pompes, niveau d'eau dans la cuve,...). Les électrovannes peuvent être commandées simultanément ;

- « correcteur PID » est une page qui représente le modèle du système. Les paramètres caractéristiques (erreur, consigne, mesure, paramètres du correcteur PID) apparaissent dans une fenêtre et peuvent être modifiés de façon dynamique ;

- « pupitre de commande » nous permet d'avoir la main sur le contrôle et la commande du système (commande des pompes, vidange de la cuve, fonctionnement automatique ou manuel, boucle ouverte ou fermée,...) ;

- une dernière page donne accès à deux autres choix : Le « Gemma » et à un menu « relevés graphiques » qui permet de suivre et de représenter une grandeur physique en fonction du temps sur un horizon paramétrable.

2. Aspects pédagogiques

Les installations électriques peuvent être maintenant pilotées par un réseau de communication afin d'avoir la flexibilité et la gestion énergétique. Les constituants des départs-moteurs sont devenus des éléments communicants reliés à des réseaux de terrain. Les courants faibles sont désormais au service des courants forts et les compétences de l'électrotechnicien ont profondément évolué et se sont « transversalisées ». Les acteurs de l'éducation ne sont pas restés statiques et de ce point de vue le

« référentiel » (et particulièrement le « repère pour la formation ») s'est adapté et recommande désormais la mise en œuvre de « systèmes communicants délocalisés » ; c'est un des trois aspects des savoirs technologiques et professionnels (et deux des six thèmes des savoirs technologiques, électrotechniques et professionnels développés dans le référentiel). Initialement, l'objectif se limitait à proposer un sujet dans le strict cadre des projets de deuxième année, un sujet techniquement intéressant, probablement porteur et dans l'air du temps. Le nombre d'intervenants extérieurs qu'il a suscité pour sa mise en œuvre lui a donné un intérêt multiforme. Outre le fait qu'il a permis de prendre acte sur la nécessité de connaître mais aussi de maîtriser ce qu'il convient d'appeler « les nouvelles technologies du WEB » largement répandues dans le domaine industriel, il donne à la section un outil de travail qui permet de valider plusieurs compétences et savoir-faire du référentiel. Ces objectifs présentés dans le tableau ci-dessous nécessitent des pré requis sur les équipements communicants et les automatismes industriels.

D'un point de vue « essais de systèmes », ce projet a permis de les intégrer dans une architecture de contrôle et de commande de type « supervision d'atelier » qui doit encore évoluer.

Le développement croissant des TIC risque de bouleverser les méthodes, concepts d'enseignement, l'organisation du groupe, le mode de travail. Des plateformes technologiques existent déjà dans plusieurs établissements [4] et ont permis de mettre en place des « expériences pédagogiques originales de télé-TP ».

L'objectif est ici de proposer aux étudiants les moyens d'acquérir un savoir-faire partiel sur le sujet à traiter dans le cadre d'un travail préparatoire en vue de se consacrer principalement aux problèmes de fond pendant la séance en présentiel devant le système. Dans ce cadre précis, un ordinateur individuel connecté au « réseau » permet d'avoir accès à un simulateur de PO. Il ressort de cette expérience que la séance préparatoire de télé-TP apporte de la valeur ajoutée. S'inspirant de cette démarche, d'initiatives semblables [5], [6], [7], et comme une suite logique à ce projet, le lycée Déodat de Séverac et l'entreprise Ramonvilloise DMS vont, dans le cadre d'un partenariat, étudier et mettre en place une plateforme technique expérimentale. L'objectif de cette collaboration, qui fera de Déodat un lycée pilote en la matière, est la mise en place d'une architecture matérielle qui aura pour but de faire intervenir plusieurs apprenants simultanément sur un même système.

Cette proposition est inspirée du projet ambitieux dénommé « DIWEB » de la société DMS qui vise aussi, à moyen terme, à la réalisation de TP en dehors de la plateforme.

3. Conclusions et perspectives

Le groupe à charge de ce projet s'est investi sans compter pour le mener à terme. Le planning prévisionnel est tenu et les problèmes techniques concernant la mise en place d'un tunnel à travers le pare-feu du lycée Déodat sont résolus. A ce jour nous envisageons de donner une suite à la structure mise en place, qui reste « expérimentale », sous les trois formes suivantes :

Valorisation du travail effectué grâce à la mise en place d'un partenariat avec l'entreprise DMS qui développe et commercialise du matériel d'assistance à l'enseignement. Son objectif reste à préciser mais on peut d'ores et déjà dire qu'il devrait porter sur l'utilisation des technologies du WEB dans le cadre des essais de systèmes. Une innovation pédagogique qui fait suite à notre démarche de projet.

L'étude et l'intégration d'une IHM sécurisée qui permettra d'interfacer la console de supervision G308C avec le réseau Internet. Il devrait permettre un accès sécurisé à notre zone et à certains de ses systèmes du réseau Internet.

La mise en place d'un lien avec notre zone à partir du site Web du lycée.

4. Remerciements

Je tiens à remercier les collègues de la section TS du lycée pour leurs conseils et leurs remarques et particulièrement Gérard Ollé pour sa relecture minutieuse. Merci aussi pour l'aide indispensable qu'a bien voulu m'accorder le service informatique, particulièrement pour la mise en place du tunnel à travers le pare-feu du lycée. L'entreprise Toulousaine FORDIATEC, station technique de RedLion, de Napac et de SAIA Burgess qui nous a conseillé pour le choix des matériels, de la supervision Redlion et pour la formation que nous avons eue qui nous a permis une mise en œuvre « rapide » de ces équipements.

Enfin, je souhaite remercier le groupe d'étudiants, Messieurs Amiell Lucas, Costa Eydan et Guillemer Cedric, qui a su mener ce projet à terme.

5. Références bibliographiques

[1] David Rey, « Contrôle, commande et mesure via Internet, Montage électronique et protocole http », Ed.Dunod, Paris, 2008

Objectifs	Mettre en œuvre :
	- un terminal de dialogue industriel (paramétrage des interfaces graphiques, choix des protocoles,...) ; - une architecture de communication (câblage, commutateurs, appareillages, adressage, protocole) ; - des équipements programmables de contrôle industriel (API, PC, variateurs,...) ; - des équipements liés au confort (gestion technique centralisée, appareillage,...) ; - des équipements Voix-Données-Images Faire communiquer des équipements programmables sur différents supports.
Compétences associées	C01 Analyser un dossier
	C04 Rédiger un document de synthèse
	C06 Respecter une procédure
	C07 Argumenter sur la solution technique retenue
	C08 Concevoir une solution technique
	C10 Réaliser les représentations graphiques nécessaires
	C14 Analyser les causes de dysfonctionnement
	C19 Identifier les paramètres de réglage
	C20 Régler les paramètres
	C31 Intervenir sur une installation (ou un système)

[2] « Redlion G308C » peut être consulté sur le site :

<http://technohim.com/rlc/07028.pdf>

<http://www.redlion.net/FR/Fran%E7ais.html>

[3] « TICE et innovation pédagogique » peut être consulté sur le site :

http://www.fing.org/jsp/fiche_actualite.jsp?STNAV=&RUBNAV=&CODE=1130829179048&LANGUE=0&RH=UPFING

[4] B. Riera, F. Gellot, O. Dubois, J.P. Chemla et S. Triki, «L'utilisation pédagogique et l'enseignement des TIC dans les automatismes », J3eA, Journal sur l'enseignement des sciences et technologies de l'information et des systèmes, Volume 4, Hors-Série 2, 13 (2005)

[5] B. Riera, F. Gellot, P. Marange, J-P. Chemla, M-S. Mouchaweh, «Un projet original en commande et supervision», CETSIS'2005, Nancy, 25-27 octobre 2005

[6] B. Riera, G. Martel, M. Lambert, E. Cherifi, «Experimental Platform for Supervision of Complex Automated Systems», Proceedings of the Seventh IFAC/IFIP/IFORS/IEA on Analysis, Design and Evaluation of MMS, pp. 305-310. Kyoto, Japon.

[7] S. Mias et P. Maussion « Pilotage à distance de systèmes industriels didactisés et évaluation de la pratique des étudiants », J3eA 7 hors série 1 (2008) 1015.

Expérimentation du pilotage à distance d'un système de tri de colis

Didier PEYTAVI, Pascal MAUSSION

didier.peytavi@toulouse.iufm.fr, pascal.mauSSION@laplace.univ-tlse.fr

IUFM Midi Pyrénées, 118 route de Narbonne, 31078 Toulouse cedex

Résumé : Cet article a pour but de décrire le travail réalisé afin de rendre « communicant » un système industriel de tri de colis Tapiris de Schneider, organisé autour d'un automate piloté depuis un réseau TCP/IP. Une expérimentation à distance a été menée en grandeur réelle avec un public d'étudiants IUFM préparant le PLP2 Génie électrotechnique et d'étudiants de BTS IRIS. L'expérimentation étudie les aspects difficulté, motivation et utilité de la séquence de formation.

Mots clés : supervision, diagnostic distant, programmation à distance, réalisation de TP distants

1. Objectifs de l'expérimentation

Des activités de supervisions et de pilotage à distance de systèmes industriels ont été mises en place à l'IUFM de Midi Pyrénées dans le cadre de projets pédagogiques innovants soutenus par l'établissement. Le pilotage à distance de processus est encore assez rarement exploité en formation [1], [2], [3], [4]. Cette année a été marquée par la mise au point technique du pilotage d'un dispositif de convoyage, avec prise en main distante de l'application PL7 pro exécutée en local [5].. Cela a été également l'occasion de mettre en place la logistique et d'organiser la communication délocalisée entre les équipes.

Ce projet, conduit en 2007-2008 a suivi les trois axes ci-dessous pour lesquels il s'agissait de :

- Expérimenter le pilotage à distance de systèmes industriels entre des établissements scolaires et l'IUFM Midi-Pyrénées,
- Se structurer en plateforme technique afin de permettre à des étudiants en cours de formation d'accéder à du matériel disponible sur le site de Rangueil de l'IUFM Midi Pyrénées et pour la réalisation de TP distants.
- Analyser l'impact d'une activité de pilotage à distance de systèmes industriels dans un parcours de formation initiale, en préparation concours,

Ces trois axes concernaient la mise en œuvre d'un convoyeur muni d'un tapis roulant avec la possibilité d'une prise en main à distance ; l'accès distant au système devant permettre à des étudiants et des professeurs stagiaires ne disposant pas du système en local, de pouvoir réaliser néanmoins des expérimentations sur le convoyeur.

2. Les apprenants au cœur du dispositif

Il s'agit de proposer ici une prise en main à distance de ressources matérielles suivant deux modes d'accès:

- Prise en main à distance via un navigateur WEB prévu de manière intrinsèque dans le système technique. Accès au système via une interface homme machine volontairement limitée à la gestion du processus et au suivi de l'état du système.
- Accès distant sécurisé au contenu du programme de l'Automate Programmable Industriel et interactions sur le fonctionnement en cours de développement et d'exploitation.

L'utilisation d'une solution de type « partage d'application ou terminal Server » rend possible la prise en main à distance de l'ordinateur qui pilote le système. Cette solution permet d'accéder au système sans forcément disposer de l'application pilote sur l'ordinateur de l'apprenant et de gérer les modalités d'accès dans le cas de plusieurs utilisateurs.

Un partenariat en BTS IRIS (Informatique et Réseaux pour l'Industrie et les Services techniques) avec l'établissement Institut de Lymérac de Toulouse à été mis en place en 2008. Les étudiants, ne disposant pas en local du système, sont intervenus sur son pilotage à distance et dans le cadre de leur formation. Ces tests hors établissement de faisabilité ont été menés avec l'outil de communication synchrone Centra [6]; une gestion distante du fonctionnement par partage de l'application PLP7 pro sous Centra a été mise en place.

En parallèle, des activités de pilotage à distance du système de tri ont été intégrées dans le module « Automatismes Séquentiels » en première année de

Thème : Applications pédagogiques - Académie de Toulouse

préparation au concours du PLP2 Electrotechnique de l'IUFM de Midi Pyrénées.

L'avancée du projet a été rythmée par les étapes suivantes :

- Mise en place des connexions distantes, de la communication entre établissements et participation en BTS IRIS et en IUFM à la création de TP de formation.
- Elaboration d'un questionnaire visant à mesurer d'un point de vue de l'étudiant, les aspects utilités et acceptabilité de TP distants par rapport à des TP effectués en présence du système.
- Réalisation des TP à distance et mise en œuvre du pilotage par les formés.
- Analyse des expérimentations menées et établissement de règles de bonne conduite du pilotage à distance.

3. Les aspects techniques de l'expérimentation

L'objectif de l'expérimentation consiste à proposer par un accès web distant, la commande et la supervision du système didactisé mais néanmoins industriel de tri « TAPIRIS » de Schneider [7] (figure 1). Ce projet a été mis en place de part la nécessité de travailler à partir de produits industriels autant d'un point de vue des équipements communicants installés et normalisés (bus de terrain, interfaces ASI de commande et actionneurs, API) que des accès sécurisés aux pages html ou applet Java du serveur web de supervision du convoyage. D'autre part, ces solutions « communicantes » de supervision qui sont commercialisées tiennent compte d'un besoin réel exprimé et s'appliquent efficacement aux processus utilisés dans l'industrie.

La partie opérative de ce système de type convoyeur emmène par l'intermédiaire d'un tapis roulant les colis au poste de lecture de codes barres pour une identification et

un tri. Les colis identifiés à l'aide d'une table de déchargement gérée à distance et repérés par un code barre peuvent être déchargés aux postes 1 et 2 prévus à cet effet ou continuer leur course vers un poste en fin de chaîne en cas d'erreur d'identification (figure 1 et 2).

La partie commande sur bus ASI est organisée autour d'un automate TSX Micro dialoguant avec l'opérateur distant via un coupleur Ethernet ETZ avec serveur Web embarqué. C'est aussi l'API qui se charge via une interface PCMCIA intégrée d'identifier les colis présents au poste de lecture afin d'établir la correspondance avec la table de desserte modifiable à distance (figure 1).

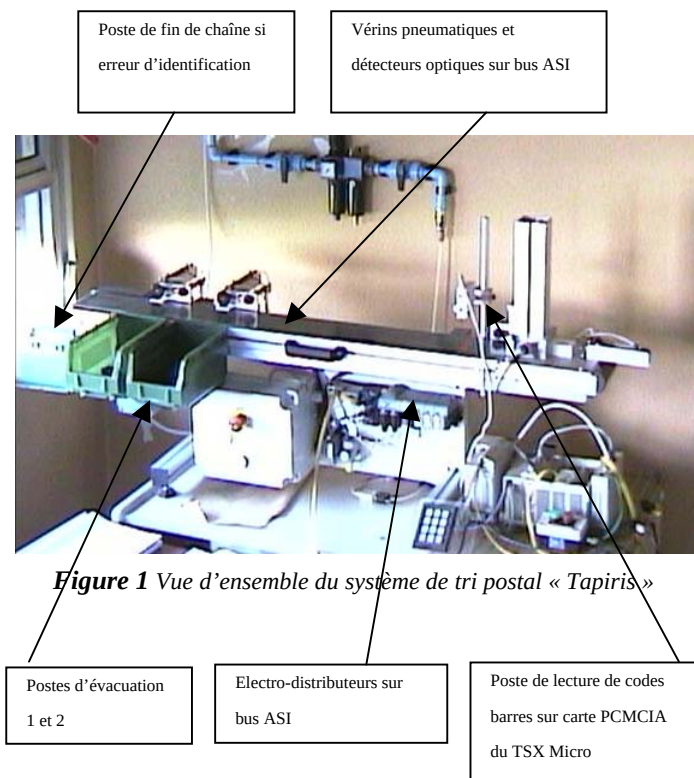


Figure 1 Vue d'ensemble du système de tri postal « Tapiris »

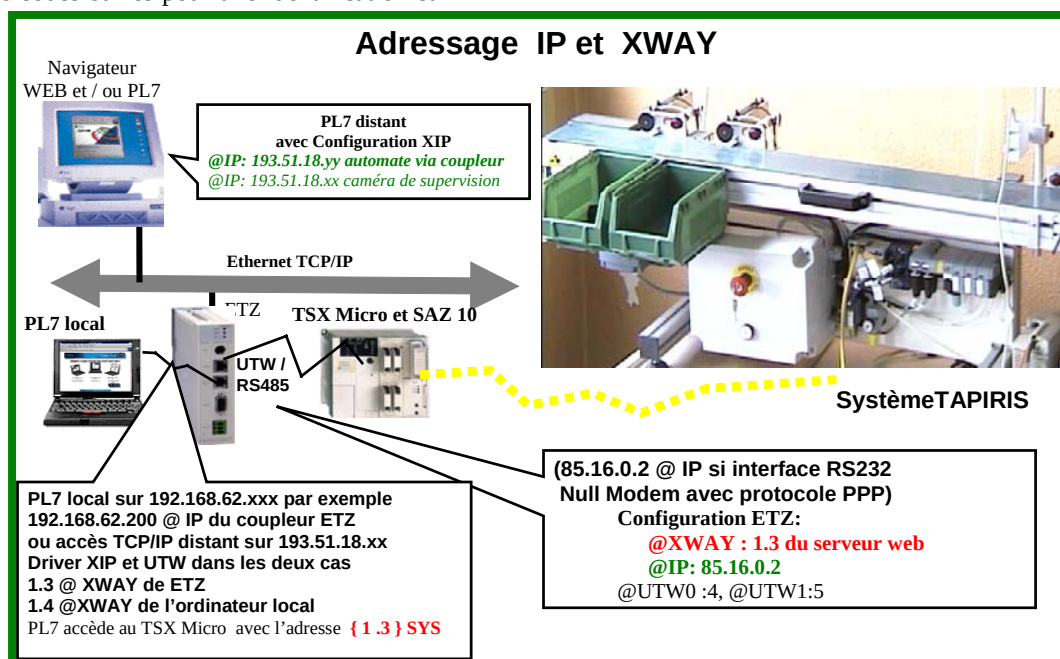


Figure 2 Aspects techniques

Expérimentation du pilotage à distance d'un système de tri de colis

Une caméra IP AXIS PTZ 213 orientable à distance permet le suivi du convoyage. La programmation de l'automate, la mise à jour de la table de déchargement, la mise en marche du convoyeur ou son arrêt en cas de dysfonctionnement, sont rendus possible depuis une gestion distante du fonctionnement sous l'environnement logiciel de PL7 Pro. L'accès au convoyeur d'adresse IP publique <http://193.51.18.xx> est volontairement limité à la consultation de l'état du processus pour du diagnostic (le mode de configuration est protégé). La caméra web (AXIS 213PTZ) est accessible à l'adresse publique <http://193.51.18.yy> en mode utilisateur. Les adresses IP attribuées sont toutes deux sur la DMZ de l'IUFM de Midi Pyrénées, site de Rangueil, (cf figure 2).

4. Les deux niveaux d'interactions avec le système

Deux niveaux d'interaction à distance sont proposés aux utilisateurs.

4.1. L'accès par serveur Web

Le serveur web embarqué dans le coupleur ETZ510 est fourni par Schneider Electric ; son accès est sécurisé et différencié, l'utilisateur (superviseur de processus) du chargé de production (qui peut modifier par exemple la table de gestion des colis).

L'accès à l'API TSX 3721 est limité en terme d'exécution distante depuis le serveur web; seul l'accès distant au programme de gestion par le logiciel de supervision PL7 pro est possible (voir 4.2). Les accès aux ressources matérielles sont ainsi limités pour des raisons évidentes de sécurité et de pérennité du fonctionnement du processus de convoyage et de tri.

Les pages de gestion (figure 3) permettent l'accès à des « utilitaires » comprenant des outils, de diagnostics (Applet Sysdiag qui donne l'état du bus ASI, indique les interfaces communicantes installées, cf figure 4), mais aussi des outils de « configuration en ligne » permettant un accès par Wizard aux paramétrages du coupleur (adresse IP publique, passerelle, table de routage par adressage XWAY avec firewall intégré et limitation du nombre d'accès simultanés...).



Figure 3. L'accès au site Web de supervision

La partie « Tapiris » permet de configurer les deux postes de déchargement en listant les numéros de colis à convoyer.

La section « Site ETZ » est relative à la configuration, du coupleur (adressage en IP fixe), et des accès aux bus locaux. Un éditeur html permet au travers de l'utilisation du logiciel propriétaire FactoryCast, de créer ses propres pages de supervision et de maintenir complètement le serveur web embarqué.

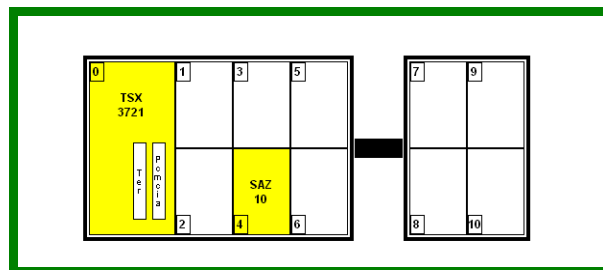


Figure 4. Mode diagnostic de la configuration

Exemple de rajout du colis n°49 à évacuer au poste 1 et saisie du numéro à partir du serveur web (figure 5)

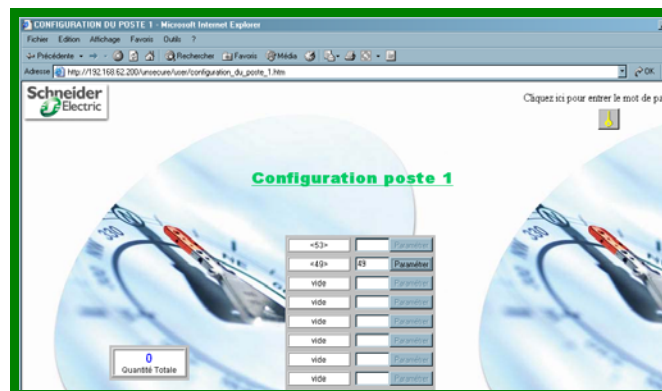


Figure 5. Accès Web à la gestion des postes de déchargement

4.2. L'accès par logiciel de Supervision PL7 PRO

Le driver XIP (contraction de XWAY TCP/IP driver) permet, une connexion sur un réseau Ethernet entre automate TSX, coupleur web et PC de développement (action possible sur toutes les interfaces ASI via le logiciel PL7 pro). Cette connexion à distance permet d'agir directement sur le fonctionnement de L'API (mise en fonctionnement, arrêt d'urgence, reprise sur incidents...)

Le coupleur web ETZ 510 est une passerelle TCP/IP – Uni-Telway esclave du TSX 3721 qui est maître sur le bus ASI. C'est un module TCP/IP avec serveur web embarqué. Notons encore que le TSX Micro fonctionne selon une architecture client / serveur (figure 2).

4.3. La configuration de l'automate

(L'adressage ASI et le choix des profils des équipements connectés)

le TSX SAZ 10 est en position 4 (figure 6)

Le TSX Micro est en position 0

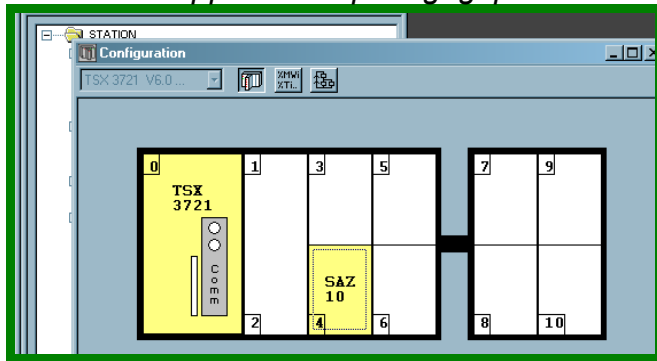


Figure 6 : Déclaration des interfaces ASI au niveau du SAZ 10

Le SAZ 10 transforme l'automate TSX 3721 Micro en maître ASI :

- déclaration (configuration projetée) des interfaces ASI connectées en choisissant des profils prédéfinis (clavier, boîte à boutons poussoirs, détecteurs photo électrique, vérins pneumatiques),
- comparaison de la configuration projetée (figure 7) à la configuration détectée (vérification de conformité entre les éléments Programmés P et Détectés D).

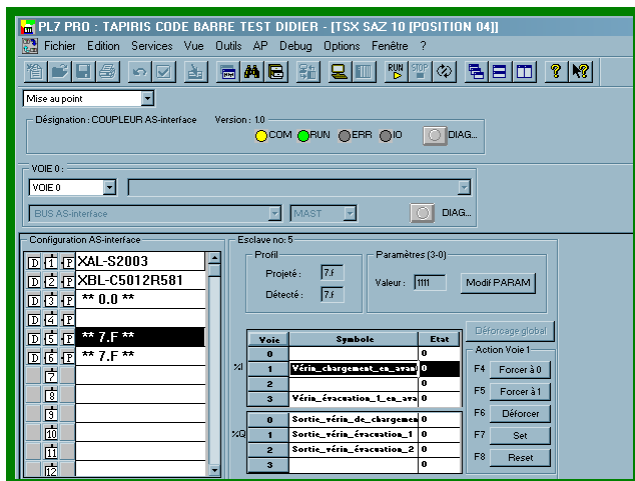


Figure 7 . Configuration projetée et détectée en mode connecté

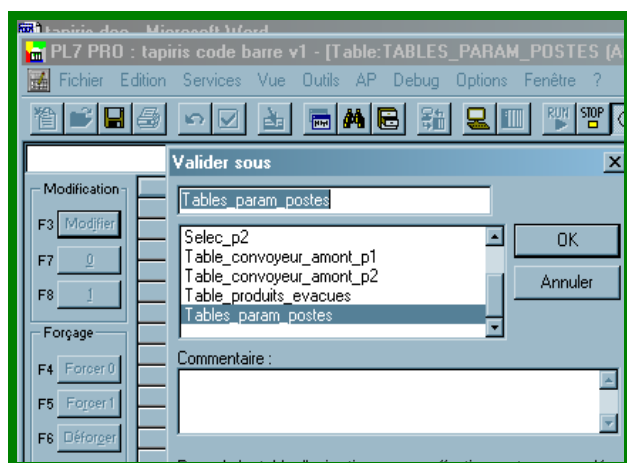


Figure 8 : Table de gestion des colis à décharger

La connexion à l'API via PL7 pro permet la remontée des paramètres de fonctionnement et la lecture de la table de gestion des colis, figure 8 (tables_param_postes).

5. Travaux pratiques proposés

Nous donnons ci après un certain nombre d'exemples adaptés à un public de PLP2 Electrotechnique et de BTS IRIS, avec des activités de travaux pratiques réalisées en grande partie.

Exemples en 1^{ère} année BTS :

- Architecture d'un système communicant, liens avec son environnement,
- Prise en main du système à distance par PL7 ou le serveur web,
- Création de pages Html avec suivi des colis par caméra web et modification de la table de routage,
- Vérification de la correspondance entre la config projetée (P) et réellement détectée (test de déconnexion en cours de fonctionnement d'une interface ASI, mise en défaut et remplacement à « chaud »),
- Maintenance préventive et diagnostic distant des capteurs et actionneurs pneumatiques.....

Exemples en 2^{ème} année BTS:

- Modification du programme en Grafcet de l'API,
- Réglage du débit des Electrovanes (adaptation de la vitesse d'éjection des colis à la vitesse du tapis)
- Remontée des paramètres du convoyage et création d'une base de données à des fins d'historisation et de contrôle a posteriori du processus,
- Mise en place d'un contrôle d'accès par gestion des adresses XWAY (table de routage),
- Paramétrage du pare feu.....

Dans le cadre du pilotage de systèmes automatisés, des TP d'automatismes séquentiels sont déjà proposés en première année de préparation au concours du PLP2 Electrotechnique :

- Programmation d'un API pour piloter un processus à dominante Electrotechnique, des parties opératives pneumatiques,
- Analyse et représentation graphique des modes de fonctionnement en GRAFCET,
- Analyse de la structure communicante incluant la notion de supervision Web et le pilotage à distance,
- Réalisation de la connectique, analyse du transport des informations, bus ASI, Ethernet, TCP/IP, MODBUS,

6. EVALUATION

6.1. Objectifs et méthodologie d'évaluation

Les discussions informelles ou même certains articles de presse grand public, mettent en évidence soit une « absolue nécessité » de se précipiter sur un ordinateur pour soit -disant « moderniser » nos enseignements, ou au contraire un rejet a priori des ordinateurs comme outils d'apprentissage en autonomie. Il nous semble donc important de tester les usages des étudiants par des procédures adaptées. Cette évaluation tente de mesurer l'impact sur la formation de la réalisation distante de ce type de TP, par une analyse par les formés, des séquences de TP, de l'organisation de sa mise en place, de l'intérêt de ces activités réalisées à distances par rapport à celles organisées en local.

Afin d'éviter le plus possible l'influence des pré-acquis des élèves ou des étudiants, deux questionnaires individuels leur ont été soumis, en début puis en fin d'activité. Il s'agit là de mesurer les variations de leurs avis, de leurs performances et de leurs opinions, véritablement dues à la pratique de ce TP et non pas des avis, des opinions, des compétences ou des savoirs acquis avant le début de l'expérimentation. La plupart des questions du pré- et du post-test étaient les mêmes afin de mesurer les changements. Les questionnaires incluaient des questions fermées, les mêmes en pré- et post-test, cotées par échelles de Lickert. Un entretien individuel a prolongé cette évaluation pour les seuls étudiants IUFM.

6.2. Questionnaire de « pré-test »

Bien que différents, les questionnaires pour les deux catégories de public (étudiants BTS ou étudiants IUFM) comportaient en pré-test une partie relative au « profil informatique » des testés. Les questions étaient relatives :

- à la connaissance préalable de l'outil informatique,
- à leurs compétences initiales en informatique (connaissances, manipulation préalable ou non de webcams...),
- à leur taux de pratique (nombre d'heures quotidiennes) ou à leurs usages (recherche documentaire, mel, chat, jeux...).
- aux compétences acquises dans l'utilisation du logiciel de gestion de l'automatisme industriel,
- à l'utilisation antérieure du système en mode local,
- et aux avis a priori sur l'apprentissage à distance.

Ces questions et leur analyse devaient permettre de mettre en évidence d'éventuelles corrélations entre leur « profil informatique » et les réponses aux autres questions, par exemple : la compétence initiale en informatique a-t-elle une influence sur l'avis initial d'un sujet sur la formation « pilotage à distance » ?

6.3. Questionnaire de « post-test »

En fin d'activité, les étudiants ont été amenés à reformuler l'objectif du TP, à faire état des difficultés rencontrées, notamment dans l'utilisation simultanée de différents outils informatiques et le pilotage de la caméra distante. Leurs avis ont été également recueillis sur l'utilité, l'aspect attrayant, l'efficacité de l'apprentissage à distance, par référence à l'apprentissage « traditionnel », en mode local, à proximité du système didactique.

6.4. Analyse des réponses aux questionnaires

6.4.1. Difficulté du TP

La difficulté perçue par les étudiants est analysée par une question portant sur la difficulté du TP, entre TD=Très difficile et TF=Très Facile. Comme le mentionne la figure 9, les avis avant/après sont assez stables. Ils confirment les résultats d'études précédentes où les étudiants sous-estiment généralement la difficulté du travail à fournir. Il est à noter que les commentaires libres à cette question et entretiens individuels ont mis en évidence une relative absence de difficulté du TP et une bonne qualité des documents d'aide fournis. Ces réponses ne semblent pas directement liées à une plus ou moins grande pratique ou maîtrise des outils informatiques.

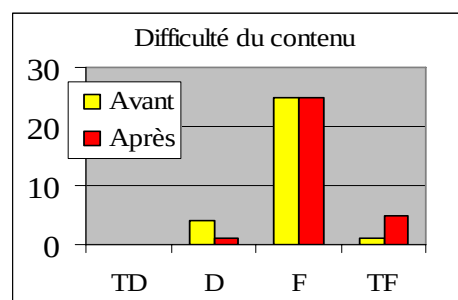


Figure 9 : Analyse de la perception de difficulté.

6.4.2. Utilité du TP

L'évaluation de l'utilité du TP est menée grâce à deux questions portant sur l'utilité, d'une part pour l'épreuve finale (concours PLP pour les étudiants IUFM et BTS pour les autres étudiants) et d'autre part pour la formation à plus long terme. Les figures 10 et 11 rendent compte de l'avis des étudiants, entre I=Inutile jusqu'à TU=Très Utile.

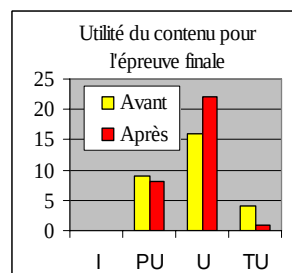


Figure 10 : Perception de l'utilité à court terme

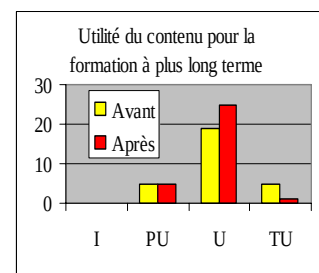


Figure 11 : Perception de l'utilité à long terme

Thème : Applications pédagogiques - Académie de Toulouse

Ces résultats attestent d'une majorité d'avis positifs quant à l'utilité, sans doute plus fortement perçue pour le long terme que pour le court terme. Les avis sur cette utilité perçue se resserrent sur « Utile » après le post test par rapport à une certaine dispersion lors du pré test. Les sujets de BTS ou de concours PLP changeant chaque année, il est très probable que l'intérêt à court terme des étudiants augmenterait fortement avec l'apparition de ce type d'activité de pilotage à distance dans les épreuves. On notera également une augmentation de l'opinion positive après/avant. Il faut également constater que ces réponses ne semblent pas directement liées à une plus ou moins grande pratique ou maîtrise des outils informatiques chez les étudiants, quelque soit leur origine ou le type de formation suivie.

6.4.3. A propos de l'ordinateur comme outil de formation

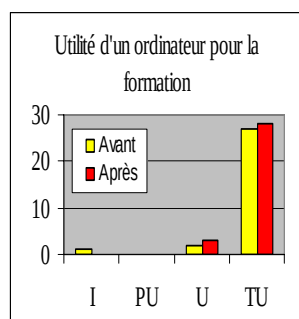


Figure 12 : Perception de l'utilité de l'ordinateur / formation

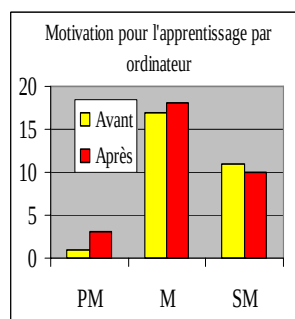


Figure 13 : Perception de la motivation / apprentissage par ordinateur

Les réponses concernant la motivation diffèrent selon le type de public, figures 12 et 13. Avant la séquence, les étudiants IUFM sont « motivés » et les étudiants de BTS sont « motivés » ou « super motivés ». Après la séquence, la répartition reste globalement stable mais les étudiants IUFM sont globalement moins motivés et les étudiants BTS globalement plus motivés encore.

6.4.4. Sur le mode d'apprentissage

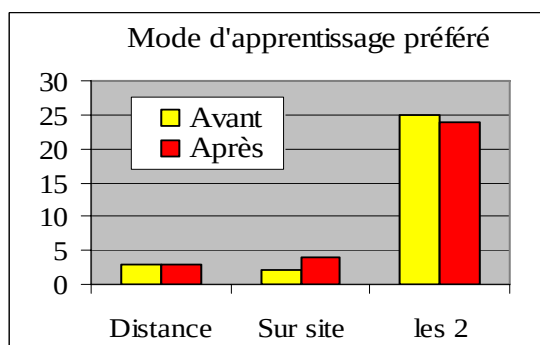


Figure 14 : Expression des préférences sur le mode d'apprentissage

La question sur le mode d'apprentissage divise encore les étudiants en deux catégories, même si la figure 14 montre une certaine stabilité globale des avis. L'évolution est la même que pour la question précédente, certains étudiants de BTS évoluent plutôt vers le mode à distance tandis que certains étudiants IUFM évoluent plutôt dans vers le mode mixte, sans bien le connaître du reste puisque ne l'ayant pas pratiqué.

Les étudiants pensent avoir acquis des compétences en pilotage de systèmes à distance. Cette tendance confirme les observations effectuées dans une étude précédente [4]. On constate une prédominance de l'outil informatique permettant de commander et de contrôler le système à distance sur le contenu disciplinaire, le fonctionnement du système Tapiris. Ainsi, à la question « *que pensez-vous avoir appris* », les réponses mettent davantage l'accent sur les outils et les opérations associés au pilotage et au contrôle d'un système à distance que sur le fonctionnement du système de tri de courrier ou sur son diagnostic.

6.4.5. Sur la pratique informatique

Les étudiants IUFM sont tous « plutôt des pratiquants informatiques », mais ne sont pas « super-spécialistes », ni « accro » des jeux, du chat... Il est probable que leurs réponses à la question de l'usage quotidien de l'ordinateur inclut pour certains l'usage « professionnel » en tant qu'étudiant préparant le concours de PLP. Les étudiants BTS ont plutôt un profil de spécialistes, ce qui semble plutôt normal compte tenu du type de formation qu'ils suivent. Leur temps de pratique quotidienne est également largement plus élevé que celui du public IUFM. D'autre part, les étudiants de BTS sont de facto plus jeunes que ceux de l'IUFM. Le facteur discriminant sur les avis relatifs à la motivation vis-à-vis de l'ordinateur ou de la formation à distance, est plutôt l'âge que la formation suivie. Il semble que nous soyons en présence d'une dichotomie assez forte entre les générations, les jeunes étant plus favorables globalement et encore plus après qu'avant, à l'usage de l'ordinateur comme moyen de formation.

7. Discussion

Quelques réserves peuvent sans doute être apportées à notre analyse. Elle ne porte tout d'abord que sur un nombre réduit d'étudiants (6 étudiants PLP et 26 étudiants BTS). Il sera sans doute nécessaire de renouveler l'expérimentation les années prochaines pour confirmer ou infirmer les tendances mises en évidence.

De plus, l'influence supposée de l'âge mérite sans doute d'être nuancée dans la mesure où d'autres facteurs influencent peut-être les avis. En effet, les étudiants IUFM plus âgés ont tous eu une expérience professionnelle artisanale ou industrielle tandis que les plus jeunes et a fortiori les étudiants de BTS n'en ont jamais eu. Quelle

influence a cette présence ou cette absence de pratique dans le monde du travail ?

Par ailleurs, les pratiques informatiques sont relativement en cohérence avec l'âge, les plus jeunes pratiquent plus et dans des usages plus diversifiés que les plus âgés. Il est donc impossible avec les populations testées, de déterminer l'influence relative de l'âge et de l'usage de l'ordinateur dans les avis recueillis.

Une idée cependant a assez clairement émergé lors des entretiens sur le mode de formation préféré. Les étudiants IUFM les plus âgés sont unanimes pour préférer le mode présentiel ou à défaut le mode mixte. Ils expriment une préférence très nette pour « *quelque chose que l'on peut toucher* », où « *l'on voit vraiment comment ça marche* », qui est « *vraiment concret* », comme s'ils craignaient « *qu'on leur cache quelque chose* ». A l'évidence les plus jeunes n'expriment pas du tout cette crainte et l'on peut s'interroger sur la nécessité de la sollicitation des sens (vue, ouïe, toucher, odorat même) dans les apprentissages en génie électrique. A ce titre, les plus jeunes considèrent qu'il n'y aurait finalement pas de différence entre le pilotage à distance d'un vrai système tel que expérimenté ici et une simulation 3D sur leur poste de travail en local. Les plus âgés au contraire font clairement la différence entre un pilotage local, un pilotage à distance et une simulation, ils classent d'ailleurs les modalités de formation dans cet ordre de préférence.

L'exploitation des questionnaires de pré- et de post-test met néanmoins en évidence un certain nombre de tendances :

- une certaine stabilité des avis entre les résultats du pré et du post test ou des variations faibles,
- une stabilité d'évaluation de la difficulté ou une légère régression (« *finalement c'était plus facile que je ne le croyais* »), alors que les étudiants sous estiment généralement la difficulté d'une telle activité, la confondant avec l'usage de l'ordinateur
- l'utilité pour la préparation du concours ou pour la formation à plus long terme sont stables sinon en légère régression (« *finalement, c'est moins utile que je ne le pensais* »),
- un effet apparent de l'âge où les plus jeunes sont plus favorables à l'usage des ordinateurs « *je suis fan* », tandis que les plus âgés en ont plus souvent un usage parfois contraint « *quand vraiment je ne peux pas faire autrement* »

8. CONCLUSION

La réalité de nos filières STI implique l'étude de solutions constructives empruntées au domaine industriel. La démarche mise en place a permis de travailler sur des objets industriels et de mettre en œuvre des logiciels de supervision éprouvés. L'interconnexion d'équipements

« normalisés » et le dialogue des interfaces par bus de terrain rendent le système piloté évolutif et cohérent en regard de ceux que l'on trouve sur les chaînes de production et de gestion.

Il est à noter que la mise en œuvre de protocoles propriétaires mais standardisés facilite l'interfaçage des produits communicants, mais nécessite des connaissances particulières issues du domaine des réseaux. La structure ainsi organisée permettra de proposer des TP liés aux domaines de l'informatique industrielle et de la maintenance à des étudiants issus des filières de baccalauréat professionnel à licence professionnelle, mais également dans les cursus de Licences du domaine EEA, ou ISME (Ingénierie des Systèmes et Microsystèmes Embarqués), par exemple.

L'usage des systèmes pilotés à distance peut désormais se répandre car les solutions informatiques sont disponibles et de plus en plus de systèmes électrotechniques didactisés intègrent un coupleur web. Néanmoins, nous pensons indispensable de continuer à étudier les usages des étudiants, la corrélation éventuelle avec les facteurs environnementaux, avec leur formation initiale...

Diverses questions restent en effet sans réponse claire : le pilotage à distance qui est sensoriellement pauvre, permet-il d'acquérir les mêmes compétences que dans une formation sur un système en présentiel ? Les notions d'ordre de grandeur, de danger ne sont-elles pas affectées par la mise à distance des objets de formation ?

D'autres études, sur des populations plus nombreuses et croisant d'autres critères nous attendent donc.

9. BIBLIOGRAPHIE

[1] « Un centre de ressources virtuel partagé », T. Zimmer, D. Geoffroy, M. Billaud et Y. Danto, p443, CETSIS 2003, Toulouse

[2] « Pilotage d'un système automatisé de production via Internet : Applications pédagogiques », NOZAR Rafii, Yannick Graton, CETSIS 2005, Nantes

[3] « Contrôle et Supervision à Distance : Réseaux Industriels, Internet et Sécurité », BAJIC E., BELLOT O., DOUCHIN O., SAUNAL Ch., CETSIS 2005, Nancy

[4] « Pilotage à distance de systèmes industriels didactisés et évaluation de la pratique des étudiants », S. MIAS, P. MAUSSION, CETSIS 2007, Bordeaux

[5] « Pilotage à distance d'un système Schneider didactisé de tri postal », Didier PEYTAVI, CETSIS 2007, Bordeaux

[6] Plateforme de classe virtuelle Centra (formation à distance et e-learning synchrone) <http://www.iufm.fr/reseau-iufm/tice/classe-virtuelle.html>

[7] Schneider Electric système Tapiris <http://www.schneider-electric.fr>

Recherche du maximum de puissance sur les générateurs photovoltaïques

V. BOITIER^{1,2}, P. MAUSSION², C. CABAL¹

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

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

² IUFM Midi Pyrénées, LAPLACE, Université de Toulouse, INPT, UPS, CNRS

Résumé : L'objectif de cet article est d'illustrer les principes utilisés pour faire fonctionner un générateur photovoltaïque à son maximum de puissance divers exemples d'implantation numérique et analogique de cette fonction particulière.

1. Introduction

Les énergies renouvelables ont le vent en poupe et constituent un thème porteur vis-à-vis des étudiants. De plus en plus de lycées sont amenés à faire l'acquisition de systèmes photovoltaïques [1] adaptés pour une connexion réseau, ou pour l'alimentation de systèmes autonomes avec stockage. Ces systèmes restent coûteux malgré des coûts de fabrication en baisse. Il convient donc d'en soigner les différents composants pour maximiser le rendement global de l'installation.

Sur les régulateurs de charge ou les onduleurs, deux tendances apparaissent selon les applications visées, on peut minimiser l'électronique de commande pour augmenter la robustesse (chargeur de batterie à partir de panneau photovoltaïque pour les PVD-chargeur STECA [2] ou privilégier un contrôle plus fin mais plus complexe (chargeur Solar Boost 2000 [3], onduleur connectés au réseau avec fonction MPPT incluse [4].

Dans le cas où l'on souhaite maximiser l'énergie produite (onduleur connecté au réseau, chargeur de batterie lorsque la batterie est déchargée), il est intéressant d'inclure une recherche du point de puissance maximum (Maximum Power Point Tracking -MPPT-) dans les convertisseurs.

Après un rappel sur les différentes méthodes utilisées pour rechercher le point de puissance maximum d'un générateur photovoltaïque, on présentera différents résultats expérimentaux et/ou de simulation pour valider les algorithmes utilisés, puis on établira le cadre d'utilisation de tels algorithmes et leurs limites de fonctionnement.

2. Modèle de simulation PSim

Nous présentons ici un modèle à deux diodes d'un générateur PV (et non d'une cellule), plus fidèle qu'un modèle équivalent à une seule diode et résistances. La

figure 1 présente les constituants de ce modèle circuit équivalent qui permet une approximation par trois segments de droites de la caractéristique I(V) du générateur solaire. Tous les modèles PSim de cet article sont disponibles en téléchargement gratuit sur [5].

La détermination des paramètres du modèle peut se faire comme suit. Prenons par exemple un générateur solaire de caractéristiques : $V_{OC} = 44V$; $V_{opt} = 36V$; $I_{opt} = 4,5A$; $I_{CC} = 5A$ et $R_s = 20\text{ m}\Omega$. Les générateurs V1 et V2 dont fixés respectivement à 32V et 40V, de part et d'autre du point $V_{opt} = 36V$. Les lois des circuits permettent d'aboutir aux équations (1) et (2), d'où peuvent être aisément calculées les valeurs de résistances R1 et R2

$$V_{opt} = R_1 \cdot I_{CC1} + V_1 - (R_1 - R_s) \cdot I_{opt} \quad (1)$$

$$V_{OC} = R_1 // R_2 \cdot (I_{CC1} + V_1 / R_1 + V_2 / R_2) \quad (2)$$

Les perturbations sont prises en compte grâce au générateur de courant Delta_Icc qui simule une variation d'éclairement tandis que le générateur Delta_V1 simule une variation de température.

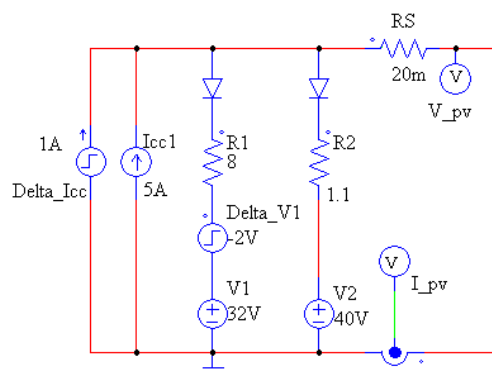


Figure 1 : Modèle 2 diodes d'un générateur PV

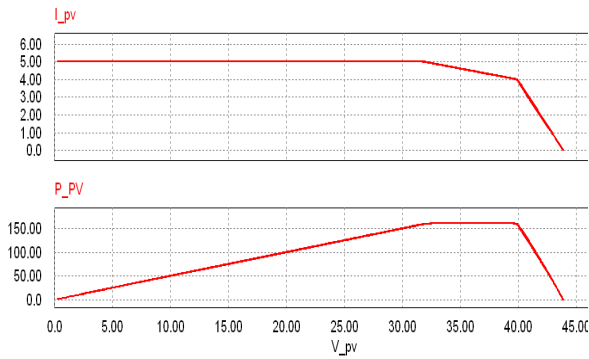


Figure 2 : Caractéristiques du modèle 2 diodes du générateur PV de la figure 1

3. Commande extrême

3.1. Principes de l'adaptation d'impédance

La caractéristique puissance/tension d'un panneau solaire présente un extremum qui varie avec la température, l'éclairement et le vieillissement du panneau. Une connexion directe entre un générateur PV et sa charge a peu de chance de placer le système PV à son point de fonctionnement maximum (MPP). Dans le cas d'une charge type batterie, il faut que la tension de la batterie (qui impose la tension du panneau) soit proche de la tension V_{OPT} pour laquelle la puissance délivrée est maximale (cf fig 3).

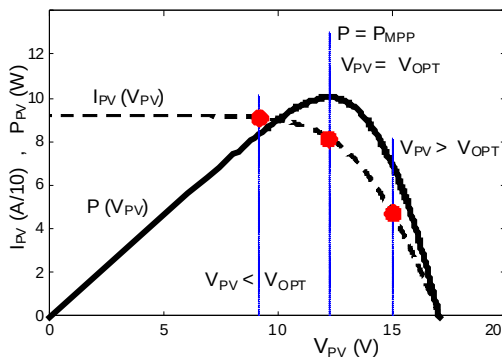


Figure 3 : Caractéristiques $I_{PV}(V)$ en pointillé et $P_{PV}(W)$ en trait plein pour un panneau de 12 Wc.

Si un convertisseur DC/DC est intercalé entre le générateur PV et la batterie on peut modifier le point de fonctionnement du panneau grâce à une loi de commande extrême afin de maximiser en permanence l'énergie transférée.

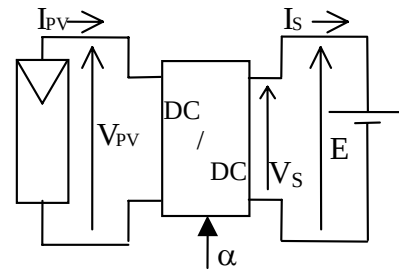


Figure 4 : Principe du convertisseur réalisant l'adaptation d'impédance

Par exemple, dans le cas d'un convertisseur abaisseur (rapport cyclique α), la relation moyenne liant la tension de la batterie E et celle du panneau V_P s'écrit :

$$E = V_S = \alpha V_{PV} \quad (1)$$

Ainsi, en fixant α tel que :

$$\alpha = \alpha_{OPT} = \frac{E}{V_{OPT}} \quad (2)$$

$$\text{on obtient : } V_{PV} = V_{OPT} \quad (3)$$

$$\text{en conséquence : } P_{PV} = P_{MPP} \quad (4)$$

La même démarche convient pour toutes les charges (à condition qu'il existe une intersection entre les caractéristiques). Pour comprendre comment les caractéristiques se modifient, [6] propose une feuille de calcul sur tableur qui permet notamment de faire varier le rapport cyclique via un curseur et de visualiser, vue du côté de la charge (cf fig.ci dessous), la modification de l'impédance de la source induite par le rapport cyclique ($V_S = \alpha V_{PV}$ et $I_S = I_{PV} / \alpha$). On peut alors déterminer le gain réalisé ou non suivant le point de fonctionnement choisi. La feuille permet aussi de modifier l'ensoleillement, la température, la charge ...

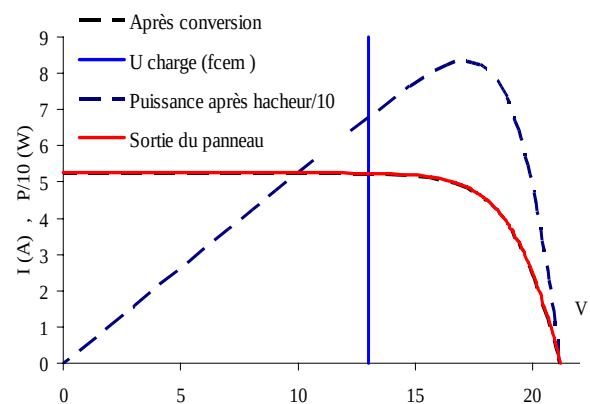


Figure 5 : Convertisseur avec $\alpha = 1$, puissance transmise : 68 W

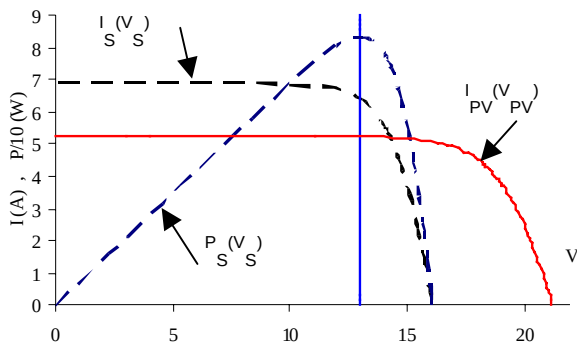


Figure 6 : Convertisseur avec $\alpha = 0,76$, puissance transmise: 84 W, soit un gain de 23% par rapport à la connexion directe.

3.2. Commandes extrémales

Dans tous les cas de figures, l'objectif d'une commande extrémale consiste à amener le système à son optimum de puissance et à l'y maintenir en dépit des variations de paramètres. Plusieurs familles de commandes utilisées sont présentées ci-après.

3.2.1. Commande P&O Perturb and Observ

Les commandes regroupées sous cette dénomination contiennent une action de commande associée avec une action de recherche. Deux types de commandes présentées ci-après respectent ce cadre.

3.2.1.1 Principes de la commande dite "hill climbing"

Le principe de cette commande extrémale est très simple. On raisonne sur un convertisseur buck connecté à une batterie ($V_{PV} = E/\alpha$ et donc $V_{PV} \searrow$ quand $\alpha \nearrow$) mais cela ne restreint en rien le principe de fonctionnement. Partant d'une commande avec un rapport cyclique petit, on l'augmente régulièrement. Dans un premier temps la puissance croît (le maximum n'est pas encore atteint ①), se stabilise (le maximum est alors atteint ②), puis diminue (le maximum vient d'être dépassé ③). Le système de mesure détecte cette diminution de puissance, ce qui conditionne une inversion du sens de la commande : la puissance va alors augmenter, repasser par le maximum, puis diminuer; dès détection de cette diminution de puissance, le sens de la commande est à nouveau inversé... Finalement, le système se place en oscillation autour du maximum [6].

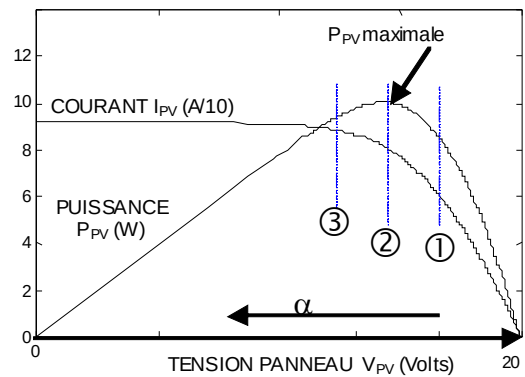


Figure 7 : Caractéristiques $P_{PV}(V_{PV})$ et $I_{PV}(V_{PV})$.

Cette oscillation permet au système de pilotage de vérifier que le maximum ne s'est pas déplacé et le cas échéant de le suivre mais elle entraîne une perte de rendement, le point de fonctionnement moyen étant en dessous du maximum.

La réalisation d'une telle commande peut être effectuée de manière analogique [7], ou par logiciel [8]. Hors le cas d'un onduleur relié au réseau, un convertisseur photovoltaïque ne fonctionnera pas tout le temps en mode MPPT. Dans le cas d'un chargeur de batterie, il y aura d'autres modes de charges nécessaires (régulation de tension quand la batterie est chargée) et/ou d'autres fonctionnalités (déconnexion de la charge ou du générateur), aussi une commande numérique nous semble mieux adaptée par sa modularité.

3.2.1.2. MPPT analogique utilisant cette méthode

Un exemple de schéma de simulation utilisant une réalisation analogique de cette méthode, est présenté figure 8. Le principe repose sur l'intégration du signe de la dérivée temporelle filtrée de la puissance moyenne sur une période de découpage. Un intégrateur permet de faire varier le rapport cyclique : si la dérivée de la puissance est positive, il faut diminuer le rapport cyclique et l'augmenter dans le cas contraire. Le gain de l'intégrateur règle la convergence de l'algorithme. Le filtre doit éliminer les bruits en particulier ceux liés au découpage, mais ne pas dégrader les performances de la dérivée. Ces deux termes peuvent être réglés expérimentalement.

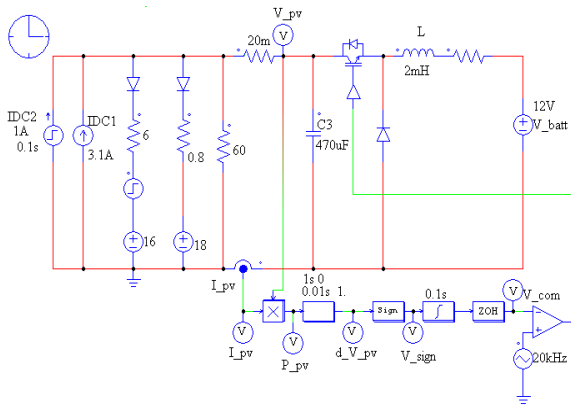


Figure 8 : MPPT par intégration du signe de la dérivée de la puissance

D'autres structures sont disponibles dans la bibliographie [x], les fichiers de simulation PSim de certaines d'entre elles seront téléchargeables sur [5.]. Citons en particulier le schéma de la figure 9 qui utilise le principe du « hill climbing » mais sans dérivée de la puissance, grâce à l'emploi de deux filtres passe pas. La différence réalisée à tout instant entre la puissance et la puissance filtrée donc retardée, donne une image de ses variations. Le signe de ces variation commande la MLI via une bascule et un 3° filtre.

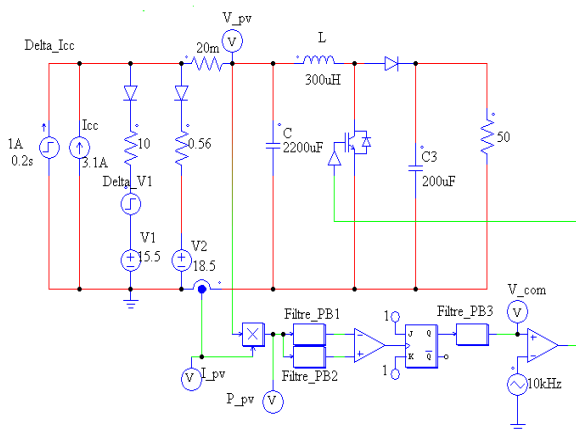


Figure 9 : MPPT par approximation de la dérivée de la puissance

3.2.1.3. MPPT numérique utilisant cette méthode

Un prototype pédagogique de 100W [6] a été réalisé pour cette étude. La commande est intégrée dans un μC PIC16F876. Une fréquence de commutation de 150 kHz, PWM sur 7 bits. Une tension continue image du rapport cyclique est générée par filtrage de la sortie PWM pour visualiser plus facilement l'évolution de la commande. Il y a un réglage à trouver entre les paramètres suivants : T_e (période d'échantillonnage de la commande) et $\Delta\alpha$ (pas de variation du rapport cyclique). Si on veut

mesurer les variations de puissance, il faut aussi laisser le temps au système de répondre $\Rightarrow$ inutile d'avoir un rafraîchissement trop rapide de la commande $T_e \approx 3 \tau$ convient. τ est la constante de temps du système. Pour un convertisseur de type buck, en première approche, $\tau = R_p C$ où C est la capacité placée en parallèle avec le générateur PV et R_p est la résistance équivalente en régime permanent de l'ensemble convertisseur et charge i.e. : $R_p = V_p / I_p$.

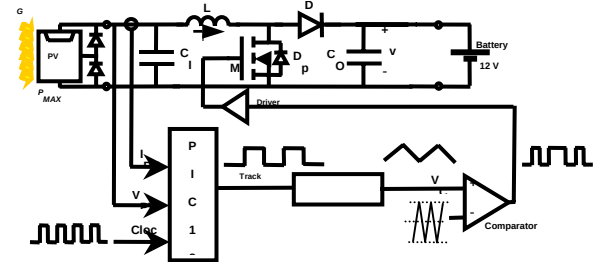


Figure 10 : schéma de principe de la structure convertisseur statique + PIC

Pour commencer on prendra aussi $\Delta\alpha$ voisin de 5% de la gamme de variation possible pour avoir une variation de puissance significative.

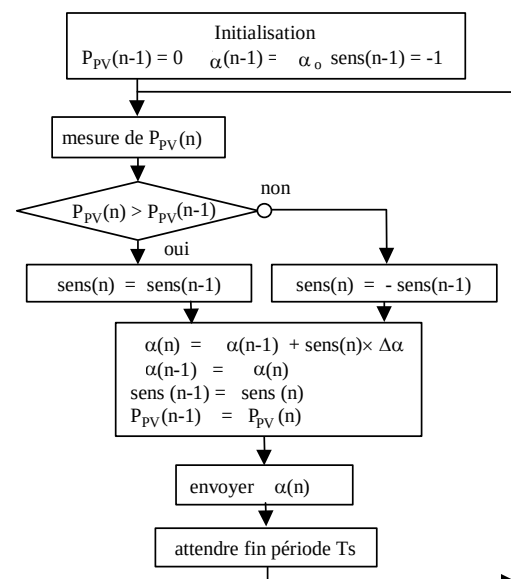


Figure 11 : Algorithme de base de la commande MPPT type hill climbing.

Le fonctionnement correct du système est présenté sur la figure 12 ci-après, où l'on visualise simultanément une tension image du rapport cyclique et une tension image de la puissance du panneau. Le côté gauche de la figure présente un fonctionnement en boucle ouverte de façon à situer l'extremum de puissance, le comportement en boucle fermée est lui sur la droite de la figure. Dès que le bouclage est

activé, la puissance rejoint le MPP et reste calée dessus. Suite à une perturbation (une feuille A4 est placée sur le panneau pendant 2 secondes environ) le système se recale sur le nouveau maximum. Dès que la perturbation disparaît, la puissance fournie retrouve bien la valeur du premier MPP. Ces résultats ont été obtenus avec le premier jeu de paramètres i.e. $\Delta\alpha = 5\%$ de $(\alpha_{\min}-\alpha_{\max})$ et $T_s = 50$ ms.

3.2.1.4. Analyse des réglages.

Contrairement aux commandes linéaires type PID, il n'existe pas de méthodes de réglage bien définies; une démarche expérimentale est nécessaire pour optimiser les résultats. Pour un même T_e , si $\Delta\alpha$ grand $\Rightarrow$ large oscillation autour du MPP (et donc perte de puissance), mais convergence rapide, si $\Delta\alpha$ petit $\Rightarrow$ faible oscillation autour du MPP et donc risque de confondre le bruit de mesure avec une réelle variation de la puissance et suivi lent du MPP si l'ensoleillement fluctue.

Si T_e augmente ou si $\Delta\alpha$ diminue, la stabilité augmente au détriment de la dynamique du suivi de puissance. Aussi il est intéressant de travailler avec un pas variable de $\Delta\alpha$ pour assurer à la fois une convergence rapide (même en cas de faibles ensoleillement) et aussi une faible oscillation autour du MPP.

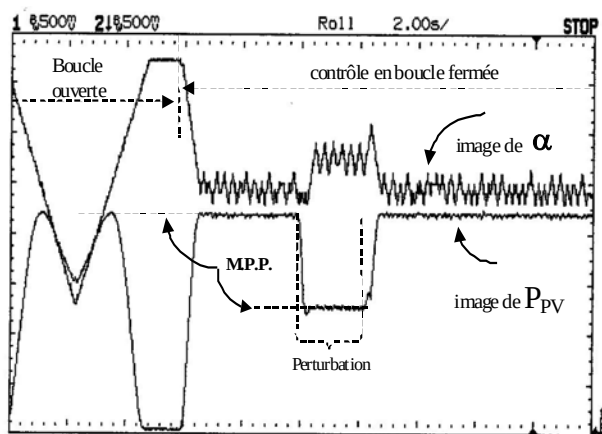


Figure 12 : Comportement en boucle ouverte et en boucle fermée du convertisseur

3.2.1.4. Limites d'une telle commande

Un problème se pose dans le cas où l'ensoleillement augmente, la puissance mesurée peut augmenter alors même que le sens d'évolution de la commande est mauvais ce qui éloigne le système du MPP, cet ajustement incorrect continuera jusqu'à ce que l'augmentation de l'intensité lumineuse cesse. Un autre problème se pose dans le cas où il n'y a pas un maximum mais des maxima (cas de panneaux

partiellement ombragés)...dans ce cas ce type d'algorithme doit être raffiné pour être sûr de converger vers le plus haut des maxima

3.2.2. Méthode de la conductance incrémentale

(rem : I/V : conductance, dI/dV conductance incrémentale.)

Dans cette partie, pour alléger les notations, on note V , I , P les grandeurs relatives au générateur photovoltaïque.

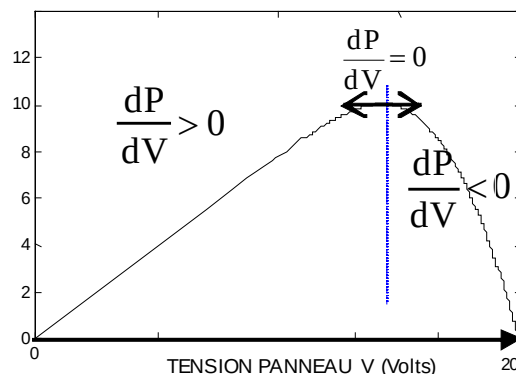


Figure 13 : Comportement en boucle ouverte et en boucle fermée du convertisseur

Le maximum de puissance (MPP) est obtenu lorsque $\frac{dP}{dV} = 0$

A gauche ce point, dP/dV est positive et négative de l'autre côté. Comme $P=I.V$, le calcul différentiel donne $dP=V.dI + I.dV$, soit au MPP : $\frac{I}{V} + \frac{dP}{dV} = 0$

$$\text{on montre que : } \frac{dP}{dV} > 0 \Leftrightarrow \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} > 0$$

Numériquement, à partir des mesures de $I(n)$, $I(n-1)$, $V(n)$, $V(n-1)$, et en supposant que $dI \approx \Delta I = I(n) - I(n-1)$ et $dV \approx \Delta V = V(n) - V(n-1)$, on peut calculer $I/V + dI/dV$ et en déduire la direction du MPP par rapport au point de fonctionnement présent (et dans une moindre mesure la distance au MPP). La direction de convergence est donc toujours connue, ce qui est un avantage par rapport à la technique « hill climbing » présenté précédemment en particulier lorsque l'ensoleillement varie rapidement. Toutefois cette méthode pose des problèmes (répercussion des bruits de mesures dans les calculs, division par zéro ...)

La figure 14 ci-après montre le principe de mise en oeuvre d'une telle commande

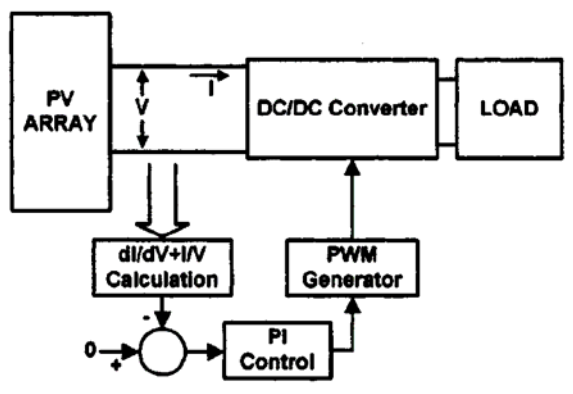


Figure 14 : MPPT par conductance incrémentale

3.2.3. Commande à tension ou courant de référence.

Il existe des méthodes plus simples basées sur le lien entre V_{oc} (tension du panneau en circuit ouvert) et V_{opt} :

$$V_{op} \# K \cdot V_{oc} \text{ avec } K < 1$$

En mesurant de temps en temps (10s pour le Solar Boost 2000) V_{oc} , on en déduit une tension qui sert de une référence pour la tension du panneau. Un asservissement de tension grâce à un correcteur PI, permet de faire converger V_{PV} à la valeur souhaitée. Elle est évidemment plus simple avec un convertisseur abaisseur. De la même façon une relation similaire existe entre le courant de court-circuit du panneau I_{sc} et le courant à l'optimum de puissance :

$$I_{op} \# K' \cdot I_{sc} \text{ avec } K' < 1$$

On utilise alors avec une régulation du courant photovoltaïque grâce à un correcteur PI, avec une remise à jour régulière de la consigne. Elle est évidemment plus simple avec un convertisseur élévateur, cf figure 15.

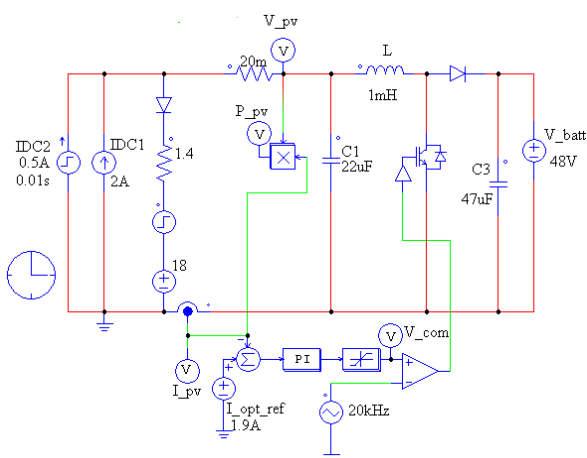


Figure 15 : MPPT par asservissement du courant seul

Dans tous les cas de figure ces méthodes sont simples à mettre en œuvre car elles ne nécessitent qu'un seul capteur, (ddp ou courant) et sont peu sensibles aux bruits car ne reposant pas sur un calcul de dérivée. Elles néanmoins présentent quelques défauts : d'une part le panneau ne produit plus pendant le temps nécessaire pour les mesures et d'autre part, le coefficient liant les grandeurs mesurées et les grandeurs optimales n'est pas toujours fixé avec exactitude et peu varier dans le temps en fonction du vieillissement. Il dépend en particulier de la température et de l'ensoleillement comme on peut le constater sur la figure 16 ci-après.

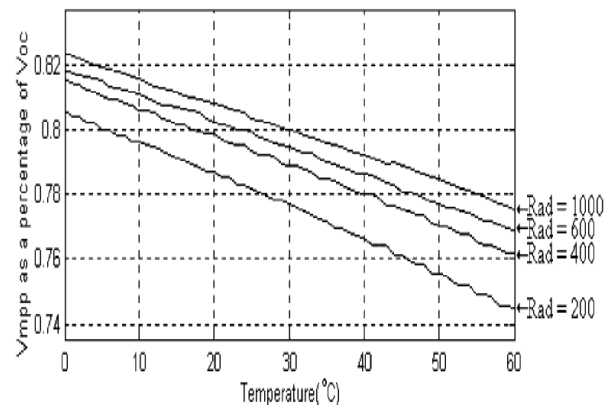


Figure 16 : VMPP en % de en fonction de la température et de l'irradiation [HO]

La connexion directe entre le panneau et la charge donne des résultats qui ne sont pas si mauvais que cela en raison de l'absence de pertes en commutation. Seules existent les pertes des MOS utilisés comme interrupteurs statiques pour connecter les panneaux et la charge à la batterie et les pertes dans la diode qui empêche les retours de courant dans le panneau.

4. Régulateurs à connexion directe

Ce sont les plus répandus. Ces régulateurs à connexion directe doivent intégrer les fonctionnalités de charge, décharge et sécurité citées plus haut. Il est donc indispensable de pouvoir déconnecter aussi bien le panneau, du moins faire en sorte qu'il ne fournisse plus d'énergie et pouvoir déconnecter les consommateurs. Deux types de régulateurs sont appropriés à ces exigences, les régulateurs « shunt » et les régulateurs « série ».

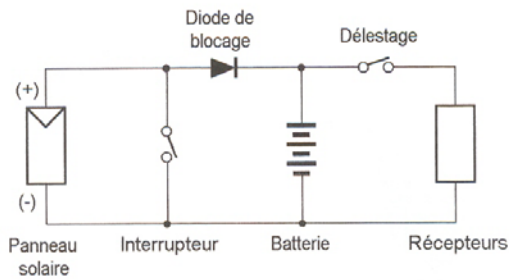


Figure 17 : Régulateur de type shunt [4]

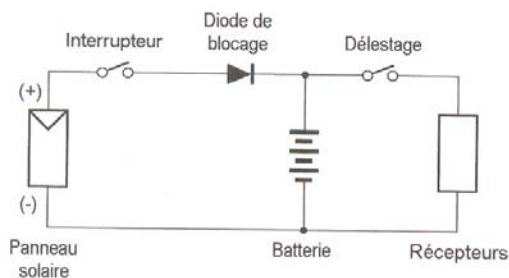


Figure 18 : Régulateur série [4]

5. Rendements

Les divers algorithmes P&O ou conductance incrémentale donnent des rendements entre 95 et 98%: et environ η_{PV} , 90% pour un algorithme à tension constante, G étant l'irradiation du soleil W/m^2 , A la surface du panneau et avec

$$\eta_{PV} = \frac{P_{MPP}}{G \cdot A}$$

Le rendement global de toute la chaîne est à prendre en compte et pas seulement celui du générateur photovoltaïque [10] [11]:

$$\eta_{Total} = \frac{P_{Max}}{G \cdot A_{eff}} \cdot \frac{P_{PV}}{P_{Max}} \cdot \frac{P_{Out}}{P_{PV}}$$

$$\eta_{Total} = \eta_{PV} \cdot \eta_{MPPT} \cdot \eta_{CONV}$$

Dans tous les cas il est nécessaire de surveiller la tension continue en sortie du convertisseur, c'est à dire soit la tension de la batterie pour un chargeur, soit la tension du bus continu pour un onduleur. De plus il est aussi utile pour contrôler la charge des batteries, de mesurer le courant de batterie, il est alors plus facile de maximiser la puissance en sortie de l'ensemble générateur + convertisseur car c'est bien cette puissance qui est utile et non celle extraite du panneau.

6. Bibliographie.

- [1] L. Protin, S. Astier, « Convertisseurs photovoltaïques », Techniques de l'ingénieur, D3360 - Vol DAB, <http://ti.idm.fr>
- [2] <http://www.steca-solar.com/>
- [3] SOLAR BOOSTTM 2000 Installation and operation Manual, RV POWER PRODUCTS Inc. <http://www.rvpowerproducts.com>.
- [4] <http://www.mastervolt.com/>
- [5] http://www.iufmrese.cict.fr/contrib/2008/PM/PSim_MPPT.shtml.
- [6] C. Glaize, « Photovoltaïque : Caractéristiques et recherche du point de puissance maximale » http://www.clubeea.org/enseign/mediat_et.htm
- [7] C. Jaouen, E. Lacombe, O. Bethoux, JP Kleider, « Etude didactique des systèmes photovoltaïques, optimisation thermique et électrique », revue 3EI n° 52 mars 2008.
- [8] 10 Amp Charge Controller Model: PT 12/24-10 Product specification, SOLAR CONVERTERS Inc. <http://www.solarconverters.com>
- [9] Solar Lighting Controller Model LS-2, Product specification, SOLAR CONVERTERS Inc. <http://www.solarconverters.com/>
- [10] D.P.Hohm and M.E.Ropp « Comparative study of Maximum Power Point Tracking Algorithms », , in Progress in Photovoltaics : Research and Applications, 2003; 11:47-62
- [11] S.Jain and V. Agarwal, "Comparison of the performance of maximum power point tracking schemes applied to single-stage grid-connected photovoltaic systems", IET Electr. Power Appl.,2007, 1, (5), pp 753-762

Ouvrages sur le photovoltaïque

F. Antony, C. Dürschner, K.H. Remmers, "Le photovoltaïque pour tous, Conception et réalisation d'installations", Ed. Observ'ER, ISBN-10:2-913620-38-8, 2006

Anne Labouret, Michel Villoz, "Energie solaire photovoltaïque, le manuel du professionnel", Ed. Dunod, 2003.

Jacques Bernard, " Energie Solaire", Coll. Génie Energétique, Ed. Ellipses, 2004.

COURSE DE DRAGSTERS ÉLECTRIQUES PARIS - MAI 2009

Association
Meet

MAÎTRISE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE POUR LES TRANSPORTS

ValoTec

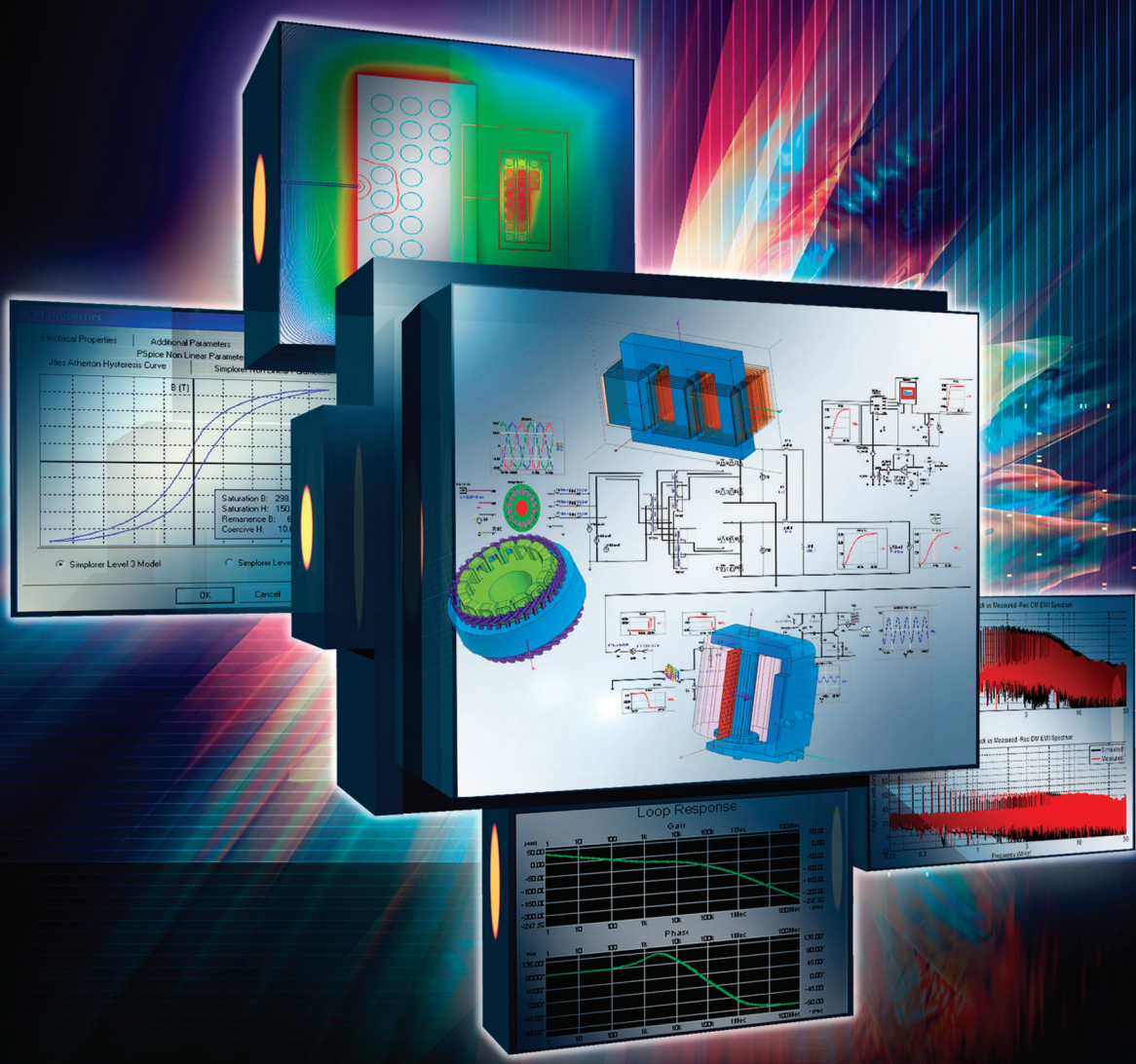
[HTTP://WWW.ASSOCIATION-MEET.ENS-CACHAN.FR](http://www.association-meet.ens-cachan.fr)

ENS
CACHAN

ASSOCIATION-MEET@LISTEENS-CACHAN.FR

SATIE

EEA



FIRST PASS SYSTEM SUCCESS

FOR POWER ELECTRONICS DESIGN

High-performance Power Electronic and Mechatronic systems demand concurrent component/circuit/system level modeling. Only accurate electromagnetics coupled with advanced circuit and system simulation can reliably predict complex system interactions. Let Ansoft show you how to achieve first-pass system success in your next design.

Nouvelles coordonnées Ansoft France:

Le Val St-Quentin, Bâtiment D
2, rue René Caudron
78960 VOISINS LE BRETONNEUX
T. 01 61 38 31 30 - F. 01 61 38 06 75
contactfrance@ansoft.com

