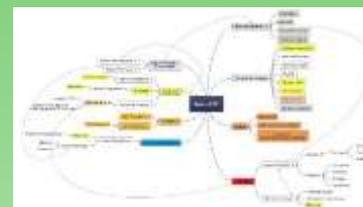
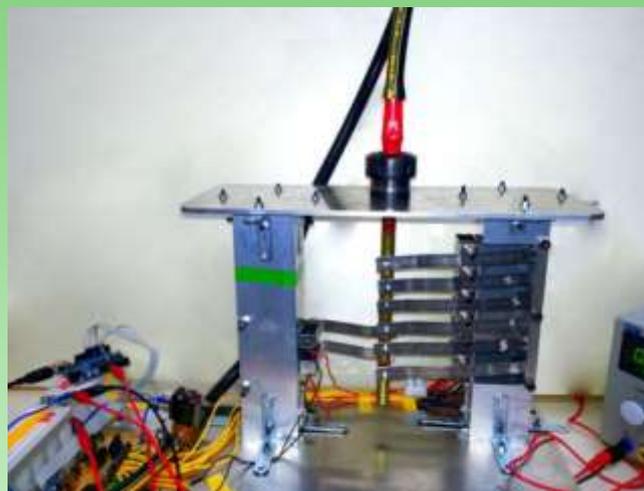
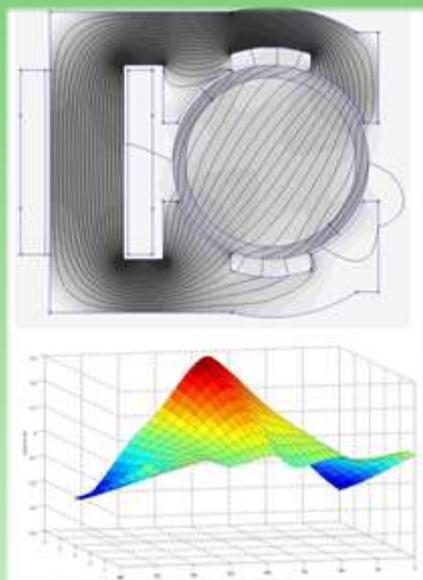
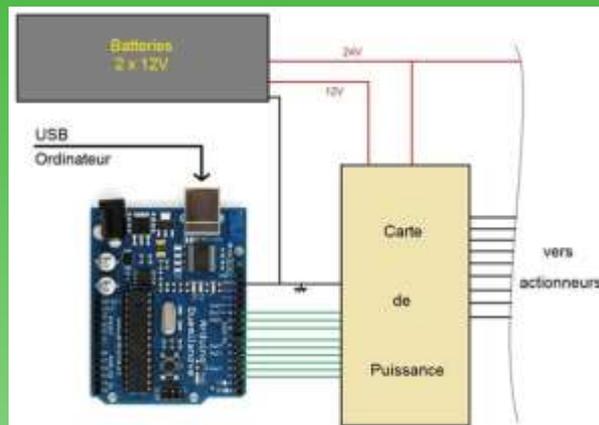


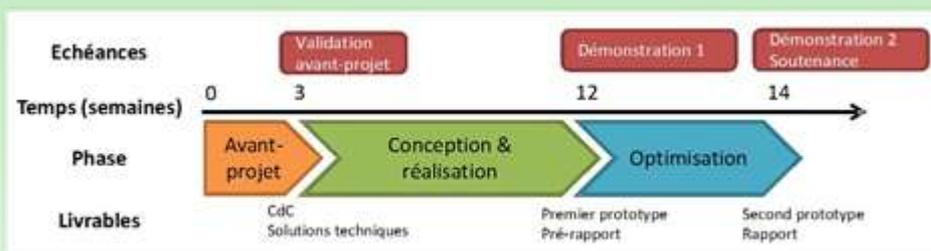
La Revue SEE



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



*Démarche
de
projets*



Publication trimestrielle du cercle thématique du Cercle Thématique 13-01 de la SEE

ENSEIGNER L'ÉLECTROTECHNIQUE ET L'ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE



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



La Revue 3EI

publication trimestrielle
du **Cercle Thématique 13-01**
de la SEE

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

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

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

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

<p>La Revue 3EI, Édition SEE, 17 rue de l'Amiral Hamelin 75783 PARIS Cedex 16</p> <p>Directeur de la publication François GERIN Président de la SEE</p> <p>Rédacteur en Chef Franck LE GALL</p> <p>Adresser les propositions d'article à : revue3ei.art@voila.fr</p> <p>Communication Mr Alain Brenac communication@see.asso.fr 01 56 90 37 09 publicité au rapport</p> <p>Abonnement (4 numéros par an) Janvier, Avril, Juillet, Octobre 2014. tarifs TTC : (revue papier) <u>Individuel</u> : France et CEE.....40 € Pays hors CEE.....50 € <u>Collectivités</u> France et CEE.....57 € Pays hors CEE.....70 €</p> <p>Réalisation et impression Repro-Systèmes 23, rue de Verdun 77181 Le Pin</p> <p>Routage et Expédition Départ Presse ZI les Richardets 93966 Noisy le Grand</p> <p>Dépôt Légal : Avril 2014 Commission Paritaire 1217 G 78028 ISSN 1252-770X</p>	<p style="text-align: right;">Sommaire du n° 76</p> <p style="text-align: center;">Démarche de projets</p> <p>p. 2 <i>Éditorial,</i></p> <p>p. 3 <i>Publications,</i></p> <p>p. 5 <i>L'initiation des étudiants au domaine de la recherche en école d'ingénieurs : l'exemple des projets PIRATE à l'ESTACA</i> J. AUBRY, T. AZIB, K. CHAABAN, S. GILLET, J. LEFEUVE, A. MEHEL, F. MURZYN, S. SAUDRAIS, R. SEHAB ESTACA, LAVAL</p> <p>p. 13 <i>Contribution à la pédagogie par projet : retour d'expérience en conception de systèmes mécatroniques à l'ENS Rennes</i> D. GRENIER, O. KERBRAT, F. LE BOURHIS, C. PONTONNIER. Ecole normale supérieure de Rennes RENNES</p> <p>p. 21 <i>Une expérience de projet pluri technologique en IUT conception et fabrication d'une éolienne urbaine</i> S. RODDIER, A. BRUGIER IUT St Denis SAINT DENIS</p> <p>p. 34 <i>Exemples de projet technique en partenariat avec des industriels en STS électrotechnique</i> M. CHERIGUENE Lycée Jean Jaurès ARGENTEUIL</p> <p>p. 41 <i>Démarche de projet en STIDD</i> M. GARCIA Lycée Louis Armand NOGENT SUR MARNE</p> <p style="text-align: center;">Hors Thème</p> <p>p. 52 <i>Retro-engineering : un exemple de démarche pédagogique</i> H. BEN AHMED, F. OUCHET, S. GARDETTE, R. LE GOFF LATIMIER ENS Rennes département mécatronique RENNES</p> <p>p. 61 <i>Logiciel de mesure « large spectre » des puissances électriques en régime quelconque</i> L. LASNE S. YGORRA Université de Bordeaux BORDEAUX</p> <p>p. 70 <i>Etude de cas de la conception d'un parc d'hydroliennes (Partie 1)</i> Franck LE GALL Lycée Jules Ferry, VERSAILLES</p>
--	--

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

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

Nous consacrons notre nouveau numéro de la revue 3EI à la démarche de projets dans le domaine de l'enseignement des sciences et techniques. Les différents articles proposés vous feront découvrir une grande palette d'exemples pris à plusieurs niveaux d'enseignement, de la STI2D à l'école d'ingénieurs en passant par les STS et les IUT.

Nous avons tous conscience que cette pédagogie prendra de plus en plus de place dans nos enseignements. Nous espérons donc que ces articles vous inspireront et que vous n'hésitez pas à nous faire part de votre propre expérience en nous proposant des articles que nous aurons le plaisir de publier dans les prochains numéros de la revue 3EI.

Le thème s'ouvre avec l'article de M. Aubry qui nous décrit les projets PIRATE proposés à l'ESTACA afin de permettre à leurs élèves ingénieurs de découvrir le monde de la recherche, particulièrement en lien avec le domaine du transport.

M. Grenier de l'Ecole Normale Supérieure de Rennes consacre lui son article à la démarche de projets de conception de systèmes mécatroniques en 1^{ère} année d'école. Il expose clairement les conditions nécessaires à leur réussite et la nécessité de mettre des outils en place pour le suivi du travail des étudiants.

Un autre aspect de la démarche de projets est illustré par M. Roddier et M. Brugier avec la description de la fabrication d'une éolienne urbaine, projet éminemment pluri technologique mené en IUT avec, à la clé, la victoire au concours GIM'Eole 2014 !

La démarche de projets, c'est aussi des projets menés en partenariat avec des entreprises. Par exemple dans le cadre des STS Electrotechnique comme nous le montre l'article de M. Cheriguene.

Ce panorama sur la démarche de projets dans l'enseignement se termine avec l'article de M. Garcia qui porte sur le retour d'expérience d'un projet de domotique réalisé par quatre élèves dans le cadre de la réforme STI2D.

Ouvrant la série des articles « hors thème », M. Ben Ahmed propose une nouvelle démarche pédagogique : le rétro-engineering. Cette approche consiste en une analyse scientifique et technologique sur des objets existants et devant mener à la compréhension des phénomènes physiques mis en œuvre et à la justification partielle des choix technologiques effectués. Cette expérience pédagogique a été réalisée avec des élèves de 1^{ère} année de l'ENS Rennes.

Vous aurez aussi le plaisir de lire la contribution de M. Lasne et M. Ygorra sur un logiciel de mesure "large spectre" des puissances électriques en régime quelconque. Ce logiciel, conçu sur la base d'un script Scilab, permet la mesure complète des puissances uniquement grâce à un oscilloscope et un ordinateur personnel.

Enfin ce numéro se terminera par un article de M. Le Gall qui donne une vue d'ensemble de la conception d'un parc d'hydroliennes.

Le site de la revue (<http://www.see.asso.fr/3ei>) évolue en permanence et vous pouvez dès **aujourd'hui vous abonner directement par voie numérique**. Nous souhaitons que ce mode d'abonnement soit de plus en plus utilisé pour limiter le temps de traitement au format papier des demandes d'abonnement.

N'hésitez pas à nous proposer des articles sur votre expérience (à envoyer à l'adresse e-mail revue3ei.art@voila.fr).

Bonne lecture.

Le Comité de Publication de la Revue3EI

Faites connaître notre revue !
Vous en assurez ainsi la pérennité.

La Revue 3EI

Comité de publication

Hamid BEN AHMED

Arnaud BRUGIER

Jacques COURAULT

Jean FAUCHER

Gilles FELD

Jean-Philippe ILARY

Chérif LAROUCI

Marie-Michèle LE BIHAN

Franck LE GALL

Denis LABROUSSE

Pascal LOOS

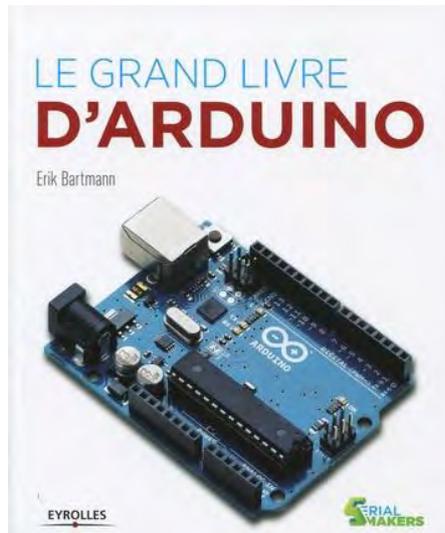
Marc PETIT

Sylvain PIETRANICO

Oviglio SALA

Jean-François SERGENT

Jean-Claude VANNIER



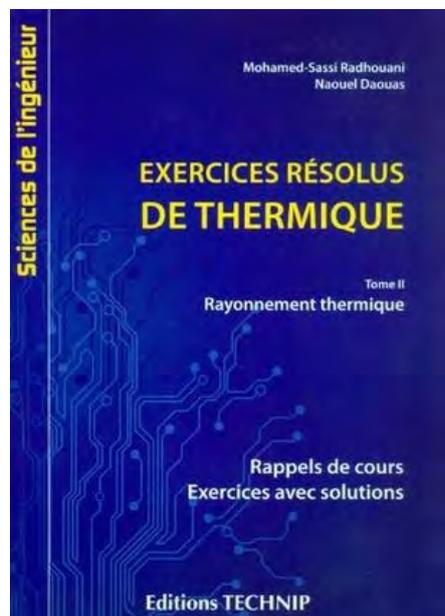
Le grand livre d'Arduino

Erik Bartmann

EYROLLES

Avec son petit microcontrôleur hautement performant et facilement programmable, la plate-forme libre Arduino a révolutionné le mouvement Do It Yourself. Se couplant aisément avec d'autres composants (écrans LCD, capteurs, moteurs...), elle est devenue aujourd'hui un élément indispensable dans de nombreux dispositifs électroniques. Sa simplicité d'utilisation, l'étendue de ses applications et son prix modique ont conquis un large public d'amateurs et de professionnels : passionnés d'électronique, designers, ingénieurs, musiciens...

Cet ouvrage de référence, remarquable par son approche pédagogique, vous fera découvrir le monde magique d'Arduino, en vous délivrant un peu de théorie et surtout beaucoup de pratique. Ses 19 projets concrets, avec code source disponible en ligne, vous permettront de juger du gigantesque potentiel de ce circuit imprimé qui n'a pas fini de faire parler de lui.



Exercices résolus de thermique

Tome 2 - Rayonnement thermique

Mohamed-Sassi Radhouani, Naouel Daouas

TECHNIP

Comme pour chaque discipline à caractère industriel, la compréhension et la maîtrise de la Thermique n'est possible que grâce à la pratique d'exercices dans ses divers domaines d'application.

C'est ce que propose ce deuxième tome d'exercices entièrement résolus, qui comprend également un rappel de cours spécifique. Consacré au rayonnement thermique, l'ouvrage inclut des exercices classiques ou inédits, qui vont du plus simple (application directe des lois fondamentales) au plus complexe (approfondissement des connaissances acquises). Les solutions analytiques et numériques, ainsi que les méthodes de calcul, sont détaillées pour faciliter leur utilisation dans d'autres situations.

Afin de faire ressortir l'aspect physique de la Thermique et de matérialiser les ordres de grandeur, un accent particulier a été mis sur l'analyse et l'interprétation des résultats.

Cet ouvrage s'adresse aux étudiants des premiers et seconds cycles universitaires, ainsi qu'aux ingénieurs, chercheurs et enseignants qui veulent disposer d'un outil pédagogique permettant de mettre en pratique les connaissances théoriques et de se familiariser avec des situations concrètes.

Symposium de Génie Électrique 2014

du 8 au 10 juillet 2014 à CACHAN

Présentation

Pour l'édition 2014, la communauté de chercheurs et d'industriels francophones en génie électrique a souhaité organiser un symposium commun réunissant pour la première fois les trois principaux colloques actuels organisés dans le domaine de l'énergie électrique : **EF**, **EPF** et **MGE**.

L'objectif de cet événement est de réunir en un même lieu les spécialistes du domaine de la conversion et du traitement de l'énergie électrique, traitant aussi bien des matériaux, de l'électronique de puissance que de l'électrotechnique. Ce symposium permettra de faire le point sur les évolutions les plus récentes dans ces domaines.

C'est donc pour nous tous, une occasion unique à plusieurs titres :

- Rencontrer et échanger avec les représentants académiques et industriels des principales composantes du Génie Electrique
- Diffuser le plus largement les travaux de recherche et les avancées récentes dans les domaines du GE
- Générer des intérêts et approches communes voire inter-disciplinaires

Des conférences et des posters constitueront le socle de ces journées. Par ailleurs, des entreprises y présenteront leur matériel et équipements.

Thèmes proposés

Les thèmes proposés pour SGE sont :

- Matériaux magnétiques
- Matériaux Isolants et Diélectriques, Systèmes d'isolation
- Matériaux conducteurs et supraconducteurs
- Matériaux actifs
- Composants semi-conducteurs de puissance
- Composants passifs
- Intégration de puissance, assemblage et packaging
- Architectures de convertisseurs
- Dispositifs électromagnétiques et actionneurs spéciaux
- Chaînes de conversion électromécaniques
- Systèmes de conversion de l'énergie électrique
- Gestion et stockage de l'énergie
- Microsystèmes
- Les grands appareillages de physique
- Réseaux et micro-réseaux électriques
- Contraintes d'usage : thermiques, électriques, mécaniques, CEM...
- Contrôle/commande de systèmes électriques
- Sécurité de fonctionnement : fiabilité, vieillissement, diagnostic et systèmes tolérants
- Méthodes et méthodologies en génie électrique

Sessions spéciales

Des thèmes spécifiques seront également abordés par le biais de sessions spéciales.

Lieu : Ecole Normale Supérieure de Cachan 61 Avenue du Président Wilson 94235 Cachan Cedex



L'initiation des étudiants au domaine de la recherche en école d'ingénieurs : l'exemple des projets PIRATE* à l'ESTACA

(*Projet d'Initiation à la Recherche Appliquée en Travail Encadré)

J. AUBRY, T. AZIB, K. CHAABAN, S. GILLET, J. LEFEUVE, A. MEHEL, F. MURZYN, S. SAUDRAIS, R. SEHAB

ESTACA, Rue Georges Charpak, 53061 Laval Cedex 9 France

Résumé : Depuis la rentrée 2012, l'ESTACA offre la possibilité à ses élèves ingénieurs de découvrir le monde de la recherche par l'intermédiaire des projets PIRATE. Encadrés par des enseignants chercheurs, ils portent sur les compétences propres aux EC du CERIE et sont en lien avec le monde des transports. Un des objectifs est de les inscrire dans la durée en les étalant de la 3^{ème} à la 5^{ème} année. Dans cet article, nous exposerons dans un premier temps le contexte, les objectifs et l'organisation mise en place pour ces projets. Les sujets proposés seront ensuite présentés. Finalement, en nous appuyant sur un verbatim de témoignages étudiants ayant pris part à ces nouveaux projets, un premier retour d'expérience sera fait.

1. Introduction

Localisée sur 2 sites (Levallois Perret (92) et Laval (53)), l'ESTACA est une école d'ingénieurs post-bac spécialisée acteur européen majeur dans le domaine des transports et de la mobilité. Grâce à une pédagogie innovante au cœur des problématiques des transports (écoconception, systèmes embarqués, système propulsif, énergies à bord...) et à un centre de recherche en ingénierie en plein développement, l'école diplômée des ingénieurs dotés d'un savoir-faire technique reconnu dans le monde industriel et économique. Ouverte sur le monde, l'école compte une quarantaine de partenaires universitaires étrangers et travaille avec de nombreuses organisations telles que la NASA. Passionnés et professionnels, les ingénieurs ESTACA sont reconnus dans le monde industriel pour leur capacité à s'adapter rapidement. Très demandés par les entreprises, près de 80% des élèves ingénieurs de l'école signent un contrat avant l'obtention de leur diplôme.

Dans le cadre de ses innovations pédagogiques, l'école a lancé depuis la rentrée 2012 le projet « PIRATE » (**P**rojet d'**I**nitiation à la **R**echerche **A**ppliquée par le **T**ravail **E**ncadré). Ouvert dès la 3^{ème} année pour un nombre limité d'étudiants volontaires, les objectifs associés à cette initiative pédagogique sont nombreux et doivent permettre à chaque étudiant sélectionné :

- ✓ de découvrir l'environnement de la recherche, son fonctionnement, ses enjeux, ses parcours, ses opportunités ;
- ✓ de faire entrer la carrière de chercheur dans son champ de parcours professionnels

possibles avec la possibilité de poursuivre en thèse ;

- ✓ de mobiliser ses connaissances, d'orienter sa curiosité scientifique et de lui faire acquérir des compétences dans une thématique choisie, de gagner en autonomie, en organisation, en méthodes de travail, en contextualisation et en capacité à vulgariser, synthétiser et transmettre des compétences ;
- ✓ de vivre une expérience différente valorisante et valorisable ;
- ✓ de s'investir sur un projet à long terme (3 ans) ;
- ✓ de préparer à d'éventuels masters ouverts avec nos partenaires...

L'ESTACA s'est donné les moyens d'atteindre ces objectifs pédagogiques. Ces projets, qui s'étalent de la 3^{ème} à la 5^{ème} année, permettent aux étudiants de travailler en binôme sur un sujet de recherche proposé et encadré par un enseignant-chercheur. Les étudiants voient ainsi leurs missions évoluer progressivement depuis une étude bibliographique jusqu'à la réalisation pratique de mesures et de modélisations numériques ou expérimentales en passant par la découverte d'une équipe de recherche, de son fonctionnement, de ses thématiques et par la prise en main des moyens à disposition. A terme, les étudiants apprennent donc à s'intégrer dans un travail de recherche, à aborder des problématiques concrètes et à orienter un travail en fonction d'objectifs scientifiques et professionnels. En fonction du travail réalisé, la publication d'un article sera proposée en 5^{ème} année portant sur l'intégralité de leur travail.

Ces projets sont également valorisés semestriellement par des crédits ECTS au même titre que des projets « filières » déjà intégrés au cursus.

Pour s'assurer de l'investissement des étudiants, une sélection est effectuée en début de 3^{ème} année pour recruter les étudiants, compte tenu du nombre limité de places.

Dans cet article, on se propose donc de faire un premier bilan de cette innovation pédagogique qui a rencontré un franc succès sur sa première année de mise en place.

2. Les projets PIRATE proposés en 2012-2013

- a. *Projet Commande & Systèmes : Stratégie d'hybridation d'un réseau de secours électrique pour l'aéronautique utilisant une pile à combustible*

Projet encadré par Toufik Azib

Etudiants impliqués : Franck-Gaëtan NGUEFANG KAMTO

Introduction : En aéronautique, les grands groupes industriels se préparent à un profond changement des systèmes énergétiques à bord des avions. Ce changement se caractérise par le remplacement des énergies hydraulique et pneumatique sous une forme électrique. Les « avions plus électriques » devront permettre une baisse du coût global de possession, une meilleure efficacité propulsive et une diminution de l'impact environnemental.

Objectif : Ce projet a pour objectif de se confronter aux problématiques et aux technologies qui permettront de relever ce défi. En effet, il apparaît que les systèmes électriques peuvent contribuer à réduire la masse totale de l'avion, simplifier la régulation et donner la possibilité d'isoler une partie du réseau tombée en panne et d'augmenter la fiabilité. Ainsi, les systèmes électriques se répandent de plus en plus.

Ce projet a pour ambition de déterminer une alternative au système actuel de réseau de secours électrique (RAT petite turbine éolienne) d'un Airbus A320 en utilisant un système hybride pile à combustible & supercondensateurs. L'étude s'intéresse au dimensionnement et la gestion d'énergie de cette alimentation hybride. Le système hybride étudié (Figure 1) se compose d'une source d'énergie principale : pile à combustible (PAC), assistée d'une source d'énergie impulsionsnelle réversible, à base de supercondensateurs (SCs).

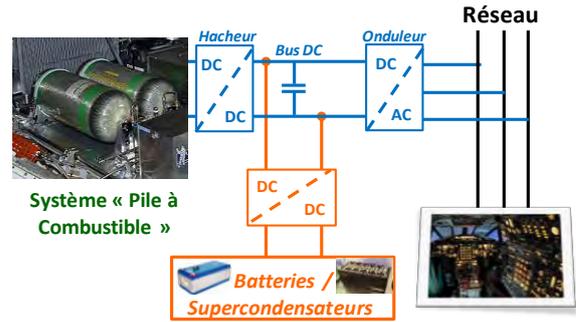


Figure 1 : Architecture du réseau de secours étudié

Résultats : La Figure 2 présente la réponse du système hybride pour un profil de mission de secours (Figure 2-a). On observe deux dynamiques différentes (Figure 2-b). La réponse en puissance de la PAC est plus lente et se stabilise autour de la puissance moyenne de la charge. La dynamique lente confirme le choix, selon lequel la PAC est sollicitée pour les basses fréquences de la charge. La puissance des SCs a une dynamique rapide pour satisfaire les hautes fréquences (transitoires) de la charge. Ainsi, on peut voir que la puissance fournie par les sources permet de satisfaire la demande à tout instant.

Par ailleurs, à chaque transitoire de charge, la tension de bus (Figure 2-c) est transitoirement légèrement affectée (< 4%), mais est globalement bien régulée à sa valeur de référence constante

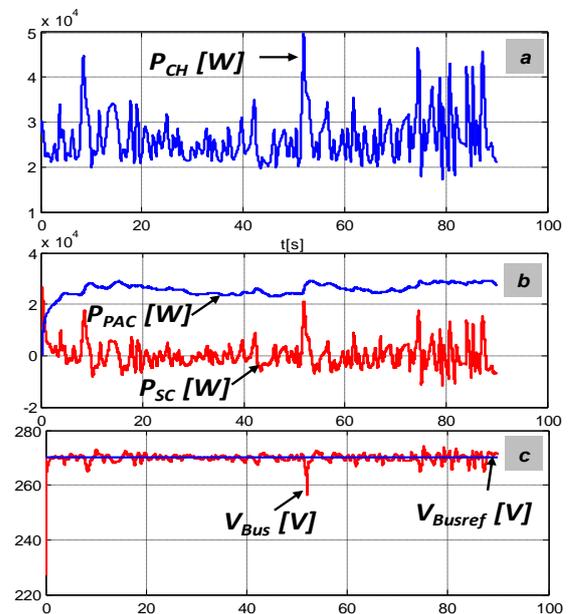


Figure 2 : Réponse du système pour un profil de mission

Conclusion : Ce projet correspond à une première approche d'étude d'une solution alternative au système actuel de réseau de secours électrique d'un Airbus A320. Les résultats obtenus permettent de valider le potentiel de la structure proposée pour satisfaire le cahier des charges donné par le profil de mission de secours.

- b. *Projet mécatronique, Amélioration des performances d'un système d'admission d'un moteur thermique*

Projet encadré par Rabia Sehab et Judicael Aubry
Etudiants impliqués : B. Gandon et P.-O. Pacilly



Figure 3 : Vanne papillon motorisée

Introduction : Le système d'admission d'air d'un moteur thermique est constitué, entre autres composants, d'une vanne papillon dont le rôle est de réguler le débit d'air entrant et ainsi ajuster la richesse du mélange comburant/carburant. La richesse de ce mélange impacte sur la consommation, l'encrassement, la température des gaz d'échappement etc. Le contrôle précis d'une vanne papillon est donc un facteur essentiel pour optimiser l'utilisation d'un moteur thermique.

Objectif du projet : L'objectif de ce sujet est d'étudier une vanne papillon motorisée pour ensuite concevoir une loi de contrôle pertinente.

Travail réalisé : Dans la première partie de ce travail, une modélisation par éléments finis du moteur couple (Figure 4) a été effectuée afin d'identifier avec précision les paramètres électriques et électromagnétiques du modèle de ce dernier et d'établir un modèle avec la prise en compte de non linéarité. Le travail de cette année a aussi consisté en une étude bibliographique sur différents points. Tout d'abord, des aspects plutôt généraux des vannes papillons, puis des travaux liés à la modélisation des frottements mécaniques. Certaines lectures ont permis aux étudiants de s'imprégner des stratégies de régulation avancées afin de pouvoir se projeter sur la suite.

Travail à venir : Dans une deuxième étape, une régulation classique du type PID est à concevoir en intégrant deux boucles de régulation en cascade : une boucle de courant et une boucle de position. Pour une première évaluation des performances du système d'admission, une simulation, basée sur une modélisation

des différents composants constituant le système d'admission sera effectuée en boucle fermée pour différents points de fonctionnement. Ainsi, la régulation conçue sera ensuite validée expérimentalement sur une plateforme dSpace. Dans la troisième étape et tenant compte de la limitation de la régulation classique, une régulation avancée, basée sur le contrôle par logique floue, sera développée et prendra en compte les non-linéarités du système ainsi que les perturbations présentes à savoir le bruit de mesure des capteurs et la force aéroulque exercée sur la vanne papillon.

Dans une dernière partie, une étude comparative sera effectuée entre les deux types de régulation en vue d'évaluer les performances du système en boucle fermée.

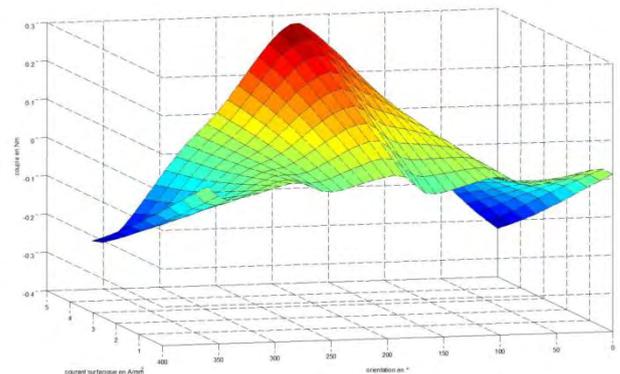
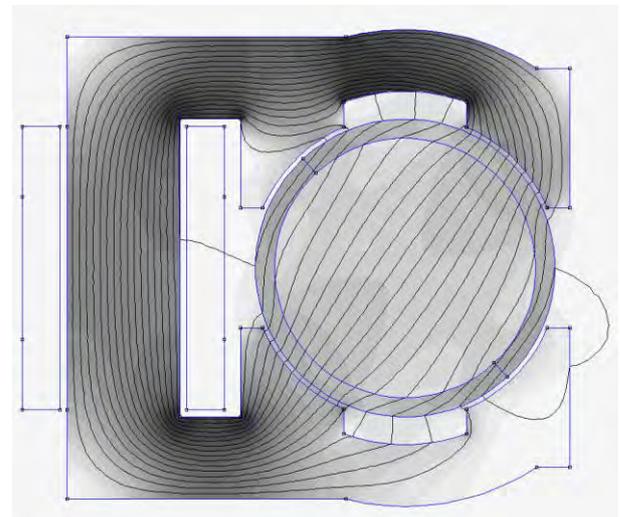


Figure 4 : Carte de champ de l'actionneur obtenue avec le logiciel FEMM en haut, Un batch a permis de tracer le couple en fonction du courant et de la position (en bas).

c. *Projet Composite, Thermoplastiques à fibres continues - Etat de l'art sur la mise en œuvre et le comportement mécanique*

Projet encadré par Stéphane Gillet/

Etudiants impliqués : P. Bourgoïn et B. Musy

Ce projet a été réalisé sur un semestre sous l'encadrement de Stéphane Gillet. Le travail avait 2 objectifs : s'immerger dans l'équipe « structure et matériaux » et réaliser une étude bibliographique sur les composites thermoplastiques à fibres continues afin d'identifier les besoins, les acteurs industriels et scientifiques, ainsi que les verrous scientifiques.

L'immersion s'est réalisée au travers d'une présentation générale des activités du laboratoire, de rencontres avec les enseignants chercheurs pour échanger autour de leur parcours et leurs travaux de recherche. Ils ont participé en tant que spectateurs à différentes manipulations expérimentales, comme des essais mécaniques (traction quasi statique, flexion, lâchés de masse). Côte mise en œuvre, en plus d'assister à la réalisation de composites à résine nano chargée par infusion, ils ont eu l'occasion de visiter la halle de production du CEMCAT (Centre d'Etude sur les Matériaux Composites Avancés pour les Transports), dont l'expertise concerne la transformation des composites à matrice thermoplastique ou thermodurcissable.



Figure 5 : projection de fibres de verre sur une préforme

L'étude bibliographique a été réalisée à partir de documents provenant de différentes sources : une présentation généraliste sur les composites à matrice thermoplastique, un brevet, 3 articles de la 15^{ème} conférence Européenne sur les matériaux composites, un manuscrit de thèse et un article des techniques de l'Ingénieur.

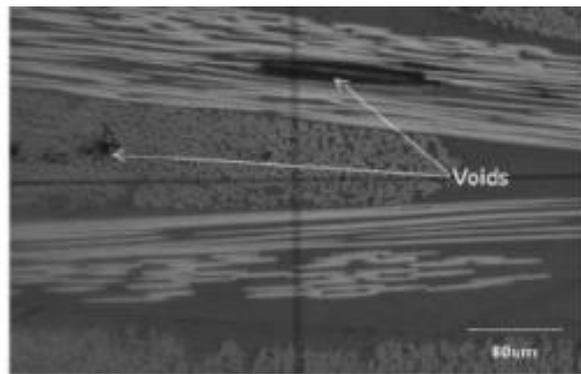


Figure 6 : Défaut d'imprégnation de fibre conduisant à de la porosité.

Les principaux verrous scientifiques relevés lors de l'étude bibliographique sont les suivants :

- Fiabilisation des procédés de mise en œuvre, liés en particulier à la viscosité de la matrice et à la déformation des renforts. Cette fiabilisation passe par une meilleure maîtrise de la simulation du process
 - Modélisation que ce soit du process ou intégrative process/produit. Les travaux sur les fibres courtes sont plus avancés du fait d'une meilleure compréhension et simulation du process (distribution et orientation des fibres).
- d. *Projet Fluides et Energétique : Etude expérimentale de l'atomisation : influence du diamètre et de l'angle de la buse des injecteurs*

Projet encadré par Amine Mehel

Etudiants impliqués : Chris Dobe et Clément Virey

Introduction : La réduction de la consommation et des rejets de polluants est devenue depuis ces dernières décennies une des préoccupations majeures des acteurs de l'industrie des transports. Cette problématique est abordée sous plusieurs aspects mécaniques ou systémiques comme l'étude de l'atomisation, de l'efficacité de la boucle d'air ou encore du contrôle moteur,... L'atomisation est un mécanisme physique faisant intervenir deux ou plusieurs fluides (air/kérosène, air/essence,...) et trouve de nombreuses applications faisant intervenir de la combustion. Ceci est évidemment le cas dans les moteurs à combustion interne dans l'automobile ou des turboréacteurs dans l'aéronautique mais aussi dans la spatial pour les propulseurs liquides. L'amélioration de l'atomisation permet d'augmenter l'efficacité de la combustion et par là même de réduire la consommation et le rejet des polluants. Le but principal du projet est l'évaluation,

par mesures laser, de l'influence de la géométrie (diamètre, angle de la buse) et de la pression d'injection sur la granulométrie issue d'un injecteur utilisant de l'eau.

Moyens utilisés : Le principal instrument de mesure utilisé dans ce projet est dénommé « Particle Dynamics Analysis » (PDA) qui utilise l'effet Doppler pour mesurer vitesses et diamètres des gouttelettes issues de l'injecteur. L'effet Doppler est dû au mouvement de la particule qui induit une modification de la fréquence du laser incident par rapport à celui qui est réfléchi.

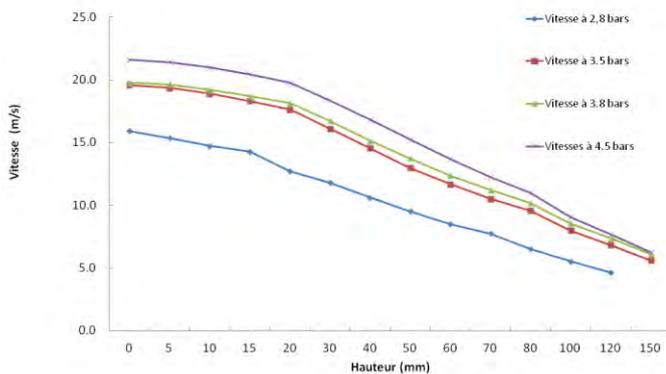


Figure 7 : Evolution de la vitesse en fonction de la distance axiale et de la pression d'injection

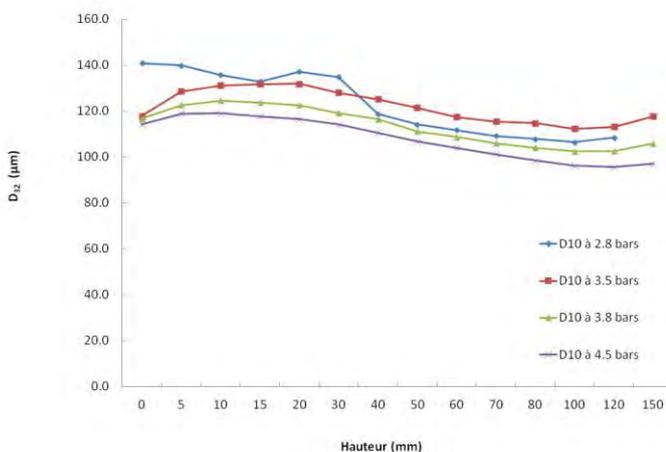


Figure 8 : Evolution du diamètre moyen de Sauter en fonction de la distance axiale et de la pression d'injection

Résultats : Les figures Figure 7 et Figure 8 présentent l'influence de la distance axiale par rapport à la buse d'injection ainsi que de la pression d'injection sur l'évolution de la vitesse ainsi que du diamètre moyen de Sauter D_{32} des gouttelettes. La pression augmente la vitesse d'injection qui est accompagnée par une réduction du diamètre des gouttelettes qui sont ainsi mieux dispersées par la turbulence ce qui donne lieu à une combustion plus homogène.

Conclusion : Tout au long du projet, les étudiants ont eu à s'immerger et à s'approprier le sujet en découvrant le processus classique de la recherche en commençant par une analyse bibliographique de l'atomisation : principe, paramètres d'influence ; puis la prise en main du dispositif laser PDA pour la mesure de la vitesse et de la granulométrie des gouttelettes et ensuite le développement de leur esprit critique et de la capacité d'analyse.

e. *Projet Système Embarqué : ordonnancement temps réel d'un système embarqué*

Projet encadré par Khaled Chaaban

Etudiants impliqués : Hamza ESSAYEGH

Introduction : Dans le domaine du transport, la plupart des systèmes embarqués sont classifiés aujourd'hui comme des systèmes temps réel critiques. Cela signifie qu'ils doivent respecter des contraintes temporelles et que l'information qu'ils produisent doit être correcte mais surtout arriver avant une échéance stricte, sous peine de conséquences potentiellement sévères. La spécification de ces contraintes temporelles dans le début du cycle de développement du système est une étape importante. Elle doit permettre leurs modélisations ainsi que l'analyse et la vérification de ses propriétés temporelles vis-à-vis des contraintes du cahier des charges. Plusieurs méthodes existent dans ce domaine permettant l'analyse et la vérification d'un système embarqué temps réel. Parmi ces méthodes, es techniques d'ordonnancement reposent sur un modèle analytique du système et permettent de vérifier formellement les propriétés temporelles du système.

Objectif du projet : L'objectif du projet est d'étudier les différentes techniques d'ordonnancement utilisées dans le domaine de l'informatique temps réel. Dans un premier temps, une étude sera faite sur les différents modèles des systèmes temps réel, sur les contraintes et propriétés temporelles du système puis sur les différentes approches pour faire de l'ordonnancement temps réel. Dans un second temps, une étude comparative de ces différents algorithmes d'ordonnancement vis-à-vis de leurs garanties temporelles, de leurs domaines d'applications et puis de leurs complexités.

Travail réalisé : Dans un premier temps, le travail a consisté à s'immerger dans le domaine de recherches. Les travaux de recherches de l'équipe « Systèmes Embarqués » ont ainsi été présentés aux étudiants de même que les outils disponibles pour la recherche de la bibliographie. Ensuite, une première étude a porté sur les systèmes temps réel, leurs contraintes temporelles et de sécurité et sur les différentes techniques

d'ordonnancement existantes pour l'analyse et la vérification temporelle du système. Dans un second temps, une étude approfondie sur les algorithmes d'ordonnancement RM/EDF a été réalisée. Elle a permis d'effectuer un benchmark de comparaison des performances de ces deux classes d'algorithmes sur une étude de cas industriel : l'architecture logicielle du contrôleur moteur BR715 de chez Airbus (**Figure 9**).

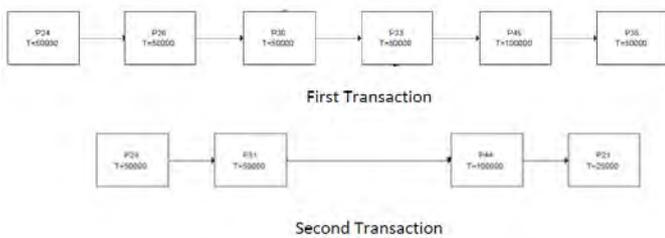


Figure 9 : Les deux transactions temps réel de bout-en-bout étudiées

Deux algorithmes d'ordonnancement ont été comparés dans cette étude : RM (Rate Monotonic) et EDF (Earliest Deadline First) cf. **Figure 10**. RM est un algorithme de la famille des algorithmes d'ordonnancement à priorité fixe. Il est très répandu car reconnu pour sa robustesse et sa garantie d'ordonnancement optimale dans le cas des systèmes temps réel périodiques. Cependant, il manque de flexibilité et ne permet pas l'exploitation optimale des ressources.

L'algorithme EDF fait partie de la famille des algorithmes à priorité dynamique. Il est reconnu pour son optimalité dans le cas des systèmes dynamiques à échéance sur requête (deadline = période) et par son taux d'utilisation des ressources assez élevé.

RM results

Transaction's number	Worst response (in unit of time)
First transaction	2282.00
Second transaction	4359.00

EDF results

Transaction's number	Worst response (in unit of time)
First transaction	2282.00
Second transaction	2077.00

Figure 10 : comparaison des résultats obtenus avec les deux algorithmes RM et EDF

Afin de modéliser et puis analyser le système, une étude sur l'ensemble des outils existants a été menée. Elle a permis d'opter pour l'outil MAST (gratuit et open source) qui permet de modéliser, analyser et vérifier le système (**Figure 11**).

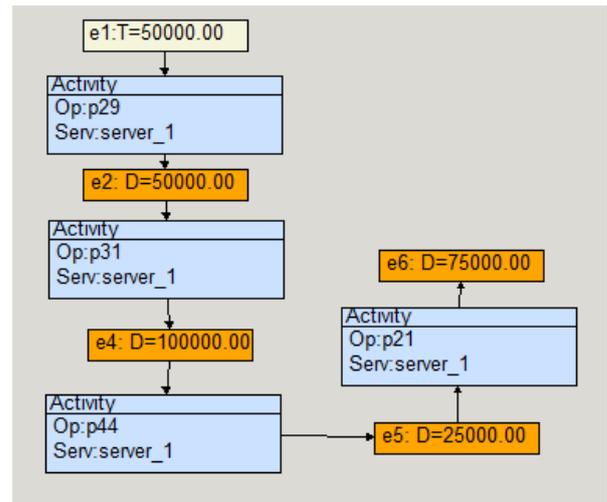


Figure 11 : modélisation du système sous l'outil d'analyse MAST.

f. *Projet Système Embarqué, Méthodologie pour la réutilisation de composants logiciels*

Projet encadré par Sébastien Saudrais

Etudiants impliqués : G. Merlet, J. Silande

Introduction : L'utilisation des composants logiciels pour le développement d'application est aujourd'hui présente dans l'ensemble des applications informatiques. Dans le domaine des transports, les standards de développement de l'automobile et de de l'aéronautique, respectivement AUTOSAR et AADL, utilisent le paradigme composant. L'utilisation de composants permet un développement séparé des différentes parties du système. Un mécanisme de composition assemble les composants et offre la fonctionnalité désirée. Une des propriétés des composants est leur réutilisabilité potentielle permettant une accélération des développements futurs. Malheureusement, la réutilisation d'un composant n'est pas toujours aisée et l'adaptation d'un composant est souvent plus coûteuse que d'en redévelopper un autre.

Objectif du projet : L'objectif du projet est de définir les caractéristiques essentielles pour développer des composants logiciels réutilisables. La première étape est donc une découverte du paradigme composant : composant, port, interface et composite. Une fois les mécanismes de conception connus, il faut étudier le comportement des composants et leurs interdépendances afin de valider leur possible réutilisabilité. Lorsque les caractéristiques seront identifiées, une méthodologie de conception à base de composants sera proposée afin de garantir la réutilisabilité future des composants développés.

Travail réalisé : Le travail de la première année consistait en l'étude du paradigme composant au travers d'une étude bibliographique à l'aide d'articles

posant les bases des composants ou décrivant des modèles à composants comme UML ou AADL.

Une comparaison des différents modèles à composants a été effectuée et une application sur un exemple de steer-by-wire a permis aux étudiants de se familiariser avec les outils existants, la **Figure 12** montre l'application en AADL. Le code généré à partir de l'exemple a permis de valider la modélisation en composants.

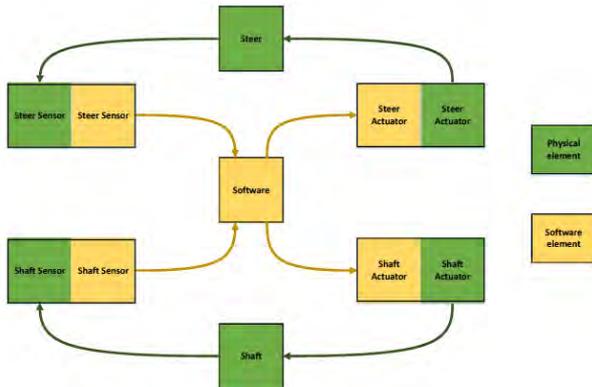


Figure 12 : Steer-by-wire en AADL

3. Verbatim de témoignages

a. Témoignage de Clément Virey (projet FE) :

« Je trouve le projet PIRATE vraiment très intéressant. Premièrement, c'est un projet à « long terme », on ne travaille pas sur quelque chose que l'on devra abandonner trois mois plus tard, c'est très motivant car le travail que l'on fournit nous sert d'appui par la suite, ce n'est pas simplement un travail à rendre. Avoir un but à plus long terme permet d'apprendre à s'organiser et de voir les démarches nécessaires à l'accomplissement d'un projet.

L'autre aspect du PIRATE qui me motive est le fait que le but est d'orienter le projet progressivement vers ce qui nous semble le plus pertinent pour mieux comprendre la problématique et essayer d'y répondre. Cela nous mène aussi à approfondir notre connaissance du domaine étudié. L'utilisation d'outils en laboratoire qui pourront nous servir par la suite et l'investissement dans un projet de ce type permet un gain certain d'expérience, ce qui est aussi très apprécié dans un CV. Nous sommes entourés par des chercheurs et des doctorants ce qui permet d'avoir des discussions très enrichissantes à propos de la recherche et des domaines qu'ils étudient. Cela nous apprend aussi le travail du « chercheur » et nous aide à nous décider quant à la poursuite de nos études. »

b. Témoignage de Paul BOURGOIN (Projet composite):

« J'ai fortement apprécié ce projet d'initiation à la recherche. Il m'a permis de développer mes acquis théoriques sur un domaine technique et concret. De plus ce fut un travail d'équipe enrichissant de par la découverte du travail d'un chercheur, de la réalisation d'une bibliographie et du rendu d'un projet de recherche.

Ce fut l'occasion à la fois de mettre en pratique nos connaissances personnelles ainsi que les notions apprises à l'école, tout en réalisant un travail se rapprochant du métier de chercheur. Notamment, l'exercice de la bibliographie, la recherche et la prospection d'un domaine à travers les écrits de la communauté scientifique fut une découverte nouvelle et très motivante. Nous avons rapidement pu cerner le projet et ses difficultés tout en apercevant certaines perspectives de développement.

Pour conclure, je dirais que cela m'a permis d'avoir une vision de ce que peut-être la vie de chercheur, lors d'un projet concret, à la fois en utilisant des connaissances techniques mais aussi en rencontrant des personnes passionnées et impliquées dans leur métier. »

c. Témoignage de Pierre-Olivier Pacilly et Benoit Gandon (projet MQ)

« Avant de participer aux projets PIRATE nous n'avions pas d'idées précises sur le monde de la recherche sinon un a priori assez courant qui consiste à détacher totalement la recherche du besoin du développement industriel. Le parcours de chercheur nous semblait réservé à des universitaires et ne correspondait donc pas au parcours d'un élève-ingénieur. Et pourtant, lorsque les sujets des projets PIRATE nous ont été présentés, nous nous sommes rendu compte de leurs portées industrielles et, en y participant, nous n'avons pu que constater l'existence de nombreux liens entre le CERIE et l'industrie. De plus il nous a semblé bénéfique de participer à un projet qui s'inscrit dans la durée (plus de deux ans) et donc qui permet d'explorer une problématique en profondeur. Contrairement aux autres projets, les projets PIRATE comportent une partie expérimentale qui permet d'avoir des résultats concrets. Pour moi (Pierre-Olivier), qui souhaite travailler en contrôle moteur, le projet PIRATE m'a permis d'apprendre à utiliser des moyens de prototypage rapide (dSPACE) qui sont également utilisés par les industriels mais aussi de travailler sur un sujet qui les concerne. Pour moi (Benoît), le projet a été avant tout un moyen de découvrir la manière de travailler des enseignants-chercheurs c'est-à-dire : établir un raisonnement et une

démarche pour solutionner notre problème de commande. Cette manière de travailler a quelque chose de très gratifiant puisqu'elle nous permet sans cesse d'apprendre par nous-mêmes et de manière concrète. »

d. *Témoignage d'Hamza ESSAYEGH (Projet Système embarqué)*

«Ce projet PIRATE a été pour moi une réelle découverte car je me suis "aventuré" sur un terrain complètement inconnu qu'est l'ordonnancement. En effet, ne suivant pas de tels cours à l'ESTACA, j'ai dû m'informer du mieux que je pouvais avec pour seules sources M. Chaaban et de la littérature sur Internet.

C'est sur ce point, à mon sens, que le projet a son intérêt en troisième année : **apprendre à chercher**. Car tout le monde sait utiliser la barre de recherche Google, mais rares sont ceux qui maîtrisent cet outil puissant. J'ai pu apprendre à bien orienter mes recherches, à savoir quels mots clés utiliser etc...

En bref, que du bon ! C'est avec un grand enthousiasme que je continue cette année ce projet ! »

4. Conclusion

L'expérience des projets PIRATE à l'ESTACA aura été bonne. Les retours des étudiants sont plutôt favorables, d'autant que certains ont inscrit la thèse de doctorat comme objectif dans leur plan de carrière. C'est pourquoi cette année les projets continuent en 4^{ème} année et de nouveaux projets ont été proposés en 3^{ème} année. Ces nouveaux sujets balayaient une nouvelle fois un spectre large pour laisser le choix aux étudiants de se positionner sur un champ de compétences qui les intéresse d'approfondir. Les nouveaux sujets vont de la métrique des systèmes embarqués au collage des matériaux composites ainsi que l'amortissement des vibrations dans ces derniers en passant par de la robotique et les matériaux auto-cicatrisants.

Contribution à la pédagogie par projet : retour d'expérience en conception de systèmes mécatroniques à l'ENS Rennes

Damien GRENIER, Olivier KERBRAT, Florent LE BOURHIS, Charles PONTONNIER.

Ecole normale supérieure de Rennes, Département de Mécatronique, Campus de Ker Lann, 35170 Bruz

Contact : damien.grenier@ens-rennes.fr

La formation en mécatronique de l'École normale supérieure (ENS) de Rennes est une formation pluridisciplinaire qui trouve sa cohérence à travers des enseignements par projets. Pour que de tels projets soient une réussite, notre expérience montre qu'ils doivent remplir un certain nombre de conditions, à savoir : proposer un défi mobilisateur, faire en sorte que ce défi soit effectivement relevé et que le travail effectué soit valorisé aux yeux des étudiants. L'encadrement du projet doit par ailleurs être subtilement dosé entre planification imposée par l'équipe enseignante et autonomie laissée aux étudiants pour mener « seuls » ce projet qui doit rester d'abord le leur. Des outils ont ainsi été mis en place pour suivre le travail des étudiants au plus près sans leur donner pour autant l'impression d'être trop intrusifs. Cet article vise à proposer le retour d'expériences des encadrants du projet de conception de systèmes mécatroniques effectué en première année à l'ENS Rennes.

1. Contexte : la formation en mécatronique à l'ENS Rennes

La formation en mécatronique dispensée à l'École normale supérieure (ENS) de Rennes repose sur un parcours à double diplôme. Recrutés à la sortie des classes préparatoires aux grandes écoles ou équivalent, les étudiants du magistère de mécatronique préparent, en première année, simultanément une licence (L3) en électronique et une licence en mécanique de l'université de Rennes 1. En deuxième année, ils préparent, de même, simultanément une première année de master (M1) d'électronique et un M1 de mécanique de cette même université.

D'un point de vue pratique, les étudiants suivent des modules de la licence 3 ou du master 1 de l'université de Rennes 1 d'électronique pour un volume d'environ 30 ECTS, des modules de la formation de Rennes 1 en mécanique pour également 30 ECTS et des modules de substitution organisés par l'ENS Rennes pour également 30 ECTS.

Ces modules de substitution qui comptent pour les deux diplômes, permettent ainsi de valider 2 fois 60 ECTS c'est à dire deux licences ou deux masters 1, pour une charge de travail des étudiants de « seulement » 90 ECTS environ [1].

Parmi ces modules de substitution, on retrouve des cours de formation non strictement disciplinaires (mathématiques pour l'ingénieur, anglais, ...) dont la duplication dans chacun des parcours en électronique et en mécanique n'aurait pas de sens. On retrouve aussi et surtout des modules qui donnent toute sa cohérence à cette formation bi-disciplinaire et parmi lesquels des projets.

Les étudiants sont confrontés à un projet par semestre en licence 3 et un projet annuel pour le master 1.

L'objectif du projet du premier semestre de la licence est d'analyser un système mécatronique en étudiant un système industriel. Ils voient ainsi comment une fonction donnée est réalisée soit par des moyens électroniques, soit par des moyens mécaniques, soit les deux. À travers cette étude, ils essayent évidemment de comprendre pourquoi tel ou tel choix a été fait par les concepteurs du système.

Le projet de second semestre de licence vise à la conception et la réalisation d'une ou plusieurs fonctions au sein d'un système. Le projet de master 1 reprendra peu ou prou la même démarche mais sur un système plus ambitieux (et donc plus complexe), impliquant généralement l'ensemble de la promotion, là où le projet de licence fait travailler les étudiants par groupe de 3 à 4.

C'est l'organisation de ces projets de conception et de réalisation de systèmes mécatronique et plus particulièrement celle du projet de licence 3, plus concentré dans le temps et donc plus structuré qui sera détaillée dans ce qui suit.

2. Les projets dans le dispositif pédagogique

Dans nos disciplines de sciences de l'ingénieur, les projets prennent logiquement une place de plus en plus importante. C'est notamment le cas dès le début des cycles de formation au niveau du bac. Ainsi, la formation en STI2D consacre une part importante de l'apprentissage à des projets où les étudiants acquièrent des compétences méthodologiques en conception : établissement d'un cahier des charges, proposition de solutions, évaluations de celles-ci et développement d'un prototype [2]. C'est exactement ce type de compétences (qu'il serait utile que de futurs agrégés maîtrisent !) que nous avons voulu faire acquérir à nos étudiants à travers les projets de la formation en mécatronique.

On peut avoir un débat intéressant pour savoir si, quand on met en œuvre un projet, on doit faire une pédagogie « du projet » ou une pédagogie « par projet ».

En d'autres mots, de savoir si le projet doit être l'occasion pour les étudiants d'appliquer des connaissances et compétences acquises dans les cours précédents et de constater la cohérence et la complémentarité des différents cours de leur parcours.

Ou au contraire, si le projet doit être l'occasion de développer une pédagogie active où l'étudiant, confronté aux questions que soulève le projet, va à la recherche de connaissances et de compétences nouvelles (devenant ainsi acteur de sa propre formation). Compétences que l'enseignant éventuellement restructurera a posteriori.

Ce qu'on pourrait caricaturer par la question « faut-il donner le cours avant le projet ou le projet avant le cours ? ».

En fait tous ceux qui ont été confrontés à cette question savent qu'elle ne se pose pas vraiment en ces termes.

D'abord parce que la question des connaissances et des compétences susceptibles d'être acquises avant le projet ou découvertes pendant, aura autant de réponses que d'étudiants. Nous « héritons » d'étudiants qui ont des parcours antérieurs différents. Les compétences à mettre en application pour les uns sont des compétences à découvrir pour d'autres. Et vice-versa.

Ensuite parce la question d'une pédagogie « du projet » ou « par projet » (au sens où nous venons de le définir) fait rarement l'objet d'une réflexion stratégique a priori. Elle s'impose souvent pour des raisons pratiques d'emplois du temps, de coordination des enseignements avec d'autres parcours, d'autres formations. C'est particulièrement vrai à l'ENS Rennes où nous mutualisons les 2/3 de notre enseignement avec l'université de Rennes 1 !

Et que, surtout, on s'aperçoit souvent que le fait d'avoir acquis certaines connaissances scientifiques et techniques avant ou pendant le projet ne modifie pas significativement l'efficacité du processus d'apprentissage. Ce qui est beaucoup plus déterminant, c'est d'avoir un projet motivant dans lequel les étudiants vont s'investir et y consacrer du temps. Ce qui finira toujours par payer en termes de compétences acquises.

Pour avoir un projet motivant, il faut, selon notre expérience, réunir trois conditions :

- **Proposer un défi mobilisateur.**

Un *défi* parce que la tâche proposée ne doit pas paraître trop simple aux yeux des étudiants. Ils doivent même être convaincus en début d'année de n'avoir pas encore le niveau pour relever le défi proposé. Ainsi en fin d'année, le fait d'avoir pu le mener à terme sera une mesure des progrès accomplis tout au long de l'année.

Mobilisateur, parce que intéressant aux yeux des étudiants. De tous les étudiants. Ce qui suppose souvent de couvrir un large spectre des matières du programme de formation. C'est pour cela qu'un projet attaché à un cours est souvent moins motivant

qu'un projet qui fait la synthèse de plusieurs matières.

Une autre façon de mobiliser les étudiants est de les mettre en compétition.

Soit avec d'autres établissements au travers de concours type E=m6 [3], e-Kart [4], Educ-Eco [5]...

Ce que nous avons fait dans le cadre des projets de Master 1. Mais où, en contrepartie, on perd la maîtrise du sujet.

Soit en organisant une « compétition » interne où la promotion est divisée en plusieurs groupes qui tentent de relever le même défi. Qui est le choix que nous avons fait pour le projet de L3.

- **S'assurer que le défi soit relevé.**

D'un point de vue pédagogique, le fait que les étudiants aient ou non relevé le défi est sans trop d'importance. On apprend souvent tout autant (si ce n'est plus!) de ses échecs que de ses réussites. Et c'est plus le chemin, la démarche qui compte que le résultat technique.

Mais si on veut avoir l'effet « mesure des progrès accomplis » évoqué plus haut et garder intacte la motivation des étudiants face aux défis ambitieux qui leur sont proposés, il est important que le projet « réussisse ».

Cela est en outre indispensable pour qu'existe un lien de confiance entre étudiants et équipe enseignante. Quand on leur dit en début de l'année : « nous allons réaliser ceci, qui vous paraît impossible à réaliser aujourd'hui mais que, grâce aux connaissances que vous allez acquérir tout au long de l'année, vous allez tout de même réussir à réaliser », les étudiants sont tous disposés à croire l'équipe. Pour autant que l'expérience des années précédentes ne démontre pas le contraire.

Relever le défi est donc surtout important pour les étudiants des années à venir.

- **Valoriser le travail réalisé**

Il est également fondamental de penser, dès le début du projet, à intégrer la valorisation finale du travail qui sera réalisé. En effet, il est très motivant pour les étudiants de voir que le projet n'est pas uniquement dédié à leur apprentissage, mais que le travail réalisé va être « utile ». En servant éventuellement de support pour des actions de communications de l'Ecole ou du département, en étant utilisé par la suite comme support d'activités de formation...

Nous demandons à nos étudiants de penser tout au long de leur projet à la création d'outils de communications en lien avec le système réalisé. Cela se traduit par exemple par la réalisation d'un teaser, film d'une minute annonçant la soutenance publique à venir avec démonstration sur le prototype en cours de finalisation. Chaque groupe a réalisé son film, l'ensemble a été diffusé via le service communication de l'ENS. Des posters ont également été réalisés par les étudiants (un par groupe, format A1) qui ont été affichés dans les couloirs. Ils contribuent à laisser une trace des activités des étudiants au profit des années suivantes, de ceux des autres formations, et plus généralement

de tous les visiteurs potentiels du département...

Le caractère public de la présentation finale est également quelque chose d'important pour la motivation des étudiants. Face à la direction de l'école, face à l'ensemble des professeurs du département, face aux élèves des autres années, face à ceux des autres départements de l'école, il est essentiel que la démonstration fonctionne et si possible impressionne. Ce n'est pas seulement leur note à une UE donnée qu'ils défendent. Ce sont les couleurs de leur promotion, celles du département, celles de l'Ecole !

Pour la réussite du projet, la composition de l'équipe pédagogique n'est pas anodine. Il est en effet essentiel de chercher à maximiser les champs de compétences balayés par les différents enseignants, ce qui permettra aux élèves d'avoir une approche robuste de conception orientée « systèmes », tenant compte de l'ensemble des problématiques. Dans le cadre d'une formation mécatronique, il est par exemple extrêmement judicieux de réunir une équipe de mécaniciens, d'électriciens / électroniciens, d'automaticiens ainsi que des spécialistes de la fabrication / production.

Par ailleurs il est très important d'impliquer dans le projet les responsables des plateformes techniques, qui seront régulièrement sollicités par les élèves que ce soit d'un point de vue électrique (réalisation de circuit imprimé) que d'un point de vue mécanique (usinage, fabrication). Il est donc nécessaire que ces derniers soient tenus au courant des avancées des élèves ainsi que de leurs éventuelles implications dans le projet, afin qu'ils puissent pleinement faire profiter les élèves de leur expertise et qu'ils puissent réaliser dans les temps impartis les tâches leur incombant.

3. Organisation du projet

Réussir un projet suppose un encadrement très strict en ce qui concerne son organisation et sa planification. Tout « l'art » consiste à encadrer le projet mais sans le diriger, sans prendre le rôle de chef de projet et de coordinateur qui doit revenir aux étudiants. Du moins si on souhaite à travers le projet leur transmettre aussi des compétences en « gestion de projet ».

Comme les étudiants sont le plus souvent incapables de gérer leur temps sur la durée (ils ont une nette tendance à la procrastination), cela passe, par exemple, par une

planification des tâches avec des échéances régulières.

Pour le projet du second semestre de L3 / première année du magistère de mécatronique de l'ENS Rennes, qui s'étale sur 14 semaines, nous avons placé 3 échéances majeures (Figure 1) :

- au bout de 3 semaines : rédaction du cahier des charges et présentation d'un avant-projet
- au bout de 12 semaines : présentation du premier prototype
- au bout de 14 semaines : présentation publique du prototype final

Chacune de ces étapes se conclut par la remise d'un rapport, une présentation de 15mn + 15mn de question par groupes. Ces présentations sont nécessaires pour la formation des étudiants car elles permettent de formaliser leur idées qu'ils seront amenés à défendre. Cela permet en outre de donner une certaine importance à leur projet que l'on ne retrouve pas forcément avec l'écriture d'un rapport.

De plus à la fin de chaque séance, il est demandé à un étudiant à tour de rôle de rédiger un rapport de quelques lignes sur l'état d'avancement de leur travail.

Ce rapport sert de nouveau sujet pour le « forum en ligne » sur la plateforme moodle de l'Ecole. Cela permet aux étudiants de venir le corriger ou compléter le compte-rendu, aux enseignants de faire des commentaires ou de poser des questions au groupe.

Il est ainsi possible de garder une trace de tout le travail réalisé semaine après semaine, y compris des pistes abandonnées.

Cela facilite grandement le travail d'encadrement. L'équipe enseignante comprend en effet 3 personnes dont seulement 2 sont présentes par roulement à chaque séance. La 3ème peut être ainsi informée de tout ce qui s'est dit et vu pendant la séance où elle n'était pas là. Et réagir en conséquence.

4. Cahier des charges et avant-projet

Cette première phase du projet est très structurée et encadrée. L'objectif est de lancer le projet, de le mettre sur les (bons) rails pour pouvoir après laisser plus de liberté d'organisation aux étudiants.

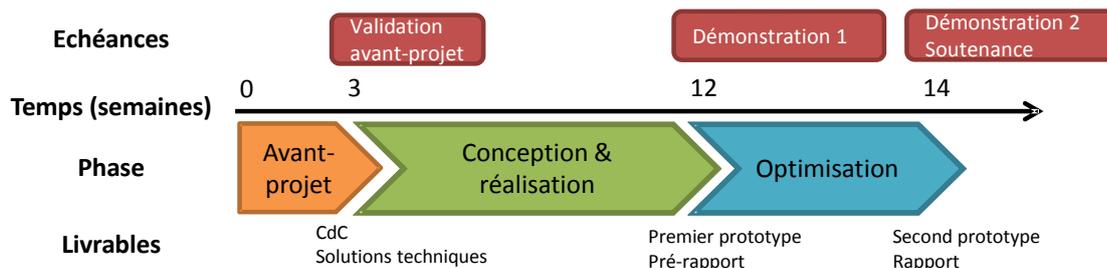


Figure 1 : planification du projet

Le sujet est proposé aux étudiants de façon assez concise. On se limite généralement à une description sur une page A4. Ainsi en 2012, on avait demandé aux étudiants de « concevoir une pince robotique capable de saisir et transporter une canette de soda ou une briquette carton de jus de fruit, même ouverte, sans la renverser, ni l'écraser ». En 2013, on leur demandait de « concevoir et réaliser une flûte mécatronique pour lui faire jouer automatiquement des airs de musiques programmés » accompagné de la partition de deux exemples de morceaux à jouer. En 2014, le même thème a été traité mais avec un ukulélé au lieu d'une flûte.

À partir d'une simple description de ce type, les étudiants doivent rédiger un cahier des charges détaillant toutes les fonctions que le dispositif devra remplir, les performances attendues et les contraintes qu'il faudra prendre en compte.

Ainsi, jouer de la flûte se traduit notamment en jouer « juste » : la fréquence des notes produites doit être *reproductible*. L'instrument peut nécessiter d'être *accordé*, ce qui signifiera qu'un dispositif de réglage doit être intégré au système.

Cela se traduit aussi par jouer en *rythme*, ce qui suppose que l'on puisse enchaîner les notes à une certaine vitesse. Les étudiants se sont aussi rendus compte à la lecture des partitions des deux exemples, qu'il fallait aussi être capable de jouer deux fois de suite la même note. Ce qui suppose de pouvoir *arrêter de souffler* dans la flûte puis de reprendre, soit une fonction de plus à inscrire dans le cahier des charges.

Dans le cas d'un ukulélé, la partition peut contenir des accords nécessitant de jouer plusieurs notes en même temps.

On leur demande ensuite pour chaque fonction à réaliser, d'effectuer un « brainstorming » pour proposer diverses solutions. Ils choisissent ensuite des critères pour évaluer ces différentes solutions et les comparer. Ils peuvent par exemple utiliser la méthode AHP (Analytic Hierachy Process) pour classer ces solutions entre elles et justifier leur choix [6].

Cette phase du projet est assez critique et souvent difficilement comprise par les étudiants, qui mettent en œuvre les outils d'évaluation proposée pour seulement « habiller » un choix fait de façon parfois totalement arbitraire. Ainsi par exemple, pour le projet de l'année 2012 où l'on demandait aux étudiants de concevoir un pince pour saisir des canettes ou des briquettes carton de boissons, un groupe d'étudiants avait vu sur internet des images d'une pince utilisant un ballon rempli de café moulu qui permettait, par dépression, de saisir toute sorte d'objet [7]. Ils se sont mis en tête de réaliser un tel objet même si cela ne correspondait pas vraiment au cahier des charges initial. Notamment du fait du poids de la pince qui (et cela était bien précisé dans le sujet), ne devait pas dépasser un certain seuil. Leur envie de mettre en œuvre cette solution extrêmement originale leur a fait, dans leur analyse des solutions, totalement minimiser cette contrainte. De telle sorte qu'au final cette solution a pu émerger comme étant la meilleure, même si objectivement ce n'était pas le cas. L'équipe

enseignante, soucieuse de garder intacte la (grande) motivation du groupe n'a pas voulu s'opposer à ce choix pourtant peu rigoureux... Au détriment, et nous en sommes conscients des objectifs pédagogiques de gestion rigoureuse de projet.

5. Validation du projet

À l'issue de cette première phase, doit émerger un avant-projet qui est présenté pour validation à l'équipe enseignante.

C'est, du point de vue des enseignants, le moment le plus critique du projet.

Il s'agit en effet, à partir d'une idée de solution rapidement esquissée, d'estimer si un projet pourra être ou non être réalisé par un groupe d'étudiant donné, dans les délais impartis et avec les moyens matériels dont on dispose.

Or beaucoup d'inconnues rentrent en jeu :

- Entre le « brainstorming » qui a fait émerger l'idée et sa présentation sous la forme d'un avant-projet, il ne s'est écoulé en général qu'une ou deux séances. Pas assez pour mener des études poussées de faisabilité. Juste assez pour éventuellement avoir mené un ou deux calculs de dimensionnement. L'équipe enseignante ne dispose pas de beaucoup d'informations pour valider les choix faits par les étudiants.
On retrouve donc ainsi le paradoxe classique de la gestion de projet : c'est en phase de conception préliminaire que l'on a le plus de moyens d'actions sur le projet ; mais c'est aussi à ce moment, que l'on a le moins de connaissances sur le produit final. D'où la difficulté pour faire des choix pertinents alors même qu'une fois ces choix sont faits, ils impacteront énormément le produit final.
- Même si cela en fait encore peu d'heures que les étudiants travaillent sur le projet, ils ont toutefois déjà commencé à se l'approprier. Ils ne seront donc pas toujours réceptifs à une remise en cause de leur travail et de leurs choix, surtout si cette remise en question n'est pas solidement étayée par des arguments scientifiques et techniques.
- À ce moment du projet, on attend des enseignants qu'ils se comportent comme des conseillers « seniors » qui mettent leur expérience au service des étudiants pour les conseiller, les aider, leur éviter de s'engager dans des voies trop risquées qui pourraient les conduire à l'échec. Mais d'un autre côté, ni eux ni surtout les étudiants ne peuvent oublier que, in fine, ce sont eux qui les évalueront, les jugeront. Voire ont déjà commencé à juger le travail accompli. Et qu'il appartient donc aux étudiants de le défendre « coûte que coûte ».

Le dialogue avec les étudiants n'est donc pas toujours aisé ni dénué d'arrière-pensées. Les étudiants se montrent parfois peu réceptifs aux arguments de l'équipe enseignante par ailleurs peu étayés.

On pourrait penser qu'en plaçant cette séance de validation des avant-projets plus tard, les étudiants

auraient la possibilité de pousser davantage les études de faisabilité nécessaires (et « subtilement » suggérées par l'équipe enseignante). Et ainsi se rendre compte « par eux-mêmes » des éventuelles impasses vers lesquelles ils se dirigent.

Mais l'expérience montre qu'ils s'attacheraient encore davantage à « leur » solution, cherchant tous les moyens pour contourner les obstacles qui se dressent devant eux plutôt que d'accepter de remettre en cause leurs choix initiaux.

Ou au contraire, pour d'autres groupes, à force de doutes, de discussions au sein du groupe et de remise en cause des débuts de solutions trouvées, avoir l'impression de n'avancer dans aucune direction particulière, être découragés et perdre toute motivation.

Une prise de décision relativement rapide sur la solution à réaliser est donc plutôt salutaire pour la suite du projet. Car passé cette séance, les objectifs du projet changent. Le défi n'est plus de réaliser un système répondant à un cahier des charges donné mais de réaliser un dispositif conforme à l'avant-projet proposé et accepté par l'équipe enseignante.

Celle-ci ayant validé cet avant-projet, les étudiants ne sont plus seuls responsables des décisions prises pendant son élaboration. Pour être plus exact, les étudiants vont dorénavant estimer l'équipe enseignante responsable de ne pas avoir su voir à temps les problèmes posés par les mauvais choix effectués. Mais par contre s'attribuer le mérite des choix pertinents, intelligents, astucieux réalisés. Même si certains d'entre eux ont pu à l'origine être suggérés par l'équipe enseignante...

6. Conception détaillée et réalisation

Cette phase du travail, la plus longue (9 semaines sur les 14 que compte le projet), est aussi celle où les étudiants sont les plus « livrés à eux-mêmes ».

L'équipe enseignante est certes là pour les aider, leur apporter des compétences qui pourraient leur manquer, ou leur donner des indications pour aller chercher les informations nécessaires.

Théoriquement, il appartiendrait aux élèves de solliciter cette aide auprès des enseignants en fonction de la spécialité de ceux-ci. Mais il arrive bien souvent que les enseignants interviennent d'eux-mêmes.

La mise au point des prototypes est souvent une tâche complexe et les élèves peuvent manquer de discernement devant l'échec de leur réalisation. Un œil neuf et détaché permet notamment de mettre le doigt sur les points de blocage et d'apporter un éventail de solutions scientifiques et techniques salvatrices.

Il revient également normalement aux étudiants de gérer leur temps, la répartition du travail au sein du groupe, d'anticiper sur les délais de commande des pièces ou de leur fabrication quand celle-ci est confiée à l'atelier. Dans ce dernier cas, c'est à eux d'aller voir les techniciens, pour discuter des plans, éventuellement les adapter pour en faciliter la fabrication. Mais là aussi, il

arrive assez souvent que les enseignants interviennent pour attirer l'attention des étudiants sur les problèmes à venir qu'ils n'anticipent pas toujours suffisamment. Le département de mécatronique disposant de divers moyen de fabrication que ce soit par usinage ou par ajout de matière (dépôt de fil plastique fondu), il convient en effet que les étudiants fassent aussi les choix du procédé le plus adapté à chacune de leur pièce, et conçoivent leurs pièces pour tenir compte des spécificités (opportunités et contraintes) du procédés choisi.

C'est à travers la procédure de suivi de projet (cf. section 3) que les enseignants gardent un œil attentif sur toutes ces questions, sans donner l'impression d'être trop intrusif auprès des groupes étudiants.

Cette phase de 9 semaines est augmentée d'une phase d'amélioration du prototype de 2 semaines supplémentaires. En théorie, à l'issue des 9 premières semaines, le travail réalisé est présenté, analysé, les performances du prototype réalisé sont évaluées. Des améliorations (souvent notables) sont suggérées aux étudiants, à charge pour eux de les réaliser dans les 2 semaines restantes.

L'expérience montre qu'il n'en est souvent rien. Le prototype n'est pas prêt, les étudiants se sont montrés incapables de respecter l'échéance. Néanmoins, la mise en place de tel jalon est essentielle pour que les étudiants ne se laissent encore davantage aller. Les 2 semaines de répit serviront donc souvent seulement à obtenir enfin un premier prototype fonctionnel, nécessairement très imparfait mais répondant plus ou moins au cahier des charges.

Éventuellement le groupe d'étudiant et l'équipe enseignante peuvent revoir les contours et les exigences du système à réaliser. Pour des groupes particulièrement en retard, il est en effet possible de se mettre d'accord sur des objectifs revus à la baisse. Aussi, pour le projet de 2013 portant sur une flûte mécatronique, l'équipe enseignante a accepté pour un des projets la réalisation d'une flûte ne pouvant jouer que 4 notes, histoire de démontrer à tout le moins la faisabilité du concept retenu qui était par ailleurs très pertinent.

Pour les groupes en avance sur le planning (cela arrive toute de même parfois !), souvent plus parce qu'ils ont opté pour une solution au final plus facile à mettre en œuvre, on pourra au contraire revoir les objectifs à la hausse en ajoutant des options non-prévues initialement. Pour le projet 2012 dont l'objet était de réaliser une pince (Figure 2) les étudiants ont suggéré de profiter des semaines restantes pour ajouter un capteur permettant de détecter la présence ou non de l'objet à saisir.

Cette phase d'ajustement permet de réparer les erreurs d'appréciation éventuellement commises pendant la phase de validation (cf. section 5) et ainsi de finir, dans tous les cas où presque, avec un projet que les étudiants peuvent être fier de présenter publiquement.



Figure 2 : Projet 2012 : pince permettant de saisir des canettes de soda ou des briquettes en carton de jus de fruit, même ouvertes, sans les renverser, ni les écraser.

7. Exemple du projet 2013 : la flûte mécatronique

Dans cette section, on va s'intéresser plus en détail sur le projet de 2013. Le sujet tel qu'il a été donné aux étudiants lors de la première séance est le suivant :

« L'objectif est de concevoir une flûte mécatronique pour lui faire jouer automatiquement des airs de musiques programmés.

On pourra partir d'une flûte du commerce qu'il conviendra d'instrumenter et de piloter. Mais on pourra également choisir de n'utiliser qu'une partie de flûte existante, ou bien concevoir l'instrument complet.

Le système réalisé doit coupler des aspects mécaniques et électroniques.

Deux partitions sont proposées (« Smoke on the water » de Deep Purple et « Les filles de Redon » de Tri Yann). Le dispositif conçu doit être en mesure de jouer ces deux partitions, avec justesse et en rythme. Bien évidemment, il convient d'envisager dès le début du projet la possibilité de jouer d'autres airs. »

La Figure 3 présente une vision fournie par l'un des groupes d'étudiants à l'issue des trois premières séances. Il s'agit de l'avant-projet. A ce stade du projet, les choix conceptuels sont faits, mais la conception détaillée n'est pas encore réalisée.

Après validation par l'équipe enseignante de cet avant-projet, démarre le deuxième stade du projet (séance 4 à 11) qui concerne la conception détaillée et la réalisation. Les étudiants travaillent donc sur les différents aspects du produit :

- **Pneumatique**, avec la définition du circuit, le dimensionnement des composants, les commandes (avec le respect d'un budget initialement fixé) lorsque le choix des composants est validé par l'équipe enseignante (Figure 4) ;
- **Mécanique**, avec la modélisation 3D de l'ensemble du produit et en définissant les pièces à réaliser (Figure 5) ;

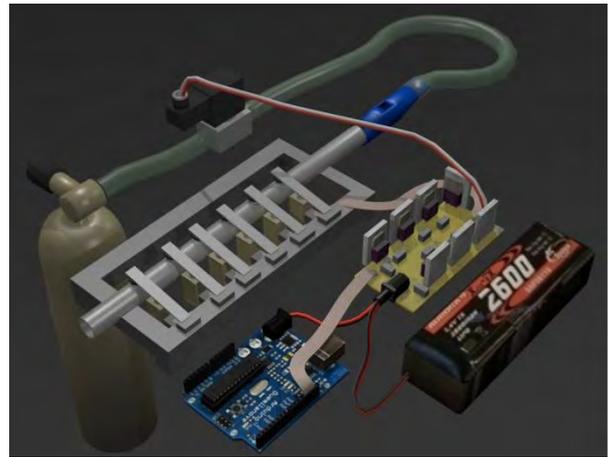


Figure 3: Concept de la flûte mécatronique

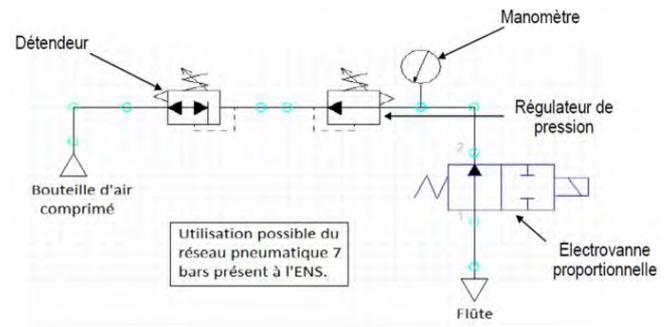


Figure 4 : Schéma pneumatique

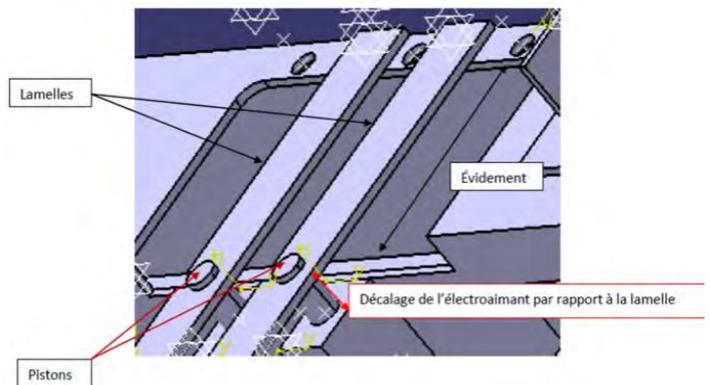


Figure 5 : Détails de la modélisation 3D du système complet

- **Commande et puissance**, avec l'utilisation d'un microcontrôleur Arduino (Figure 6) qu'il a fallu programmer (Figure 7), ainsi que la définition et réalisation des cartes de commande du circuit de puissance (Figure 8) pour alimenter les différents actionneurs (électroaimants).

Il est très important que l'ensemble de ces éléments soit conçu de manière collaborative et simultanée car chacune des parties impacte directement les autres. Là encore, il est primordial que l'équipe enseignante trouve sa place entre le soutien technique, l'autonomie laissée au groupe pour qu'il augmente collectivement ses connaissances et compétences disciplinaires et en gestion de projet, et le respect des délais.

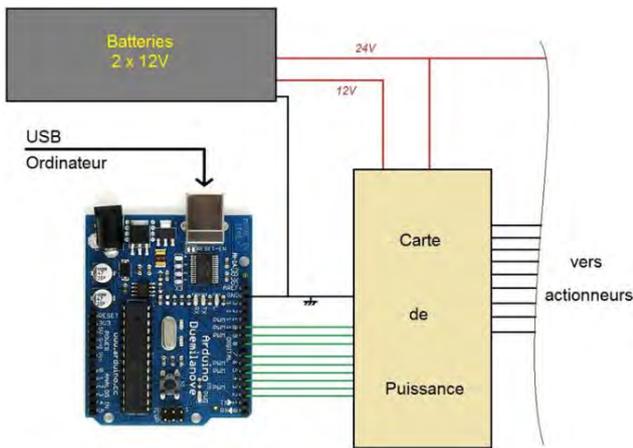


Figure 6 : Schéma global de la partie commande

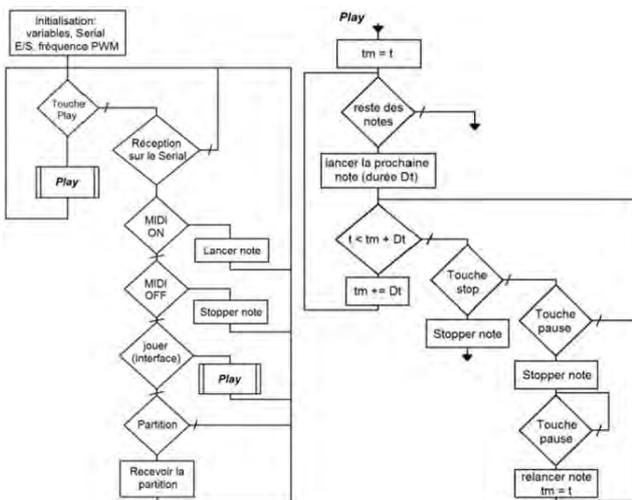


Figure 7 : Organigramme du programme Arduino

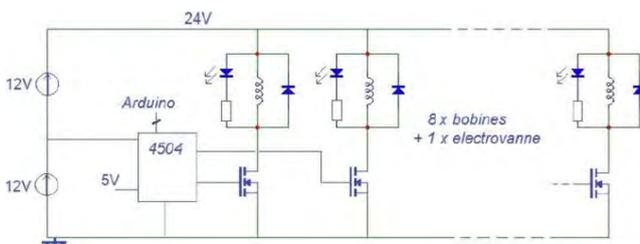


Figure 8 : Schéma de la carte électronique

La Figure 9 présente le produit final auquel le groupe est arrivé. On peut voir que les choix fait lors de l'avant-projet n'ont pas été remis en cause, que le système reste à l'état de prototype. Le système est opérationnel et sera prochainement utilisé pour des activités pédagogiques sur l'analyse de systèmes au sein du département mécatronique de l'ENS Rennes.

8. Conclusion

De l'expérience menée au sein de l'ENS de Rennes, on peut tirer un certain nombre d'enseignements quant aux points essentiels au bon déroulement d'un enseignant par projet. Cette expérience a été menée sur trois promotions d'étudiants et les conclusions à en tirer sont souvent les mêmes.

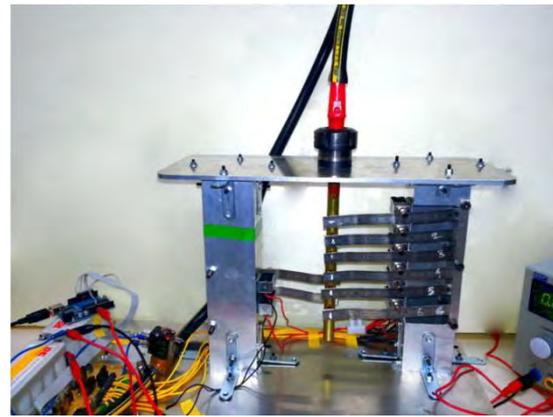


Figure 9 : Système final opérationnel

L'enseignement en projet doit se faire au travers d'un support qui intéressera et motivera les étudiants. Un des points clé est par ailleurs de trouver le bon compromis dans l'encadrement pour que les étudiants ne se sentent pas bridés dans leur créativité tout en pouvant compter sur des enseignants suffisamment impliqués dans le projet pour pouvoir les soutenir en cas de besoin. Voire anticiper les problèmes.

Une telle expérience est très enrichissante tant pour les étudiants que pour les enseignants.

Pour les étudiants c'est une occasion irremplaçable de se retrouver en situation de responsabilité face aux problèmes concrets que soulève la réalisation d'un système réel. Cela inclut notamment ceux de la planification des tâches en prenant en compte les délais de commande et de livraisons des composants nécessaires, ceux de fabrication des pièces conçues.

Pour les enseignants c'est une façon motivante mais risquée de transmettre le savoir. Risquée parce qu'il n'y a pas de corrigé type au problème qu'ils ont posé. S'ils ne trouvent pas rapidement les raisons pourquoi tel ou tel élément du système conçu par les étudiants ne fonctionne pas, c'est leur crédibilité qui peut être remise en cause. Risquée donc, mais également extrêmement motivante tant il est évident que cette manière d'enseigner apporte beaucoup plus aux étudiants que le classique triptyque cours-TD-TP.

9. Remerciements

Ces projets ne pouvant évidemment pas se faire sans l'implication et la motivation des étudiants, les auteurs tiennent à remercier :

- Olivier Arguence, Amaury Dalla Monta, Valentin De Montis, Melaine Desvaux, Sylvain Devie, Lucas Joseph, Sophie Lion, Benjamin Lollivier, Joseph Paux, Alexandre Perraud, Ambroise Petit, Vincent Quérard, Jérôme Quesne, Pierre Violet, Mazyar Yosofi ;
- Kévin Audoux, Olivier Bordron, Rémi Bourbon, Quentin Delamare, Hui Li, Antoine Martin, David Roszczypala, Simon Rouland ;
- Thomas Baroche, Ferreol Binot, Guillaume Cathelain, Robin Darleux, Matthieu Furet., Simon Hilt, Edwin Kerouanton, Simon Kirchofer, Matthieu Laisné et Marie Vandembempt.

Références

- [1] <http://www.mecatronique.ens-rennes.fr/version-francaise/formation/magistere-mecatronique/>
- [2] <http://eduscol.education.fr/cid56758/ressources-technologiques-sti2d.html>
- [3] C. Vloebergh, D. Grenier, P. Fisette, C. Eugène, J.-D. Legat, "Intégration d'une compétition de robotique au sein d'un cursus de formation en mécatronique" *J3eA 5 HORS SÉRIE 2*, (2006) DOI: 10.1051/j3ea:2006049
- [4] <http://www.e-kart.fr/>
- [5] <http://www.educeco.net/>
- [6] Saaty, T.L. (2008) 'Decision making with the analytic hierarchy process', *Int. J. Services Sciences*, Vol. 1, No. 1, pp.83–98.
- [7] <http://www.popsi.com/technology/article/2010-10/coffee-filled-balloon-makes-best-robotic-gripper>

Une expérience de pro et pluri-technologique en IUT : conception et fabrication d'une éolienne « urbaine »

STEPHANE RODDIER, ARNAUD BRUGIER,

respectivement enseignants de génie mécanique et de génie électrique,

roddier@iutsd.univ-paris13.fr brugier@iutsd.univ-paris13.fr

Département GIM de l'IUT de Saint-Denis, Université Paris 13-Nord

Place du 8 Mai 1945, 93206 Saint-Denis Cedex, <http://www.iutsd.univ-paris13.fr/iutsd/gim.html>

Résumé : cet article vise à présenter un aperçu des différentes activités menées principalement cette année relatives à un projet pluri-technologique conduit avec des étudiants au sein du département Génie Industriel et Maintenance de l'IUT de Saint-Denis. Celui-ci consiste en la conception et la fabrication de petites éoliennes « urbaines » destinées à participer au concours national GIM'Eole. C'est grâce à la mise en place d'organisations pédagogiques et matérielles souples et évolutives qu'il est possible d'y impliquer fortement les étudiants du département mais aussi des lycéens, des élèves ingénieurs ou des étudiants accueillis au département lors d'échanges universitaires internationaux.

1. Le concours national GIM'Eole

Le concours national GIM'Eole⁽¹⁾ est né de la volonté de l'assemblée des chefs de département Génie



Industriel et Maintenance⁽²⁾ de créer une manifestation permettant de valoriser, auprès des lycéens, du grand public et des acteurs économiques locaux, ses enseignements suivis par les étudiants tout en mettant en avant les spécificités de la formation (scientifique, pluri-technologique, orientée sur gestion et l'organisation de la production, de la maintenance et sur l'exploitation de installations et équipements, ...). Il porte sur le concept, la réalisation et la mise au point d'aéro-générateurs électriques dits « urbains ».

Le choix de l'éolienne urbaine comme support d'étude offre plusieurs avantages :

- produit d'actualité, accessible et très motivant pour les étudiants,
- multiplicité des matières scientifiques et technologiques pouvant être abordées: mécanique des fluides, résistance des matériaux, électrotechnique et électronique de puissance, électronique de commande et de régulation, conception et fabrication assistée par ordinateur, organisation de production, maintenance, ...
- solutions techniques nombreuses et innovantes possibles,
- solutions techniques adaptables aux moyens de production présents dans les plateaux techniques de chaque IUT,
- travail sur la mise en place et l'amélioration continue de l'organisation de la production de l'éolienne (génie industriel),
- analyse des retours d'expérience, diagnostic de défaillance et suivi de performance dans le

temps (maintenance et notions de fiabilité et de qualité).

1.1. Editions de GIM'Eole à Cherbourg⁽³⁾

La première édition a eu lieu à l'IUT de Cherbourg-Manche en 2008 avec une dizaine de départements représentés pour 13 éoliennes en lice au concours. En 2011, il y en avait une trentaine.

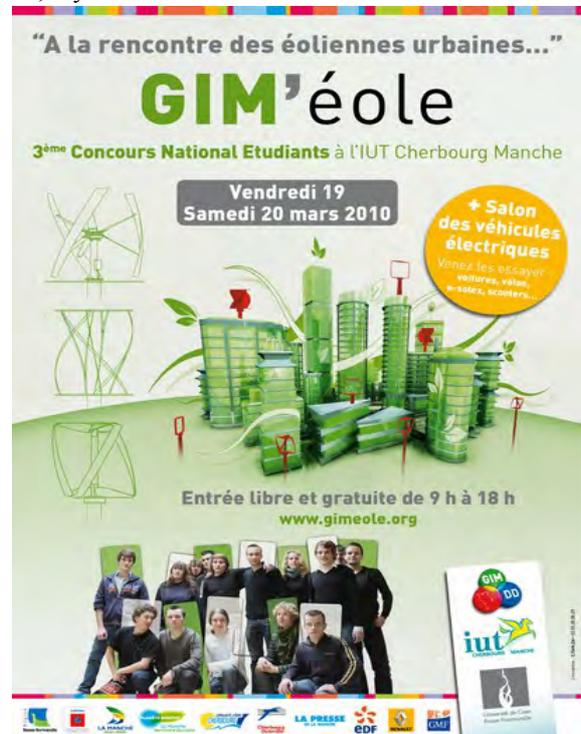


Figure 1 : affiche de l'édition GIM'Eole 2010

A noter que les éditions de GIM'Eole à Cherbourg ont été organisées depuis 2010 de manière concomitante avec un « salon des véhicules électriques » et/ou la « semaine de l'industrie ».

1.2. Editions de GIM'Eole à Villeurbanne⁽⁴⁾

Depuis 2013, le département GIM de l'IUT de l'université Lyon 1, accueille ce concours inter-départements sur le site de Villeurbanne Gratte-Ciel. La soufflerie, construite pour l'occasion, a vu passer en 2014 27 éoliennes conçues et réalisées sur la base d'un règlement modifié par rapport aux éditions passées.

Les éoliennes ont ainsi été placées à tour de rôle à 75cm de la sortie d'air d'une soufflerie produisant un vent horizontal sur une section carrée de 80 cm de coté et ont été soumises à un vent variable pouvant atteindre 80km/h en vitesse de pointe.

Afin de pouvoir simuler des conditions de vents perturbés (dits « urbains »), la soufflerie a été équipée d'un système d'orientation de l'éolienne par rapport à la veine de vent, de 0° à 60° selon l'axe vertical.

D'autre part, les éoliennes ont du débiter l'énergie produite dans une charge électrique équipée d'un dispositif de mesure de courant, de tension, de puissance et d'énergie. Lors des épreuves, chaque éolienne a été successivement soumise aux deux types de charges suivants (fig. 2 et 3) :

- **Charge en $I^{1/2}$** : charge se rapprochant de la caractéristique tension/courant idéalement bien adaptée aux éoliennes pour laquelle la tension est proportionnelle à la racine carrée du courant.

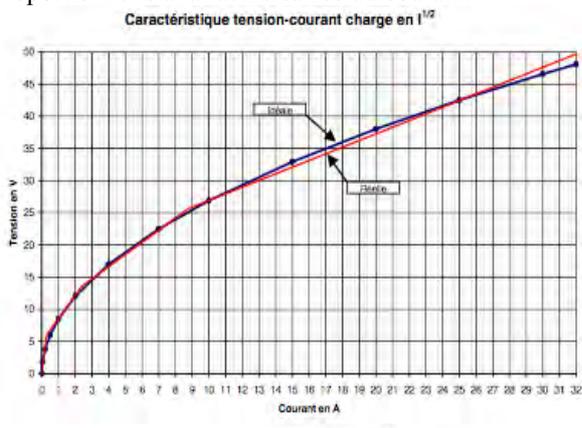


Figure 2 : charge en $I^{1/2}$

- **Charge 48V** : charge équivalente à une batterie 48V vue à travers un redresseur.

Charge 48V : $U=48V$ si $I>0$, $I=0$ si $-0.3V<U<48V$

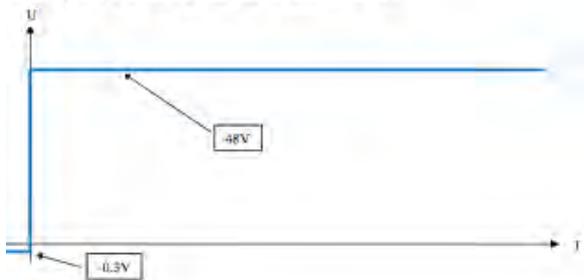


Figure 3: charge 48V

Pendant le déroulement du concours, toutes les éoliennes ont été soumises au même cycle de vent. Ce cycle comporte les trois phases suivantes :

Phase 1 (fig. 4) : orientation d'éolienne à 0° (orientation nominale), charge en $I^{1/2}$ et montée progressive du vent :

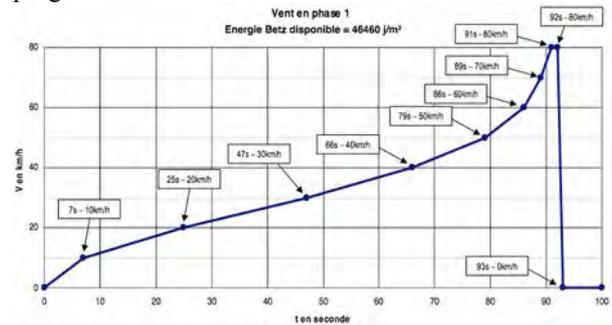


Figure 4 : phase 1

Mesures effectuées pendant la phase 1 : vitesse d'accrochage (vitesse du vent pour laquelle l'éolienne produit son premier Watt), puissance produite à 25s-20km/h, 66s-40km/h, 86s-60km/h, 92s-80km/h, puissance maximum atteinte et énergie totale produite lors de cette phase.

Phase 2 : idem phase 1 mais avec la charge 48V

Phase 3 (fig. 5) : charge en $I^{1/2}$, orientation d'éolienne oscillant entre 0° et 45°, vent en rafales de courtes durées :

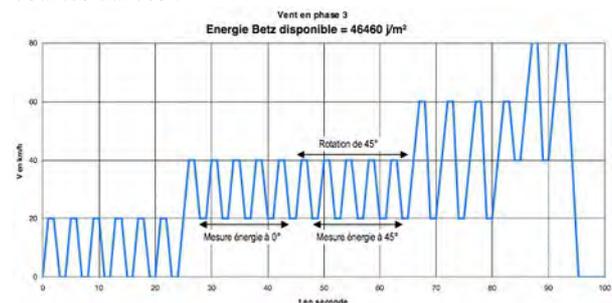


Figure 5 : phase 3

Mesures effectuées pendant la phase 3 : énergie produite sur 4 rafales successives à 40km/h pour l'orientation nominale à 0° puis pour l'orientation à 45° (cf doubles flèches sous la courbe ci-dessus), pic de puissance et énergie totale produite lors de cette phase.

Remarque : les profils de vent des phases 1, 2 et 3 possèdent une répartition des vitesses proche de celles observées dans la nature : répartition des vitesses proche de la distribution de Weibull obtenue avec le paramètre $k=2$ et un vent moyen de 35km/h.

A l'issue des deux manches et après délibération, le jury décerne les prix suivants :

- **prix de la performance énergétique globale**
- prix de la performance énergétique en phase 1
- prix de la performance énergétique en phases 2 et 3
- prix de la meilleure vitesse d'accrochage en phase 1
- prix de la meilleure vitesse d'accrochage en phase 2
- prix de la meilleure adaptation à la charge
- prix de la meilleure adaptation au vent en rafales
- prix de la meilleure adaptation aux changements de direction du vent
- prix du design industriel
- prix du dossier technique
- prix du développement durable

- prix de la génératrice innovante
- prix de l'intégration dans le paysage urbain
- prix de la présentation multimédia
- prix spéciaux du Jury

Pour les prix de performance énergétique, une différenciation est faite entre les éoliennes à axe horizontal et celles à axe vertical.

L'édition de *GIM'Eole 2014* s'est déroulée les 27, 28 et 29 mars 2014, en parallèle du concours « Robot Marcheur » des départements Génie Mécanique et Productive.

2. Les participations du département GIM de l'IUT de Saint-Denis

2.1. Conception et fabrication de l'« ondulienne »

Le département GIM de l'IUT de Saint-Denis a participé pour la première fois à *GIM'Eole* lors de l'édition 2011 (Cherbourg). Une équipe de six étudiants a imaginé, conçu et fabriqué une éolienne qui s'est vue attribuer le prix de l'innovation technologique.



Figure 6 : installation de l'« ondulienne » sur le support d'essai de la soufflerie de l'IUT de Cherbourg-Manche

L'« ondulienne » (fig. 6), inspirée du drapeau, récupère l'énergie cinétique du vent à l'aide de plusieurs voiles et la convertit en énergie électrique grâce à une génératrice linéaire (version initiale).

Cet aéro-générateur a concouru deux années de suite et a subi des modifications (lors des épreuves et entre les deux versions). Les étudiants ont du concevoir et réaliser les solutions techniques suivantes :

- châssis en profilés aluminium,
- voile(s) et fixations réglables associées,
- ensemble (palme-glisière-chariot + génératrice linéaire (fig. 7)) et redresseur puis ensemble (palme-glisières-chariot-crémaillère-pignon + génératrice tournante et redresseur),

- contrôle commande de la fourniture d'énergie électrique à la charge (motopompe à courant continu à Cherbourg).

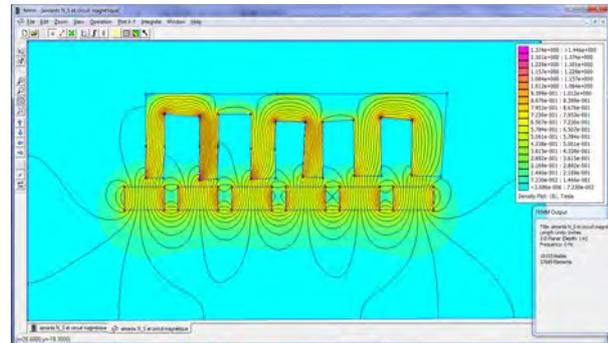


Figure 7 : utilisation de l'outil Femm⁽⁵⁾ pour établir la carte des flux dans la génératrice linéaire selon la position relative des aimants permanents et des bobines ($e=3\text{mm}$)

Lors de sa première participation, et au cours d'un essai désespéré faisant suite à plusieurs modifications in situ, l'« ondulienne » s'est mise à « battre » (sans pour autant réussir à produire) validant ainsi le principe de son fonctionnement imaginé par l'équipe. L'année suivante, l'« ondulienne » a produit suffisamment d'énergie pour alimenter la moto-pompe et permettre ainsi de récupérer quelques centilitres d'eau. Ces deux « victoires » ont été source de fierté chez les étudiants.

Cette solution technique, bien que satisfaisante sur le plan pédagogique (traduction d'un principe de départ en produit original et compatible avec le cahier des charges), a frustré plus d'un étudiant. En effet, la faible quantité d'énergie produite ne permettait pas à l'équipe de concourir dans les épreuves reines de performance énergétique. Il a été alors décidé de mettre de côté l'« ondulienne » et de développer une autre éolienne pour les éditions suivantes.

Notons tout de même ici que d'autres types d'éoliennes à voiles sont en cours d'expérimentation ou d'exploitation commerciale : *Voiléo*⁽⁶⁾, *KiteGen*⁽⁷⁾, ...

2.2. Conception et fabrication des « Dionysiennes »

Depuis l'édition de *GIM'Eole 2013*, l'équipe pédagogique a décidé de consacrer les activités de projet au développement d'éoliennes à axe vertical de type *Darrieus*. Cette solution reste assez peu utilisée, notamment à cause de la difficulté qu'il y a à démarrer et à monter en vitesse, mais certains départements l'expérimentent depuis quelques années dans le cadre de *GIM'Eole*. Nous avons nommé « Dionysienne » cet aéro-générateur en référence à la ville qui accueille notre IUT depuis plus de 40 ans.

L'aspect innovant porte ici non pas sur le principe de fonctionnement de l'éolienne (connu depuis les années vingt) mais sur la démarche d'ingénierie (conception et fabrication) mise en oeuvre, avec pour objectif de faire exploiter aux étudiants les moyens (outils logiciels, machines-outils traditionnelles et à commande numérique, outillages divers) présents à l'atelier (*GIM'Lab* et plateau technique de l'IUT) de manière à présenter un produit facilement

industrialisable en petite série. L'objectif visé, en complément d'un des prix de performances énergétiques, est celui du « design industriel » qui récompense le niveau d'aboutissement technologique en vue d'une industrialisation.

Neuf étudiant-e-s ont été sélectionnés pour la dernière édition du concours (28 et 29 mars 2014). Les autres étudiants se sont vu confier d'autres projets plus classiques au sein du département.

2.2.1. Impression d'un prototype

Un travail préparatoire a été mené en 2012 par les enseignants à l'aide d'une petite imprimante 3D à dépose de fil d'ABS. Celle-ci a permis la réalisation d'une première turbine, en forme d'oeuf, constituée de 3 pales de profil NACA018. Plusieurs essais ont été nécessaires pour finaliser cet objet monobloc et valider chaque étape : de la modélisation volumique d'une turbine sous *SolidWorks*(c) à l'impression dite (fig. 8).

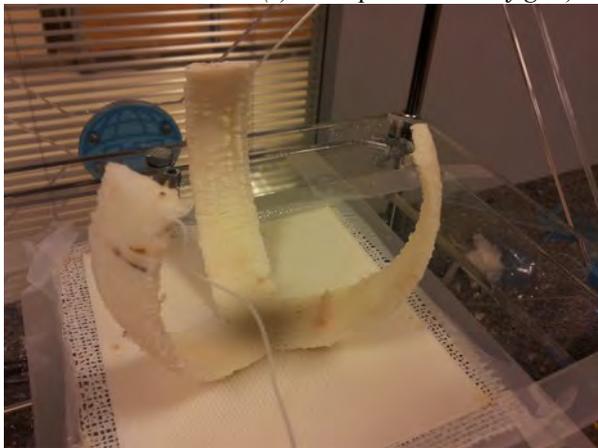


Figure 8 : essai avorté d'impression d'une turbine

La taille et la qualité structurale de ce premier petit prototype n'était évidemment pas de nature à nous permettre de participer à l'épreuve mais cela permettait de vérifier qu'une turbine de ce type soumise à un flux d'air était bien capable d'entraîner une petite machine électrique chargée. C'est la remise en service au *GIM'Lab* d'une machine à commande numérique 5 axes destinée à l'usinage de pièces en bois, plastique ou aluminium (fig. 9) qui a permis d'envisager la réalisation de turbines compatibles avec les spécifications du cahier des charges de *GIM'Eole*.



Figure 9 : MOCN 5 axes Thermwood®(c), modèle 70

2.2.2. Développement de prototypes de turbine à échelle réelle

Les étudiants effectuent la modélisation volumique d'une turbine avec l'outil de CAO « *SolidWorks* » (fig. 10) et ce, en respectant les contraintes d'encombrement et de masse fixées dans le cahier des charges (règlement du concours).

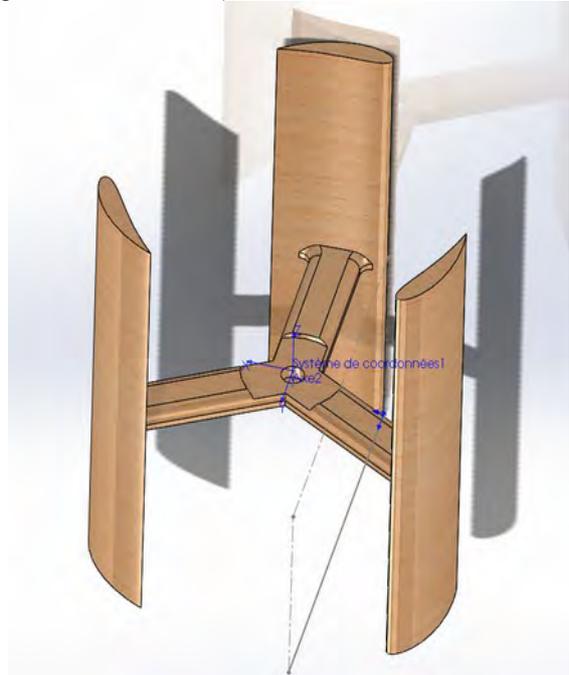


Figure 10 : modélisation volumique d'une turbine 3 pales sous *SolidWorks*®

La phase de fabrication d'un prototype du turbine commence par la mise en œuvre de l'outil « *Stratoconcept*®(9) » permettant d'exploiter au mieux le grand plateau de la MOCN 5 axes « *Thermwood*® ». L'idée consiste à fabriquer la turbine par usinage de tranches de celle-ci et ce, à partir d'un seul et même panneau de « bois » de type MDF (fig. 11 à 15) :

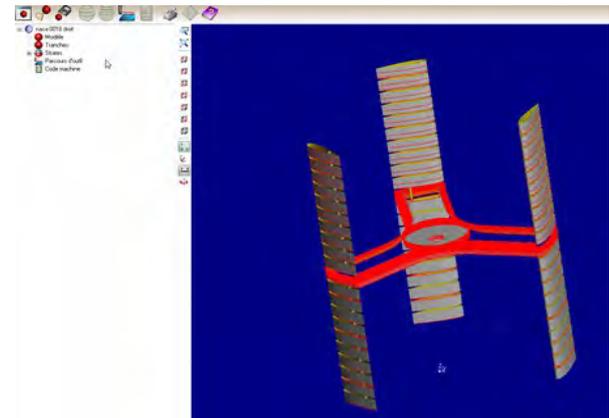


Figure 11 : tranchage du modèle CAO avec « *Stratoconcept*® » en considérant l'utilisation d'un panneau en MDF (medium density fiber) de 50mm d'épaisseur et de dimensions 1200mm x 1200mm

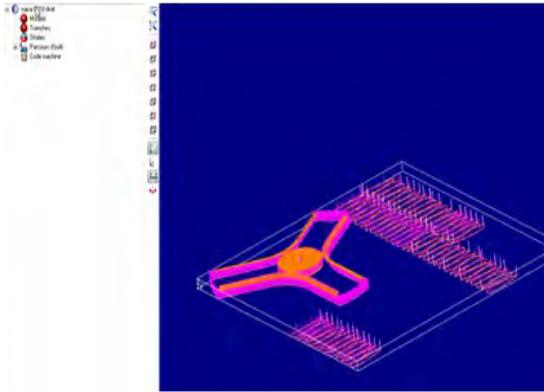


Figure 12 : toujours avec « Stratoconcept® », optimisation de la disposition des différentes tranches sur le panneau et création du code de commande numérique gérant le parcours de l'outil (utilisation d'une fraise 2 dents de diamètre 12mm)

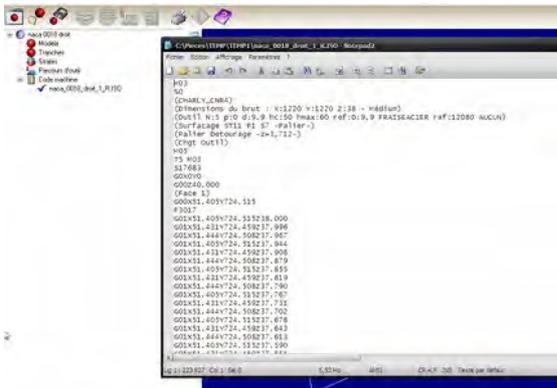


Figure 13 : génération du code CN avec “Stratoconcept®” et adaptation de ce code à la MOCN 5 axes “Thermwood®”

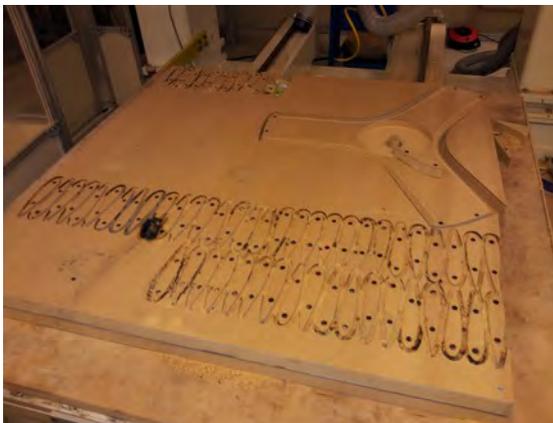


Figure 14 : usinage du panneau de MDF.



Figure 15 : récupération des bouts de pales, montage de la turbine, ponçage et finitions.

Dans le cadre, par exemple, d'une semaine de projet avec des étudiants de première année, l'obtention d'un prototype de turbine peut-être planifié comme suit :

- lundi : choix technologique et étude théorique,
- mardi : réalisation du modèle volumique et simulations,
- mercredi : création du programme de commande numérique,
- jeudi : usinage,
- vendredi : assemblage et tests en soufflerie.

Avec ce procédé de fabrication, une turbine peut donc être usinée en 4h et son montage, finitions comprises, effectué en 4h également (pendant l'usinage d'une autre turbine). L'industrialisation en petite série s'avère donc possible.

2.2.3. Essais d'identification en soufflerie

Le GIM'Lab est équipé d'une soufflerie ($P_{\text{utile}}=4\text{kW}$, $V_{\text{vent}}\approx 30\text{km/h}$) réalisée à partir d'un ventilateur axial de 1m de diamètre dont aucun conduit ne stabilise encore le flux d'air qui se trouve donc être très perturbé et tourbillonnant (fig. 16). L'armoire électrique d'alimentation du moto-ventilateur de la soufflerie est équipée d'une commande à distance et d'un variateur électronique de vitesse.

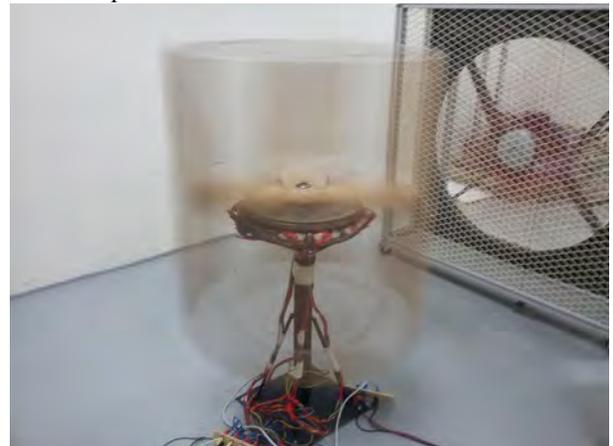


Figure 16 : une turbine 3 pales avec, au second plan, le ventilateur axial en fonctionnement.

Notons ici que l'on retrouve aussi au GIM'lab un banc d'essai de la génératrice avec entraînement à vitesse variable par une MCC permettant ainsi un travail plus serein sur la mise au point des convertisseurs d'électronique de puissance. On évite ainsi la mise en rotation de l'éolienne dans la soufflerie pour évaluer les différentes structures de hacheur.

Essais pouvant être conduits avec ces moyens :

- essai à vide : consiste à relever l'évolution de la vitesse de l'aérogénérateur pour une vitesse de vent donnée, de son démarrage à sa vitesse maximum, sans aucune charge raccordée à la génératrice (fig. 17).

Par ailleurs, l'inertie en rotation de la turbine étant connue grâce à son modèle numérique issu de la CAO, les pertes mécaniques dans la génératrice étant estimées à partir des données constructeurs de la génératrice et

l'accélération étant calculée à partir du relevé des vitesses, le principe fondamental de la dynamique permet de déduire la puissance électrique disponible pour toutes les vitesses de rotation de l'aérogénérateur (fig. 19). La courbe $CP=f(\lambda)$ est ainsi obtenue en moins de 3 minutes (fig. 18).

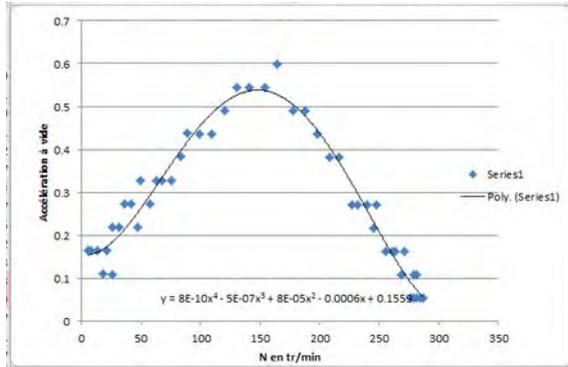


Figure 17 : exemple d'accélération en fonction de la vitesse de rotation

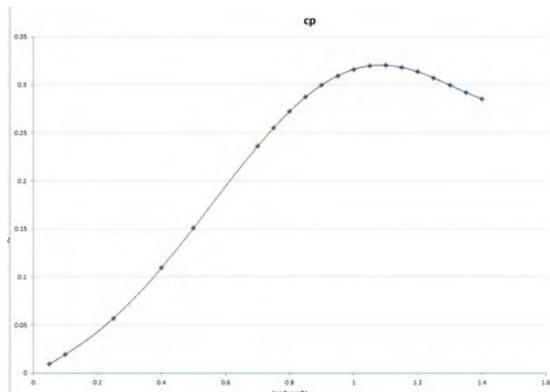


Figure 18 : exemple de $CP=f(\lambda)$

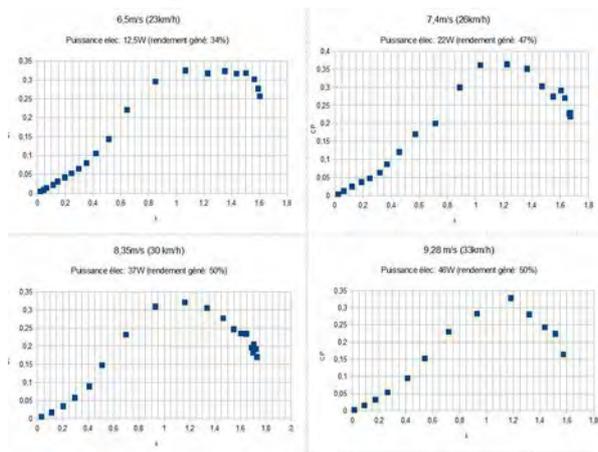


Figure 19 : exemples de puissances électriques estimées en fonction de la vitesse de rotation

- ▲ **essai en charge** : consiste à faire fournir une puissance électrique par l'aérogénérateur. Le but de cet essai est également de connaître la courbe de CP en fonction de λ . Il faut donc pour une même vitesse de vent faire évoluer la vitesse de rotation de l'éolienne et mesurer la puissance électrique fournie. La vitesse de rotation est fixée via un correcteur PID numérique (Arduino) associé à une

électronique de puissance (voir plus loin). La réalisation de la courbe complète est beaucoup plus longue. Ne sont pris en général uniquement que quelques points sur la courbe afin de valider l'estimation de l'essai à vide.

- ▲ essais de caractérisation de la génératrice et ce, afin de compléter les modèles de l'aérogénérateur à l'aide des outils logiciels PSIM® et Scilab.

2.2.4. Modélisation et simulation multiphysiques

L'introduction du modèle comportemental de la turbine issu des essais en soufflerie dans un modèle de l'aérogénérateur complet conçu sous « Scilab » (fig. 20) permet de prévoir les performances du système :

- dans les conditions et lors des différentes phases du concours (ce qui n'est pas possible avec notre modeste soufflerie),
- lors de la modification de tel ou tel paramètre (fig. 21)

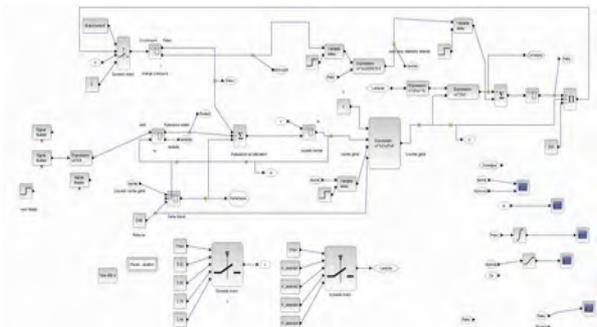


Figure 20 : le modèle générique d'étude des Dionysiennes (sous "Scilab").

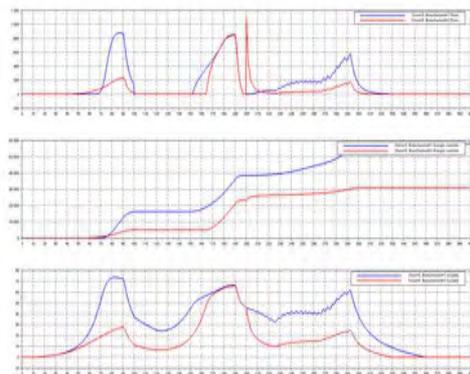


Figure 21 : exemple de comparatif de production énergétique sur une manche entre deux solutions (ici, association des bobinages de la génératrice monophasée)

2.2.5. Plan d'expériences et optimisation

De nombreux paramètres sont à prendre en compte lors de la conception d'une turbine de type Darrieus, les phénomènes régissant son comportement étant complexes. Ainsi, en début de projet, il a été décidé de se limiter à la prise en compte de :

- la longueur de la corde des pales influençant
 - le nombre de Reynolds,

- la solidité (Nc/D, ratio de la surface des pâles par rapport à la surface de vent balayée).
- le profil de pale influençant
 - le coefficient de portance,
 - le coefficient de traînée,
 - les turbulences.
- le nombre de pâles influençant
 - la solidité,
 - la facilité de démarrage.

Bien que l'étude se soit limitée pour l'instant à l'influence de trois paramètres, le nombre de prototypes possible est grand. La méthode des plans d'expériences a donc été utilisée pour déterminer la turbine parfaitement adaptée aux conditions du concours. Deux niveaux par paramètres ont été choisis et l'on a considéré les paramètres non interdépendants. Cela conduit à un plan d'expérience comprenant 4 essais.

Prototypes à réaliser, d'après les tables de Tagushi :

- dionysienne 3 pâles_NACA0018_25cm
- dionysienne 3 pâles_NACA0024_20cm
- dionysienne 5 pâles_NACA0024_25cm
- dionysienne 5 pâles_NACA0018_20cm

Ainsi, à partir d'un nombre limité d'essais, il a été possible de connaître l'influence de chaque paramètre (fig. 22). Cependant, afin de choisir au mieux ces paramètres il a également fallu s'attacher aux indicateurs de performance. Ces indicateurs pouvant être nombreux, le choix a été fait de se limiter pour l'instant à trois d'entre eux :

- le coefficient de performance maximum, $C_{p_{max}}$, pourcentage maximum de l'énergie du vent convertie. Ce coefficient doit être le plus élevé possible.
- La $\lambda_{optimal}$, ratio entre la vitesse du vent et la vitesse de la pale pour le $C_{p_{max}}$. Cet indicateur doit être le plus faible possible. Plus le $\lambda_{optimal}$ est faible moins l'éolienne a besoin de tourner vite pour être performante. Les vitesses de vents pour le concours atteignant 80 km/h, il est important de limiter la vitesse de rotation.
- La sensibilité à l'asservissement. Cet indicateur peut-être illustré comme suit : si l'éolienne conçue a un CP_{max} de 40% avec un λ de 1.5 il est intéressant, par exemple, de savoir son CP pour un λ de 1.4. Si le CP à $\lambda=1.4$ est égal à 38% on peut estimer que l'éolienne n'a pas besoin d'un asservissement de λ très performant. Si, au contraire, le CP tombe à 20% alors l'asservissement devient un élément critique de la conception.

Tableau récapitulatif du plan d'expérience

	$C_{p_{max}}$	$\lambda_{optimal}$	Sensibilité
naca0018	neutre	-	++
naca0024	neutre	+	--
5 pâles	neutre	++	-
3 pâles	neutre	--	+
20 cm	-	-	neutre
25 cm	+	+	neutre

Figure 22 : résultats du plan d'expérience

2.2.6. Stratégies de commande et de régulation

La gestion de l'énergie électrique produite est cruciale pour les performances de l'aérogénérateur, tous les efforts sur la réalisation de la partie mécanique pouvant être rapidement anéantis par une mauvaise régulation. La production est très dépendante de la vitesse de rotation de la turbine.

Plusieurs stratégies de régulation peuvent être mises en place, mais dans tous les cas on cherchera à fonctionner au $\lambda_{optimal}$ (ce dernier est sensiblement identique quelle que soit la vitesse du vent) :

- stratégie 1 : application d'une consigne de vitesse qui permet d'optimiser « en moyenne » la production de l'éolienne sur la plage des vitesses de vent du concours. Cette stratégie est loin d'optimiser la production à chaque instant.
- stratégie 2 : asservissement de la vitesse de rotation de l'éolienne en fonction de celle du vent. Bien que relativement simple à mettre en oeuvre, elle nécessite l'ajout d'un capteur de vitesse de vent, ce qui est délicat dans les conditions du concours.
- stratégie 3 : basée sur le principe de la recherche du point de puissance maximum. Le programme recherche le point de fonctionnement optimal en faisant évoluer la puissance vers son maximum par variation de la vitesse de rotation dans un sens :
 - si la puissance augmente il continue,
 - si elle diminue il repart dans l'autre sens.

Très simple dans son principe, elle est très délicate à réaliser en pratique : risque de se retrouver coincé sur un pic de puissance très bas car l'évolution de la puissance ne suit pas une courbe parfaite.

- stratégie 4 : inspirée par le nouveau règlement du concours *GIM'Eole*. une des charges du concours suit une loi en $1^{1/2}$, celle-ci étant censée être bien adaptée aux éoliennes. En effet, la tension aux bornes de la génératrice est, dans une première approximation, proportionnelle à la vitesse de rotation de l'éolienne. La « dionysienne » devant elle aussi avoir une vitesse de rotation proportionnelle à la vitesse du vent, si la vitesse de vent double la tension double également, ce qui pour une charge résistive revient à multiplier par 4 la puissance ($P=U^2/R$). Or la puissance disponible dans le vent est multipliée par 8. Donc, avec une simple charge résistive sans régulation, la puissance fournie ne serait pas suffisante et l'éolienne augmenterait sa vitesse ce qui ne permettrait pas d'obtenir un $\lambda_{optimal}$ et par conséquent un rendement suffisant. Par contre, si le courant débité est proportionnel au carré de la tension la vitesse de l'éolienne restera à son $\lambda_{optimal}$. La régulation devra ainsi piloter le hacheur afin d'obtenir un courant proportionnel au carré de la tension, la difficulté résidant dans la détermination du coefficient optimal.

Dans tous les cas, la régulation mise en oeuvre agira sur le rapport cyclique du signal de commande du transistor d'un convertisseur DC/DC de type abaisseur de tension placé entre le convertisseur AC/DC et les charges du concours.

C'est la stratégie 4 qui a été mise en oeuvre en 2014 et l'algorithme ainsi que la correction PID associée

ont été implantés dans une carte *Arduino*⁽¹²⁾ à base de micro-contrôleur *Atmel*® (fig. 23).

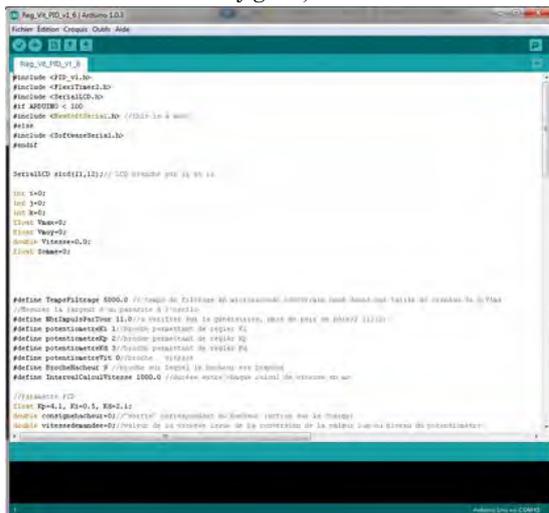


Figure 23 : programme en langage *Arduino* implanté dans le microcontrôleur *Atmel*®

2.2.7. Génération d'énergie électrique

Pour l'édition 2014 de *GIM'Eole*, l'équipe a décidé de présenter une des *Dionysiennes* avec une génératrice faite maison. Deux étudiants, qui ont commencé à se pencher sur la question dès l'année précédente (recherches bibliographiques notamment), ont donc organisé les tâches de conception (sous *Femm* et *SolidWorks*) et de réalisation d'une génératrice synchrone monophasée à aimants permanents et flux axial et pratiquement sans circuit magnétique (fig. 24, 25 et 26). L'usinage des différents plateaux accueillant les aimants et bobines a été réalisé avec les machines à commande numérique du plateau technique de l'IUT. Les bobines ont été réalisées avec un bobineur maison adapté au profils usinés dans le plateau. Notons aussi ici qu'une procédure de montage des aimants a due être mise en place car l'opération présente des risques de fort choc mécanique.

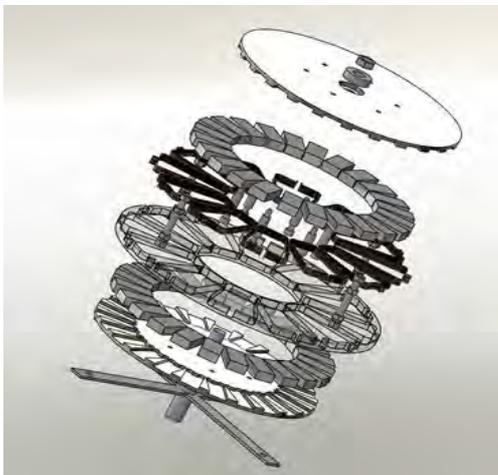


Figure 24 : vue éclatée de l'assemblage des éléments de la génératrice synchrone (*SolidWorks*)

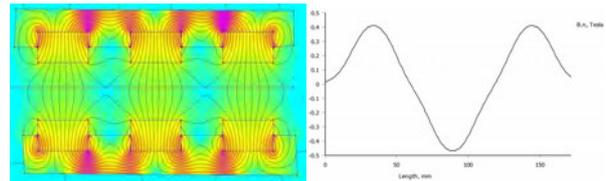


Figure 25 : modélisation et simulation du comportement magnétique de la génératrice synchrone (*FEMM*)



Figure 26 : deux étudiants réalisent les connexions des 12 bobines vers le bornier de sortie au *GIM'Lab*

Caractéristiques de la génératrice :

- aimants : 24 paires d'aimants, 60mm*30mm*15mm (hauteur). Espace entre aimants : 30mm, soit $B_{max}=0.48T$
- bobines : 12 bobines parfaitement en phase (ou opposition), 29 spires, fil de 2mm de diamètre, $R_{bob}=0.111\text{ Ohm}$
- configurations possibles en monophasé :
 - 12 en série : $E = 2\text{ Volts / rad/s}$
 - 6 en série x 2 : $E = 1\text{ Volt / rad/s}$
 - 4 en série x 3 : $E = 0.66\text{ Volt / rad/s}$
 - 3 en série x 4 : $E = 0.5\text{ Volt / rad/s}$
 - 2 en série x 6 : $E = 0.32\text{ Volt / rad/s}$
 - 12 en parallèle : $E = 0.16\text{ Volt / rad/s}$

Cette génératrice, qui devrait évoluer vers une version triphasée à l'avenir, présente des couples résistants mécanique et magnétique bien inférieurs à celle issue du commerce et utilisée jusqu'à présent. Ceci est très important dans notre cas car notre *Dionysienne*, de type *Darrieus*, ne doit pas trop ralentir entre deux phases d'une manche et démarrer le plus rapidement possible.

2.2.8. Gestion de l'énergie électrique

Les machines synchrones utilisées, monophasée et triphasée, peuvent, via un pont redresseur, débiter directement dans la charge. Cependant cette solution, simple et largement utilisée lors des épreuves du concours à Cherbourg, trouve avec le nouveau

règlement de Villeurbanne ses limites étant données les natures différentes des charges à alimenter.

Il est donc nécessaire de rajouter entre le pont redresseur et la charge, un étage de conversion DC/DC qui permettra d'optimiser le transfert d'énergie selon un des principes de régulation vu précédemment. Le choix de l'an passé d'une structure de type « SEPIC », dérivée du hacheur à accumulation capacitive et permettant d'élever et d'abaisser la tension sans en inverser le signe, a été abandonné au profit d'une simple structure abaisseur. En effet, la vitesse élevée de notre éolienne de type *Darrieus* permet de débiter sans avoir besoin d'élever la tension même dans la charge batterie (48V).

Démarche de CFAO proposée aux étudiants :

- modélisation, analyse par simulation et dimensionnement des constituants de la chaîne d'énergie à l'aide de *PSIM*® (fig. 27)

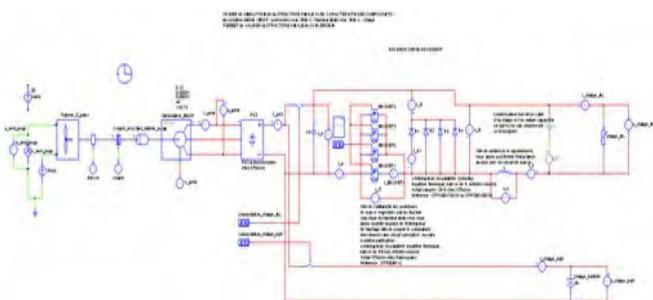


Figure 27 : fichier *PSIM*® de la chaîne d'énergie permettant d'en valider le fonctionnement avec les deux types de charge.

- réalisation du montage du hacheur et des cartes externes de mesure sur plaque de câblage virtuelle puis conception du typon (outil *Fritzing*⁽¹⁰⁾)
- adaptation (*Inkscape*⁽¹¹⁾ + *CharlyGraal*®) des fichiers graphiques issus de *Fritzing* pour usinage avec une MOCN (gravure anglaise / *CharlyRobot*® du plateau technique de l'IUT). La carte hacheur a été réalisée en sous traitance chez *Fritzing* (fig. 28).



Figure 28 : fabrication des cartes électroniques (gravure anglaise à gauche / sous-traitance *Fritzing* à droite)

- montage et soudage des composants sur les cartes, montage des cartes hacheur, mesure et *Arduino* en coffret puis vérification des continuités (fig. 29).



Figure 29 : montage en coffret

Le redresseur à diodes et son dissipateur thermique ainsi que les ampèremètre, voltmètre et capacité de filtrage ont été montés dans un autre coffret.

2.2.9. Essais de la chaîne d'énergie

A la fin de cette nouvelle expérience de projet, les essais à vide et en charge conduits par les étudiants ont permis de valider grossièrement la structure complète "chaîne d'énergie" + "chaîne d'information" (fig. 30).



Figure 30 : essai concluant de la nouvelle génératrice

2.3. Le bilan des participations des « Dionysiennes » à *GIM'Eole*

Un premier prototype, à peine finalisé, a été présenté lors de l'édition 2013 de *GIM'Eole*. Les principaux problèmes alors rencontrés ont été :

- ▲ des problèmes de perturbations électromagnétiques de la partie commande qui ont réduit à néant le travail fait sur cette dernière. Dès la mise en marche du ventilateur de la soufflerie, via son variateur électronique de vitesse, la carte *Arduino* ne répondait plus, ne permettant donc plus la gestion du transfert de puissance de la génératrice vers la charge, via le hacheur (fig. 24). Ce problème a été également constaté par d'autres équipes ayant pourtant mis en œuvre des constituants de commande réputés moins sensibles (*API*, etc...)
- ▲ de ce fait, la connexion de la génératrice à la charge a été effectuée en mode manuel provoquant de tels efforts sur la turbine ainsi freinée que plusieurs casses ont eu lieu au cours des différentes phases. Il faut ici rendre hommage à la ténacité des étudiants qui ont réparé la turbine à plusieurs reprises au cours de ces trois journées de concours. En effet, la structure en bois est réparable (colle à bois, vis, serre-joints) contrairement à une structure en fibres de carbone par exemple (fig. 31).



Figure 31 : la turbine 3 pales et la génératrice du commerce au *GIM'Lab* / La même turbine en cours de réparation au concours *GIM'Eole* 2013

Finalement cette édition s'est achevée par l'obtention du prix du « développement durable » étant donné le bon bilan carbone présenté par la « Dionysienne » (fig. 32). L'ensemble des problèmes rencontrés et les riches discussions avec les équipiers concurrents ont été de nature à relancer immédiatement la réflexion en vue de l'édition suivante.



Figure 32 : remise du prix du développement durable (GIM'Eole 2013)

Deux « Dionysiennes », du type de ceux dont nous avons présenté la conception et la production plus haut, ont été présentées lors de la septième édition du concours GIM'Eole, les 28 et 29 mars 2014 derniers, par deux équipes d'étudiant-e-s :

- équipe 1 : turbine 3 pales, profil issu du plan d'expérience mais encore amélioré (dit «Matthieu Scherrer», du nom d'un passionné nous ayant conseillé cette amélioration), 25cm, génératrice monophasée maison à aimants permanents et flux axial, sans circuit magnétique (fig. 33).



Figure 33 : équipiers et Dionysienne de l'équipe 1, en attente de passage dans la soufflerie du concours GIM'Eole 2014.

- équipe 2 : turbine 5 pales, NACA0024 et 25cm, génératrice du commerce déjà utilisée en 2013

(modèle « Xtrême ARRIERE, 48V et 1000W », fournie par le distributeur *Cycloboost*⁽¹³⁾). Fait partie d'un kit destiné à la motorisation de cycles comprenant la machine, le contrôleur d'alimentation à partir des batteries et les organes de commande et de sécurité).

Cette deuxième tentative s'est soldée par un succès puisque **l'équipe 1 a remporté le prix de la « performance énergétique globale »** (46000 J), offrant ainsi le trophée à l'IUT de Saint-Denis pendant un an et l'équipe 2 le prix du « design industriel » récompensant la démarche de conception et fabrication mise en oeuvre au cours du projet (fig. 34). Les jurys ont également apprécié les travaux effectués par les étudiant-e-s sur la génératrice et le dossier technique. L'ensemble des données de production au cours des manches du concours est accessible sur simple demande auprès des auteurs.



Figure 34 : les deux équipes de Saint-Denis victorieuses au concours GIM'Eole 2014

3. Organisation du projet en première et deuxième années de DUT GIM

Depuis 2011, année où le département a décidé de participer au concours, et plus encore depuis 2013 avec l'investissement sur les éoliennes à axe vertical, l'équipe pédagogique du département a choisi d'exploiter ce système pluri-technique comme support privilégié de la quasi totalité des activités de projet :

- en GIM1 où des activités préparatoires sont conduites au cours du S2. Modalités :
 - répartition en petits groupes de projet à la suite d'une séance de lancement en amphithéâtre située quelques semaines en amont de la petite semaine de projet (fin S2). Cette séance permet de présenter :
 - le concours et son règlement,
 - les réalisations passées, « Ondulienne » comprise,
 - les principes de fonctionnement d'une turbine de type *Darrieus* et des chaînes d'énergie et d'information,
 - l'analyse fonctionnelle de l'aérogénérateur, d'un point de vue utilisation,
 - les différentes tâches de chaque groupe sont identifiées par les enseignants à partir du retour d'expérience du concours passé et des besoins pour l'édition suivante,
 - après la séance de lancement, les étudiants effectuent quelques recherches en

bibliothèque, sur les bases de données numériques accessibles à l'IUT (*Techniques de l'Ingénieur*, etc...) et sur internet. L'utilisation de la plateforme de travail collaboratif et de partage de données AGORA⁽¹⁴⁾ du département a aidé au travail préparatoire en dehors des heures de projet et à la capitalisation des données et des productions multimédia.

- lorsque certaines connaissances nécessaires à la réalisation de certaines tâches du projet ne sont pas connues car elles font partie des enseignements dispensés en deuxième année, un enseignant de la spécialité apporte un complément ciblé. L'apprentissage et l'acquisition de ces connaissances par le biais de la réalisation est de toute façon privilégié.
- à l'issue de la semaine de projet la plupart des groupes ont réalisé tout ou partie de la solution technique attendue. L'objectif premier pour les enseignants consiste surtout à les mettre en situation de collaborer au sein d'un groupe et au contact d'outils de conception et de production qu'ils n'avaient que peu utilisés jusque là : certains outils de CFAO, outillages à main et électroportatifs, machines outils traditionnelles et à commande numérique, imprimantes 3D, etc...
- un autre objectif est bien sûr d'amener la plupart de ces étudiants à se motiver suffisamment pour envisager d'ores et déjà leur participation l'édition à venir de *GIM'Eole* en GIM2. De plus, pouvoir démarrer la préparation du concours avec des étudiants déjà sensibilisés aux contraintes du projet et ayant un niveau de connaissances suffisant est un plus pour les enseignants.
- en GIM2, où deux équipes sont constituées (neuf étudiant-e-s en tout en 2013-14). Celles-ci finalisent les projets débutés en GIM1, développent de nouvelles solutions si le règlement évolue et investissent donc le *GIM'Lab* comme présenté dans cet article.

Bien que le programme pédagogique national (PPN) ne prévoit pour l'instant aucune unité d'enseignement ni d'heures spécifiquement allouées à l'activité de projet technique, comme cela peut-être le cas dans d'autres départements (GMP, GEIL, GTE, ...), nous nous sommes débrouillés pour dégager un peu de temps pour cela (tout en comptant aussi beaucoup sur la disponibilité des étudiants). La situation évoluera l'an prochain car le projet tuteuré, inscrit désormais au PPN, inclura des activités de projet technique aux semestres 2 et 3. Les départements GIM devant accueillir les nouveaux bacheliers STIDD et Ssi, la formation s'adapte pour prendre en compte les acquis des activités de projet que les élèves ont découvertes et menées au lycée.

4. Perspectives et développement du projet « Dionysienne »

4.1. Les pistes d'optimisation du prototype

La nouvelle période qui se présente, suite à ces premiers succès, va être l'occasion d'améliorer les solutions existantes et d'en développer de nouvelles avec les étudiant-e-s :

- suite des recherches concernant l'optimisation de la turbine pour les conditions du concours et ce, à partir des conclusions du plan d'expérience,
- en parallèle, exploitation de l'outil logiciel « *X-foil* » développé par le MIT et dédié à l'optimisation des profils de pale (<http://web.mit.edu/drela/Public/web/xfoil/>),
- recherche d'autres matériaux et adaptation des moyens de production des pales et bras de pales,
- amélioration de l'état de surface des pales et des bras de pales,
- optimisation de la solution de régulation,
- re-conception et réalisation d'un hacheur abaisseur robuste et fiable, isolé et immunisé vis-à-vis des perturbations électromagnétiques constatées et mieux adapté à la charge électronique du concours,
- étude du remplacement de l'ensemble (redresseur PD3 + hacheur) par un redresseur commandé,
- développement d'une génératrice synchrone à flux axial triphasée,
- instrumentation pour la surveillance de l'éolienne en exploitation (vitesse de rotation, analyse vibratoire, thermographie IR, ...) et affichage (*Fig. 35*) des résultats à l'aide d'un système intégré à l'éolienne utilisant la persistance rétinienne (POV en anglais pour « *persistence of vision* »),



Figure 35 : essai d'affichage au GIM'Lab, éolienne en rotation

- aménagement d'une plus grande zone d'essai dédiée aux éoliennes en fabrication au *GIM'Lab*,
- réaménagement des différents postes de production et d'essai au sein du *GIM'Lab*,

4.2. Implications d'autres formations dans le projet

Des étudiants issus d'autres formations liées au département GIM de l'IUT de Saint-Denis participent ou ont participé, de manière ponctuelle, à la conception et à la fabrication de tout ou partie d'une solution technique pour la Dionysienne :

- ▲ accueil d'étudiants étrangers (programme international européen IP RELWA – *Renewable Energies for Living and Working Areas*) : au cours du mois d'avril 2013, 6 étudiants ont travaillé sur la conception et la réalisation d'un premier prototype

de turbine 5 pales (profil NACA018 / 20cm) permettant ainsi de compléter la série de prototypes à réaliser d'après les tables de Tagushi.

Cette turbine s'est avérée pouvoir démarrer toute seule sans l'assistance du contrôleur électronique utilisé jusqu'alors, ce qui a généré les avantages suivants :

- simplification de la structure d'électronique de puissance,
 - élimination du système de commutation automatique, géré auparavant par la carte Arduino via un relais, pour le passage de la phase de motorisation (démarrage) à la phase de génération (production).
- ▲ filiale énergétique de l'école d'ingénieur Sup'Galilée de l'université Paris 13-Nord ⁽¹⁵⁾, dans le cadre des projets techniques encadrés proposés en deuxième année. Ex.: problématiques de mécanique des fluides, d'optimisation de la conception de la génératrice électrique, d'optimisation de l'électronique de puissance, d'instrumentation d'une dionysienne montée en toiture ou en soufflerie...
- ▲ licence professionnelle Gestion de la Production Industrielle mention Management et Ingénierie des Systèmes Multitechniques. (MISM) ⁽¹⁶⁾ dans le cadre des projets tuteurés portant sur une installation ou un équipement en particulier. Ex.: développement, mise en service, exploitation et maintenance de la soufflerie au *GIM'Lab* ou encore modélisations SysML de la dionysienne et de la soufflerie.
- ▲ lycées: un partenariat a été signé en 2013 entre l'IUT de Saint-Denis et 26 lycées de la région visant à promouvoir, auprès des lycéens en filière technologique, les formations dispensées. Dans ce cadre, le département GIM utilisera la *Dionysienne* comme support de présentation des activités conduites au département, voire comme support de projet commun,

4.3. Auto-équipement de l'IUT / toiture terrasse de la centrale de Stains (SDCSD)

Un débouché autre que celui du concours *GIM'Eole* pour les « Dionysiennes » consiste en leur installation en extérieur pour en évaluer les performances dans le temps et en conditions réelles. Cela implique évidemment la mise en place d'une charge utile adaptée au site et d'un système d'acquisition permettant de relever les grandeurs physiques relatives à leur fonctionnement ainsi que les conditions météorologiques.

Deux possibilités s'offrent pour l'instant à nous :

- une des toitures-terrasses de l'IUT qui entourée de nombreux autres bâtiments. La connexion au laboratoire d'électrotechnique et d'électronique de puissance du département GIM ainsi que l'implantation en parallèle d'un aérogénérateur à axe horizontal offrirait de nombreuses possibilités d'analyses (gestion de l'énergie produite, comparatifs, ...),
- une des toitures terrasses très dégagée de la centrale biomasse de Stains (93), exploitée par Cofely-GdF-Suez, et ce, dans le cadre d'un partenariat entre la Société de Distribution de Chaleur de Saint-Denis⁽¹⁷⁾ et l'IUT.

Ces expérimentations intéressent d'ores et déjà l'Agence Locale de l'Energie et du Climat de Plaine-Commune¹⁸ avec qui la commission « développement durable » de l'IUT est en contact.

4.4. La Dionysienne comme outil de communication

Le département GIM de l'IUT de Saint-Denis a choisi une adaptation locale autour du thème « *Transports et Energies en Milieu Urbain* ». Communiquer sur cette spécificité en région Ile-de-France est important pour valoriser la formation. Ainsi, les éoliennes et la démarche mise en œuvre sont présentées dans le cadre :

- des journées portes ouvertes de l'IUT,
- des salons relatifs à l'orientation des lycéens (Paris et Plaine-Commune),
- de la manifestation Savante Banlieue⁽¹⁹⁾, portée par Plaine-Commune, sur les campus de l'université Paris 13-Nord à Villetaneuse et à Bobigny et de l'université Paris 8 à Saint-Denis. C'est là l'occasion de présenter sur un stand ou lors d'une mini-conférence, au grand public, aux élèves des classes de primaire, de collège et de lycées, mais aussi aux étudiants, le principe de fonctionnement de cette éolienne et la démarche mise en œuvre pour sa conception et sa fabrication.

5. Conclusions

Souhaité et mis en place par les enseignants et technicien du département, le *GIM'Lab* (toujours en cours d'aménagement) se trouve être un élément essentiel à la réussite de notre démarche de projet. Il se veut être un lieu ouvert de création, d'essai et de développement en dehors des classiques créneaux de C/TD/TP (et des laboratoires spécifiques qui y sont associés) que ce soit pour le projet *GIM'Eole*, pour d'autres projets du département ou pour les projets plus personnels des étudiants. Les moyens à disposition (machines citées précédemment, outillages, outils logiciels, technicien...) et la charte d'utilisation sont le cadre d'un apprentissage tourné vers l'action et l'expérimentation avec, pour corollaire, le développement d'une organisation pédagogique réactive. Se pose aujourd'hui la question de la création d'une structure commune à d'autres départements (Génie Mécanique et Productique, Sciences et Génie des Matériaux, ...) afin de mutualiser les compétences, connaissances et ressources et de permettre le développement des projets de chacun.

6. Remerciements

Les auteurs remercient les étudiant-e-s qui ont participé aux différentes éditions du concours *GIM'Eole*, les collègues du département GIM et de l'IUT de Saint-Denis (notamment le plateau technique et Joyce Bazabas), université Paris 13-Nord, ainsi que Plaine-Commune pour son soutien.

7. Compléments

- Vidéo du concours *GIM'Eole 2014* : http://youtu.be/C3ag8_75M3Y
Merci à Gilles Pollet, Département GIM de l'IUT de Villeurbanne Lyon-1 pour ces documents et, bien sûr, à toute son équipe pour l'organisation du concours !
- video présentée par les étudiants de GIM Saint-Denis ayant participé au concours *GIM'Eole 2014* : <https://www.youtube.com/watch?v=GrmZtOuAxfg>
- les projets au département GIM de l'IUT de Saint-Denis : <http://www.iutsd.univ-paris13.fr/iutsd/gim/302-des-projets-pluridisciplinaires-propos%C3%A9s-aux-%C3%A9tudiants.html>



Figure 36 : rupture de la soudure du support de génératrice de la Dionysienne 1, lors de la manche 2 (GIM'Eole 2014)

8. Références

- 1 www.iutgim.org/iut-genie-industriel-maintenance/page-gimeole.html
- 2 www.iutgim.org
- 3 <http://www.gimeole.ovh.org/spip/>
- 4 <https://www.facebook.com/GimEole2013Villeurbanne?ref=stream>
- 5 www.femm.info/wiki/HomePage
- 6 <http://www2.mines-douai.fr/actualites/creation-d-entreprises-voileo-le-vent-en-poupe>
- 7 <http://kitegen.com/>
- 8 www.thermwood.com
- 9 <http://www.stratoconception.com>
- 10 <http://fritzing.org/>
- 11 <http://inkscape.org>
- 12 www.arduino.cc
- 13 www.cycloboost.com
- 14 www.agora-project.net
- 15 http://www.sup-galilee.univ-paris13.fr/index.php?option=com_content&task=view&id=72&Itemid=229
- 16 <http://www.iutsd.univ-paris13.fr/iutsd/formations/licence-professionnelle/lp-gestion-production-industrielle/43-management-et-ingenierie-des-systemes-multitechniques.html>
- 17 <http://saint-denis.reseau-chaaleur.fr/>
- 18 <http://alec-plaineco.org/>
- 19 <http://savantebanlieue.plainecommune.fr/>

Exemples de projet technique en partenariat avec des industriels en STS Electrotechnique

MOUSTAFA CHERIGUENE, pour l'équipe pédagogique du lycée polyvalent Jean Jaurès
Enseignant de sciences industrielles de l'ingénieur, option énergie,
mustapham.cheriguene@ac-versailles.fr
Lycée Jean Jaurès, 25 rue Charles Lecoq, 95100 Argenteuil
<http://www.lyc-jaures-argenteuil.ac-versailles.fr>

Résumé : cet article vise à présenter deux expériences de projet technique industriel réalisé en partenariat avec des entreprises du domaine du génie électrique. Un premier projet prend pour support une installation de distribution de l'énergie électrique dans le cadre d'une réhabilitation d'un cinéma parisien et l'autre un équipement de traction électrique dans le cadre d'une réhabilitation d'ascenseurs destinés au transport de personnes. Ces deux projets ont été conduits selon les prescriptions pédagogiques énoncées dans le référentiel de formation du BTS Electrotechnique et ont été contraints par les normes, réglementations et règles de l'art propres aux secteurs d'activités pré-cités.

1. Le projet technique industriel en STS électrotechnique¹

L'objectif est de mener une véritable démarche de projet par un travail en groupe de 4 à 5 étudiants et ce, sur un support ayant des contraintes industrielles.

Ce support peut être issu du :

- domaine industriel de la production
 - modification ou amélioration d'un processus de fabrication
 - rénovation d'une machine de production
- domaine de l'habitat, des infrastructures et des bâtiments industriels
 - conception, installation et suivi d'une installation électrique pour un bâtiment industriel
 - conception, installation et suivi d'une installation électrique pour un bâtiment recevant des personnes
- domaine des services et des produits
 - amélioration et évolution d'un produit
 - proposition et mise en place d'actions préventives ou correctives sur la gestion et la qualité de l'énergie

Ce projet est :

- positionné au second semestre de la 2^{ème} année (de février à mai / soutenance en juin)
- d'une durée de 12 semaines de 16h = 192h
- encadré par l'équipe pédagogique (deux enseignants de génie électrique, un enseignant de sciences appliquées et un enseignant de construction mécanique)

Le groupe d'étudiants est en relation avec :

- un chef de projet (un enseignant) qui assure le bon déroulement et le suivi pédagogique. Il :
 - garantit la mise en condition des étudiants pour les évaluations
 - suit la mise en place des solutions de remplacement
 - vérifie la conformité du projet par rapport à sa définition
- des référents techniques (l'équipe pédagogique) qui assurent leurs missions d'expertise :
 - conseillent, valident, contrôlent les différentes tâches du projet

- interviennent sur plusieurs projets mais dans leur domaine
- travaillent en équipe pour favoriser la cohérence des informations fournies
- aux autres ressources humaines (personnels de l'entreprise donneuse d'ordre, sous-traitants, organismes certificateurs...) :
 - définissent les contraintes des projets industriels
 - proposent des solutions aux problèmes particuliers
 - valident des solutions avant exécution
 - certifient la conformité

Le groupe d'étudiants :

- propose une organisation des tâches
- exécute les différentes tâches du projet
- rend compte du travail accompli
- informe les différents partenaires du projet

Le déroulement du projet s'effectue en quatre phases. Celles-ci doivent permettre l'acquisition des compétences suivantes :

- **Phase 1 (organisation du projet / 3 semaines) :**

- C05 : déterminer les ressources et les contraintes
- C11 : estimer les coûts prévisionnels
- C15 : estimer les délais de réalisation
- C27 : estimer les délais d'approvisionnement
- C32 : interpréter la demande du client

Tâches et activités associées :

- interpréter la demande du client :
 - comprendre l'objectif du projet.
 - apporter des éclaircissements à la demande du client
 - redéfinir certaines parties du cahier des charges en fonction des évolutions.
 - faire valider la formalisation du cahier des charges
- rechercher des solutions techniques compatibles avec le cahier des charges :
 - rechercher les solutions constructeurs proches de la demande
 - rechercher des solutions dans les ressources internes.
 - définir les ressources nécessaires à l'élaboration de chaque solution
 - choisir la solution la plus adaptée
- estimer les coûts et les délais de réalisation de chaque solution :

- demander des offres de prix auprès des fournisseurs
- chiffrer les recours à la sous traitance
- demander les délais d'approvisionnement
- estimer les durées d'étude, de réalisation et d'essais
- réaliser les bons de commande
- **planifier le projet :**
 - ventiler le projet en différentes tâches
 - positionner les tâches sur un planning en respectant toutes les contraintes

- Phase 2 (conception du projet / 4 semaines)

- C06 : respecter une procédure
- C10 : réaliser les représentations graphiques nécessaires
- C19 : identifier les paramètres de réglage
- C24 : suivre la réalisation
- C33 : animer une réunion

Tâches et activités associées :

- **étudier la solution technique :**
 - rechercher les documentations techniques nécessaires
 - concevoir les schémas développés et de réalisation
 - concevoir les plans de l'installation et les schémas de raccordement
 - définir l'organisation des programmes
 - écrire les programmes dans un langage approprié
- **déterminer les paramètres de réglages :**
 - identifier les paramètres à régler
 - rechercher par calcul ou simulation les valeurs des paramètres de réglages.
 - définir des méthodes de réglage sur site
- **réaliser le système :**
 - concevoir le système, l'installation ou le produit conformément aux prescriptions du dossier de réalisation
- **organiser la réalisation :**
 - suivre l'évolution de la réalisation par rapport au planning
 - réceptionner le matériel
 - suivre les évolutions des coûts et en particulier celles dues aux modifications
 - mettre en place et participer à des réunions de suivi de travaux

- Phase 3 (réalisation du projet / 5 semaines)

- C14 : analyser les causes de dysfonctionnement
- C17 : mettre en œuvre des moyens de mesurage
- C18 : interpréter des indicateurs, des résultats de mesure et d'essais
- C20 : régler les paramètres
- C21 : réaliser un ouvrage, un équipement ou un produit

Tâches et activités associées :

- **élaborer des procédures d'essais :**
 - définir une procédure de première mise sous tension
 - définir une chronologie des essais de qualification
 - définir le contenu des essais partiels
 - réaliser des essais :
 - choisir le matériel de mesure adapté
 - réaliser les essais en toute sécurité, conformément aux différentes procédures
- **interpréter les résultats :**
 - confronter les résultats de mesure aux prévisions
 - vérifier l'influence des paramètres de réglage
 - modifier les paramètres en vue d'une nouvelle campagne de mesure
- **finaliser la réalisation :**
 - assembler ou interconnecter les différentes parties de la réalisation
 - vérifier le fonctionnement de l'ensemble, conformément au cahier des charges
 - réaliser les essais de validation

Trois revues de projet, sous forme d'entretien du groupe pendant 20mn au maximum, permettent à l'équipe pédagogique d'évaluer les compétences au travers des tâches accomplies et viennent conclure chaque fin de phase. Viennent ensuite la soutenance finale et l'examen du dossier, au mois de juin (épreuve ponctuelle), par la commission d'interrogation.

2. Réhabilitation du cinéma Le Louxor, Paris.

Le projet de dimensionnement et de réalisation d'un tableau général basse tension (TGBT), qui s'est déroulé au cours de l'année scolaire 2011-2012, a été confié à deux étudiants de la STS Electrotechnique du lycée et a nécessité la signature d'une convention de « partenariat technologique » entre le lycée et l'entreprise BTB-Elec² qui a obtenu le lot « distribution électrique » de cette réhabilitation.

« BTB Elec » (*Fig. 1*) est une SAS dirigée par M. Richard David. Créée en janvier 1998 et installée à Morangis (91), la société « BTB Elec » oeuvre dans les secteurs de l'industrie, du tertiaire et des réseaux de communication. Elle étudie et réalise notamment des installations dans les domaines suivants :

- réseaux de puissance (HT et BT),
- réseaux de communication, information et détection incendie,
- automatismes, gestion technique des bâtiments, gestion technique centralisée.



Figure 1 : vue des locaux de l'entreprise BTB Elec

2.1. Présentation du cinéma Le Louxor

- Le Louxor en 10 dates (d'après la « Ville de Paris »³) :
- **6 octobre 1921** : inauguré en 1921, œuvre de l'architecte Zipcy et du décorateur céramiste Tibéri. La salle est réalisée par le groupe Lutetia-Wagram.
- **1930** : la société des cinémas Pathé (SGCP) devient propriétaire du Louxor.
- **1954** : Pathé rénove entièrement la salle.
- **5 octobre 1981** : les façades et la toiture sont inscrites à l'inventaire supplémentaire des monuments historiques.
- **1983** : Pathé se sépare du Louxor. La société Textile Diffusion le rachète.
- **Entre 1983 et 1987**, trois tentatives de reprises par des boîtes de nuit échouent.

- **1987** : le Louxor ferme ses portes
- **25 juillet 2003** : la Ville de Paris rachète le Louxor.
- **8 Janvier 2010** : obtention du permis de construire
- **premier trimestre 2013** : réouverture du Louxor Palais du cinéma
- Pour plus de renseignements concernant ce cinéma, l'auteur renvoie vers les liens donnés en références⁴.

2.2. Utilisation de l'outil CANECO BT (alpi softwares)⁵



Les étudiants ont du effectuer de nombreuses tâches du projet à l'aide de cet outil logiciel complet de conception des installations de distribution de l'énergie électrique BT. Ce dernier permet :

- le calcul normatif des sections de câble,
- le dimensionnement des appareillages de protection,
- la détermination de la sélectivité par tableau ou par courbes temps-courants,
- la prédétermination automatique des armoires,
- la schématique automatique,
- l'édition de dessins électrotechniques,
- le chiffrage complet de l'installation,

Il permet donc de produire des schémas (fichiers compatibles *AUTOCAD*) et les documents nécessaires à la conception, la réalisation, la vérification et la maintenance des installations électriques. *CANECO BT* a obtenu trois avis techniques (NF C 15-100, BS et RGIE) qui attestent la conformité normative de ses calculs, et prend en charge les normes internationales dont IEC364, HD384 et VDE.

La formation sur cet outil peut donner lieu à une certification reconnue dans le milieu.

Il s'agit d'un outil permettant d'exploiter des matériels et appareillages de différents constructeurs.

Pour pouvoir mettre en œuvre cet outil professionnel dans le cadre de ce projet :

- l'établissement a du investir, au travers de la taxe d'apprentissage, dans une licence établissement 15 postes,
- l'enseignant a du prendre sur son temps de vacances scolaires et suivre une formation de deux semaines (tarif négocié) :
 - semaine 1 (initial) : prise en main de *CANECO BT*,
 - semaine 2 (expertise) : respect de la NF C-15-100, conception d'une affaire, génération d'un dossier pour les organismes de contrôle, ...

2.3. Déroulement du projet

La définition de ce projet et la répartition des responsabilités au sein de l'équipe ont été présentés par les enseignants à l'inspection, fin novembre 2011, lors

de la réunion interacadémique de validation des projets. Il a ensuite été proposé aux étudiants de deuxième année et deux d'entre eux se sont portés volontaires pour le mener.

Il a été demandé aux étudiants de planifier le déroulement de leur projet en utilisant l'outil GanttProject⁶

Ce dernier leur a permis de :

- lister les tâches à réaliser,
- affecter les ressources et le temps à chaque tâche, grossièrement au début et de plus en plus finement au fur et à mesure de l'avancée du projet (Fig. 2),

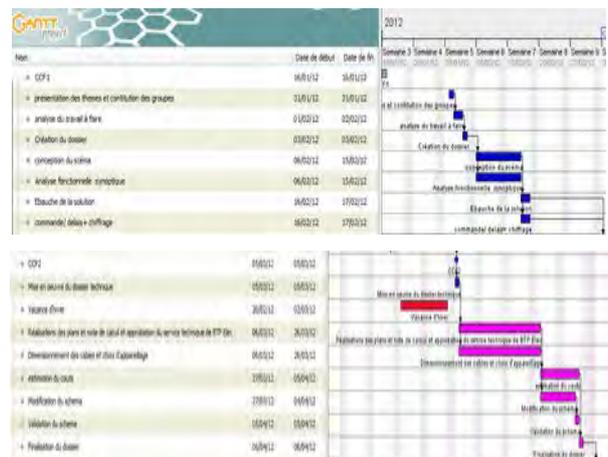


Figure 2 : affectation des ressources et du temps

- programmer les réunions de chantier et les RdV chez le partenaire ou ses sous-traitants, prendre en compte les contraintes de calendrier de la formation, etc (Fig. 3).



Figure 3 : programmation des réunions et des contraintes de calendrier

Parmi les pièces mises à disposition des étudiants pour aborder la phase de dimensionnement de l'installation, on retrouve :

- les plans architecturaux (Fig. 4),
- les natures et emplacements des récepteurs électriques devant être alimentés,
- le cahier des clauses techniques particulières (CCTP),
- les normes et réglementations à respecter (d'après CCTP).

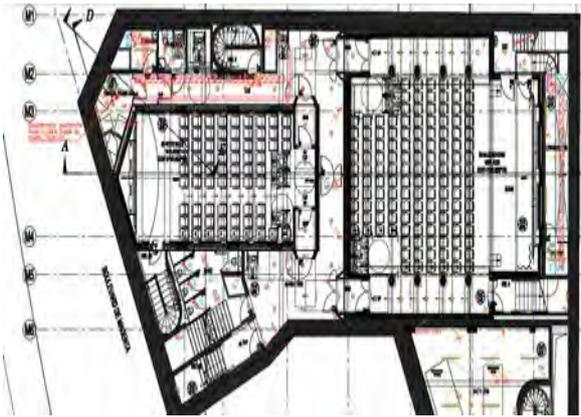


Figure 4 : schéma architectural du projet de rénovation

Une première visite (Fig. 5) sur site a eu lieu en début de projet et a permis aux étudiants et à l'enseignant de prendre la mesure du projet, d'obtenir certaines réponses aux questions qui sont apparues à la lecture des documents précités et de prendre conseil auprès des professionnels de BTB-Elec, notamment de M. Thétiot, chargé d'affaires.



Figure 5 : visite du site

S'en est suivie la première phase de dimensionnement de l'installation à proprement parlé, à savoir le bilan des puissances (Fig. 6) exécuté à l'aide d'un tableur et présenté sous deux versions :

- une résumé des principaux résultats,
- et une version détaillée.

Ce dernier a été réalisé pour plusieurs scenarii. En effet, ce cinéma occupant trois salles de projection (petite, moyenne et grande), il est possible d'y accueillir à la fois des projections mais aussi divers types de spectacles. Il est fondamental pour BTB Elec, et ce avant le lancement de la conception à proprement parlé sous CANECO BT, de connaître le scénario le plus « critique » en terme de puissance électrique absorbée.

REHABILITATION ET EXTENSION DU CINEMA LOUXOR BILAN DE PUISSANCES - TABLEAU DIVISIONNAIRE TGBT (T01)						
ID Ordre	DESIGNATION	IBRICE	Puissance Prévisionnelle (WVA)	Puissance Absorbée (WVA)	Puissance Prévisionnelle TOTALE	RESERVATION
T02	ALIMENTATION TD SOUS SOL (T02)	14,76	14,76	14,76	14,76	21,33
T04	ALIMENTATION TD ENTREE SOL (T04)	5,37	5,37	5,37	5,37	7,71
T05	ALIMENTATION TD REZ DE CHAUSSEE (T05)	21,27	21,27	21,27	21,27	30,83
T06	ALIMENTATION TD R+1 (T06)	6,60	6,60	6,60	6,60	9,57
T07	ALIMENTATION TD R+2 (T07)	5,27	5,27	5,27	5,27	7,60
T08	ALIMENTATION TD R+3 (T08)	12,12	12,12	12,12	12,12	17,49
T09	ALIMENTATION TD R+4 (T09)	6,54	6,54	6,54	6,54	12,33
T10	ALIMENTATION TD CUM R+4 (T10)	13,47	13,47	13,47	13,47	19,64
C03	COFFRET PETITE SALLE (Eclairage + PC)	2,30	2,30	2,30	2,30	3,30
C05	COFFRET MOYENNE SALLE (Eclairage + PC)	3,60	3,60	3,60	3,60	5,15
C06	COFFRET GRANDE SALLE (Eclairage + PC)	8,23	8,23	8,23	8,23	11,88

Figure 6 : extrait 1 du bilan des puissances

TOTAL PUISSANCE SCENARIO 1 - 3 PROJECTIONS NON FOISONNEE	352,13	TETRA	508,12
COEFFICIENT DE FOISONNAGE	0,80		
TOTAL PUISSANCE SCENARIO 1 - 3 PROJECTIONS FOISONNEE	281,70	TETRA	406,50
TOTAL PUISSANCE SCENARIO 2 - 2 PROJECTIONS + 1 EVENEMENT NON FOISONNEE	447,57	TETRA	645,84
COEFFICIENT DE FOISONNAGE	0,80		
TOTAL PUISSANCE SCENARIO 2 - 2 PROJECTIONS + 1 EVENEMENTS FOISONNEE	358,05	TETRA	516,67
TOTAL PUISSANCE SCENARIO 3 - 1 PROJECTION + 2 EVENEMENTS NON FOISONNEE	506,72	TETRA	731,19
COEFFICIENT DE FOISONNAGE	0,80		
TOTAL PUISSANCE SCENARIO 3 - 1 PROJECTION + 2 EVENEMENTS FOISONNEE	405,37	TETRA	584,95

Figure 6bis : extrait 2 du bilan des puissances

Les étudiants, qui ont attribué une trentaine d'heures à cette étude, ont présenté ce bilan de puissance à l'équipe enseignante puis au bureau d'étude de BTB Elec lors d'une réunion à Morangis. Il s'est agit d'une expérience très formatrice puisque la société BTB Elec a pris le temps de corriger les erreurs faites et de faire profiter les étudiants de son expérience du terrain.

Le travail de dimensionnement du TGBT dans le respect des normes NF C15-100 (décembre 2002), UTE C15-105 (juillet 2003) « Détermination des sections des conducteurs et choix des dispositifs de protection » et UTE C15-500 (juillet 2003) « Détermination des sections des conducteurs et choix des dispositifs de protection dans les logiciels de calcul » a alors pu commencer.

Celui-ci a été conduit de deux manières :

- de façon traditionnelle, à partir du bilan des puissances et en utilisant les différentes ressources mises à disposition par l'enseignant (normes, cours de distribution électrique, divers guides de dimensionnement dont le « Guide d'installation électrique 2010 » de Schneider Electric, catalogues constructeurs, ...)
- en utilisant l'outil de modélisation et de calculs CANECO-BT version V5.4 (Fig. 7 et 8) et ce, après une formation de 30 heures assurée par l'enseignant.

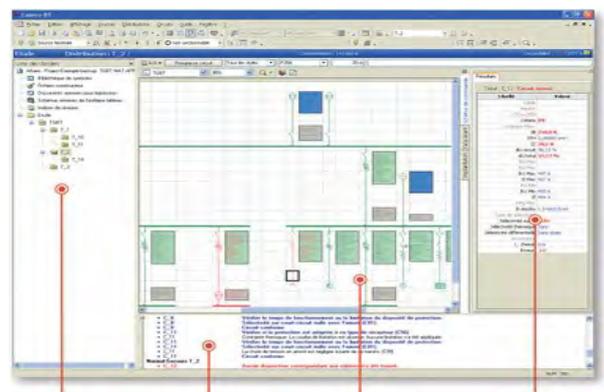


Figure 7 : interface de CANECO BT

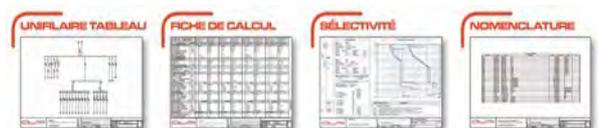


Figure 8 : démarche et étapes notes de calcul sous CANECO BT

Le moteur de calcul de *CANECO BT* détermine lui-même les matériels les plus économiques : protections, câbles, canalisations préfabriquées, appareillages de coupure, chemins de câbles...

Tout au long de cette phase de conception, un fichier partagé a permis le dialogue entre les acteurs du projet : les deux étudiants, l'entreprise partenaire BTB-Elec et l'enseignant.

Afin de valider ou modifier les choix matériels et l'implantation des constituants auxquels sont parvenus les étudiants, une visite chez le spécialiste des coffrets et tableaux électriques KRENDEL S.A., sous-traitant de BTB-Elec, a été organisée par les partenaires. Les notes de calculs de *CANECO BT* ont été revisitées. Les choix technologiques de certains constituants, la configuration du TGBT, les contraintes en termes d'implantation et de place ont été discutés.

La réalisation d'un TGBT et les règles de l'art spécifiques à ce domaine représentent une difficulté pour les étudiants. Afin de leur faciliter l'appropriation des connaissances nécessaires à une conception optimisée, BTB-Elec et son sous-traitant Krendel S.A. leur ont proposé une formation accélérée dans l'atelier d'assemblage de ce dernier (Fig. 9). Les deux étudiants ont ainsi effectué leur CCF n°3 dans ce cadre et ont réalisé une armoire du même type que celle dont ils avaient la charge, accompagnés en cela par les techniciens de l'entreprise. Les connaissances acquises leur ont ainsi permis de finaliser leur propres dimensionnement et choix de matériels pour le projet du cinéma. Pour des raisons de calendrier, ils ont présenté au jury final de l'épreuve de projet du BTS leur travail de réalisation du TGBT de 800A effectué chez Krendel S.A., celui-ci ayant pratiquement les mêmes contraintes que leur propre TGBT de 630A. Par la suite, un des deux étudiants a participé en CDD pendant l'été 2012 à la réalisation du TGBT et a ainsi pu finaliser le projet en réalisant l'ensemble des tâches nécessaires et négociées avec les partenaires.



Figure 9 : étudiants en immersion chez Krendel S.A.

Il est à noter également que le dossier de dimensionnement a été accompagné du dossier de validation auprès des organismes de contrôle (APAVE en l'occurrence), nécessaire pour la réception des travaux et la mise en service.

En conclusion, ce projet a permis aux étudiants d'acquérir de nouvelles connaissances et compétences professionnelles dans un secteur d'activité, la distribution électrique, qui est au cœur du métier d'électrotechnicien. Cette expérience, qu'ils ont su mettre en avant, leur a permis de s'insérer très rapidement sur le marché de l'emploi.

3. Réhabilitation d'une machinerie d'ascenseur

3.1. Présentation du site

Ce projet concerne la machinerie d'ascenseurs d'un immeuble mixte (habitations / bureaux) situé dans un arrondissement de l'ouest parisien. L'entreprise ALTAYS FRANCE ASCENSEURS (AFA), située à Vitry-sur-Seine, a la charge de la rénovation de ces quatre ascenseurs. Ce projet s'inscrit évidemment dans le vaste plan de rénovation de ce type d'équipement (Cf. normes, recueils, ouvrages et réglementations du secteur)⁷.

Selon la directive 95/16/CE, un ascenseur est un « appareil qui dessert des niveaux définis à l'aide d'une cabine qui se déplace le long de guides rigides et dont l'inclinaison sur l'horizontale est supérieure à 15 degrés ». Il est destiné au transport de personnes et/ou d'objets. Cette directive s'applique aux ascenseurs qui desservent de manière permanente les bâtiments et les constructions et leurs composants de sécurité. Elle définit les exigences essentielles de sécurité auxquelles doivent répondre les ascenseurs et leurs composants, lors de leur fabrication et avant leur mise sur le marché.

3.2. Déroulement du projet

Ce projet, en cours de réalisation, sera présenté par les deux étudiants qui en ont la charge à la session 2014 du BTS électrotechnique.

Il a été demandé aux étudiants de planifier le déroulement de leur projet (Fig. 10) en utilisant les outils logiciels *MindView*⁸ (logiciel de *Mind Mapping* professionnel) et *GanttProject*.



Figure 10 : capture d'écran de la carte mentale du projet réalisée avec MindView.

Une convention de « partenariat technologique » a donc été préalablement établie avec l'entreprise AFA

afin que les étudiants participent à la rénovation d'un des quatre ascenseurs. Celle-ci prévoit :

- d'informer les étudiants sur les métiers de l'ascensoriste,
- de leur fournir un certain nombre d'informations : notes de calcul d'une motorisation type (dimensionnement de la chaîne de traction), normes et réglementations en vigueur, particularité d'une rénovation, ...
- de réaliser l'installation et la mise en service d'un équipement et des organes de sécurité associés.

Le projet a donc débuté par une recherche documentaire relative aux normes et réglementations en vigueur. Cette recherche a suscité de nombreuses questions qui ont été consignées, classées et posées à l'entreprise spécialisée au cours de la première visite sur le site (Fig. 11), le lundi 03 Février 2014.



Figure 11 : première visite sur le site

Cette première visite a bien sûr été l'occasion pour l'un des responsables de l'entreprise AFA de présenter les principaux organes d'un ascenseur ainsi que les particularités de ce chantier. Un des quatre ascenseurs ayant déjà été déposé (il ne reste que l'enveloppe de la cabine sur le site) une présentation très détaillée des spécificités et caractéristiques des équipements utilisés dans ce type d'application a été faite par AFA aux étudiants avec l'ancien matériel (Fig. 12).



Figure 12 : ancien matériel démonté et expliqué aux étudiants

L'ancienne solution était basée sur la mise en œuvre d'une motorisation asynchrone de type Dahlander et d'un jeu de contacteurs. Le nouveau moteur sera alimenté après rénovation par l'intermédiaire d'un variateur électronique de vitesse (VEV).

La particularité de ce projet réside dans la démarche de reconstitution des étapes et de recherche des données de dimensionnement qu'ont à effectuer les étudiants. L'entreprise et l'enseignant (qui a du se pencher sérieusement sur les particularités du dimensionnement des constituants dans ce type d'application) disposent des réponses aux questions que vont se poser les étudiants. Cependant, alors que l'entreprise spécialisée utilise de nombreux abaques et les savoirs associés à son expertise dans le domaine, les étudiants devront, eux, retrouver les résultats par des calculs classiques et à partir des contraintes normatives et réglementaires.

Le déroulement des étapes de dimensionnement pourra toutefois s'appuyer sur le dossier réalisé par l'entreprise pour le premier ascenseur (déjà en cours de rénovation par l'entreprise) et les résultats intermédiaires qui seront produits par les étudiants pourront être confrontés à ce que l'entreprise a prévu pour cette nouvelle tranche du chantier. En effet, étant données les contraintes de calendrier, l'entreprise a déjà dimensionné et commandé ses constituants et appareillages afin d'être livré dans les temps.

Ainsi, la réalisation prévue en avril 2014 sur le chantier, pourra se faire en présence des étudiants qui seront alors amenés à mettre en œuvre l'ensemble des constituants (traction, commande, sécurité, mécanique) de l'ascenseur qu'ils auront dimensionné en compagnie d'un technicien de l'entreprise. Remarquons ici que le calendrier est ainsi cohérent avec celui de l'année scolaire (phases de conception et de réalisation) et donc avec les contraintes de l'épreuve de projet (revues de projet, soutenances).

4. Conclusions et perspectives

Ces expériences sont à mon avis des réussites et le bénéfice est évident pour toutes les parties impliquées dans de tels projets. Il me semble important de poursuivre dans ce sens et d'amplifier ce type de partenariat, ceci malgré les difficultés à trouver des entreprises qui acceptent de prendre le temps d'inclure dans leur planning des moments consacrés aux étudiants afin de leur présenter leur métier, ses contraintes, ses règles de l'art et les savoir-faire associés.

Nous listons ici les différents avantages constatés :

- l'implication et le sérieux des étudiants,
- les contraintes de projets plus en adéquations avec les objectifs pédagogiques du référentiel de formation,
- l'insertion professionnelle quasi-systématique (embauche en CCD ou période d'essai dès l'été qui suit l'examen du BTS),

- le bénéfice économique pour l'établissement scolaire sur le long terme (investissement de licences logicielles),
- l'utilisation des projets effectués dans ce cadre comme support aux exploitations pédagogiques conduites en classe (Ex. : exploitation de notes de calcul avec *CANECO BT* en TD de distribution de première année).

Rappelons tout de même qu'une contrainte importante pour les enseignants est celle de l'adaptation du calendrier du projet porté par l'entreprise à celui de nos jalons et différents CCF.

5. Remerciements

L'auteur remercie les étudiants qui ont eu et ont en charge les projets présentés ici, les entreprises qui ont accepté de jouer le jeu ainsi que les collègues, le chef des travaux et l'administration du lycée Jean Jaurès qui nous soutien chaque année notamment pour la rédaction des conventions de "partenariat technologique".

6. Références

- 1 « Repères pour la formation du BTS électrotechnique », chapitre « Epreuves de projet technique industriel : épreuve E5 »
- 2 BTB-Elec : adresse : 8, Avenue Gay Lussac, 91420 MORANGIS, Téléphone : 01.60.49.16.30, Courriel : btbelec@btbelec.fr, Site web: www.btbelec.com
- 3 Dossier sur le cinéma « Le Louxor » sur le site de la Ville de Paris : http://www.paris.fr/politiques/paris-et-le-cinema/cinemas-parisiens/le-louxor-renaissance-d-un-immense-cinema/rub_8359_stand_83020_port_19412
- 4 Association « Les amis du Louxor » : <http://www.lesamisdulouxor.fr/> et Cinéma le Louxor : <http://www.cinematouxor.fr/>
- 5 Logiciel CANECO BT : <http://www.alpi.fr/logiciels/caneco-bt.html>
- 6 Logiciel GANTT Project : <http://www.ganttproject.biz/>
- 7 AFNOR (ascenseurs) : <http://www.afnor.org/fiches/faq-reglementation/ascenseurs>
- 8 Logiciel MINDVIEW : <http://www.matchware.com/fr/products/mindview/>

La démarche de projet en STIDD

MarcGARCIA

Lycée Louis Armand
NOGENT SUR MARNE

Résumé : Cet article présente un exemple de projet réalisé dans le cadre du Baccalauréat STIDD, Dans un premier temps le contexte et le déroulement de cette épreuve est rappelé puis un des projets que nous réalisons au lycée est décrit. Ce projet concerne 4 élèves, leur travail à pour support une maison entièrement domotique labélisée BBC type "Kaufman & Broad ®"

Objectif du projet :

Le projet technologique est une phase d'apprentissage active qui regroupe plusieurs élèves (5 au maximum). Il permet à l'élève à partir de son travail individuel de :

- s'impliquer en étant actif face à une problématique posée, tout en mobilisant ses connaissances pour parvenir à y répondre,
- mettre en œuvre son sens créatif et sa volonté d'entreprendre,
- proposer des solutions à une problématique individuelle en lien avec une problématique globale regroupant les problématiques des autres élèves,
- concevoir et de réaliser un prototype ou une maquette permettant de valider certains de ses choix,
- développer un esprit de synthèse lui permettant de communiquer sur les choix effectués.

Il constitue une synthèse des apprentissages enseignés dans les disciplines technologiques de la série STI2D et permet d'utiliser les outils des disciplines générales - Français, mathématiques et anglais -.

La réalisation concrète n'est qu'un prétexte à la mise en œuvre d'une démarche que l'élève a déjà abordé au collège et retrouvera tout au long de ses études supérieures.

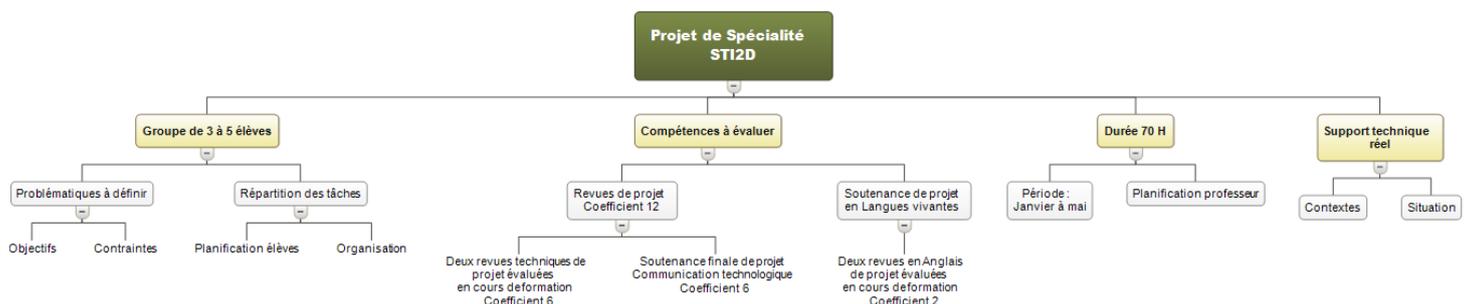
La qualité de la réalisation n'est en aucun cas un objectif de l'activité de projet en STI2D, en effet la filière n'est pas professionnelle.

Dans le cadre du projet de spécialité STI2D, la réalisation se limitera donc à :

- Une maquette (réelle ou numérique) qui est une représentation partielle d'un objet réel existant ou à concevoir. Elle permet d'en tester et valider certains aspects et/ou comportements :
 - maquette virtuelle ou visuelle en 2 ou 3D,
 - maquette fonctionnelle.
- Un prototype, qui désigne le premier exemplaire d'un produit industriel. Sa réalisation rentre donc dans la phase de la conception de produit, et permet d'effectuer des tests de validation fonctionnelle et/ou comportementale des solutions proposées.

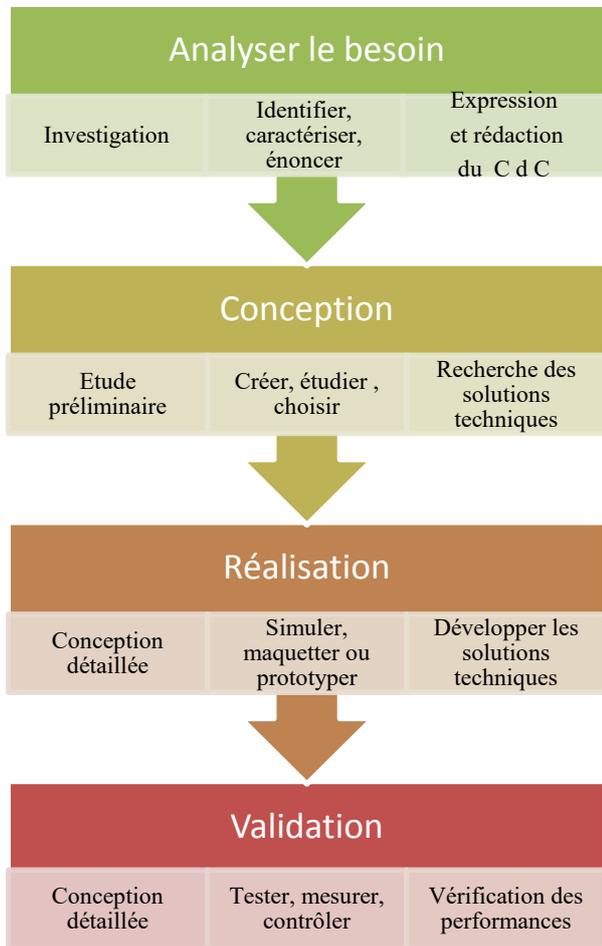
Choix du thème du projet :

Le projet technologique doit concerner la conception d'un produit. Il a pour objectif soit l'amélioration du point de vue du Développement Durable (efficacité énergétique ou éco-conception), soit la compétitivité du produit (ergonomie accrue, confort d'utilisation), et doit être en liaison avec la réalité, c'est à dire avoir une accroche véritable pour que l'élève puisse s'y accrocher.



Organisation temporelle du projet :

L'organisation temporelle du projet technologique doit suivre le processus décrit ci-dessous :



Ce processus est jalonné des deux revues technologiques en cours de formation, l'une après la phase de conception, l'autre suit la phase de validation.

La soutenance finale fait suite au projet, elle est organisée deux à trois semaines après la fin du projet.

Ce laps de temps permet à l'élève de rédiger un rapport de projet d'une dizaine de pages, qu'il viendra soutenir lors de la soutenance finale.

Exemple de projet :

Ce exemple est un des projets de spécialité Energie & Environnement qui sont proposés aux élèves du Lycée Louis Armand de Nogent sur Marne :

PROJET N°1 CONCERNANT UN GROUPE DE 4 ELEVES :

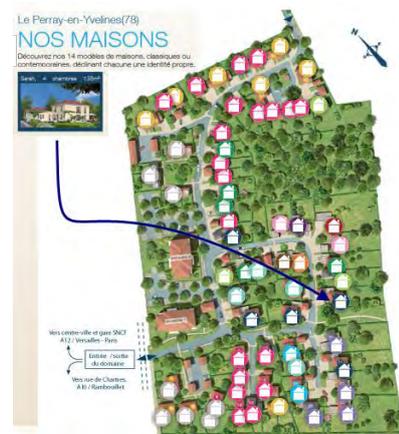
Etude de l'installation d'une maison entièrement domotique labélisée BBC type "Kaufman & Broad ®" sur un terrain situé en région parisienne.

Eléments du cahier des charges donnés aux élèves :

- Une société de construction veut mettre à son catalogue une maison type "Sarah" labélisée BBC entièrement domotisée, et décide de la mettre en œuvre sur le site de la forêt verte à Le Perray-en-Yvelines (78).



- La maison est prévue pour accueillir une famille de 5 à 6 personnes.
- La hauteur sous plafond moyenne de la maison est de 2,50 m.
- L'alimentation se fera par le réseau de distribution public au tarif bleu en option base pour particulier, la puissance souscrite sera de 9 kVA.
- L'implantation géographique du lieu est donnée ci dessous :



- Les plans architecturaux de la maison sont donnés page suivante :

Le Perray-en-Yvelines(78)
VIE PRATIQUE

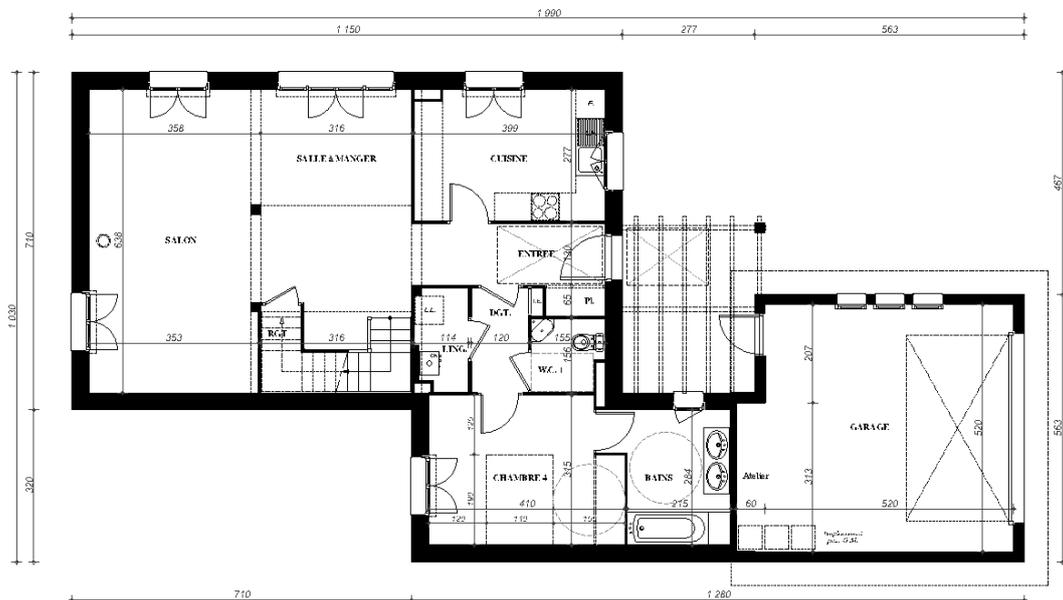
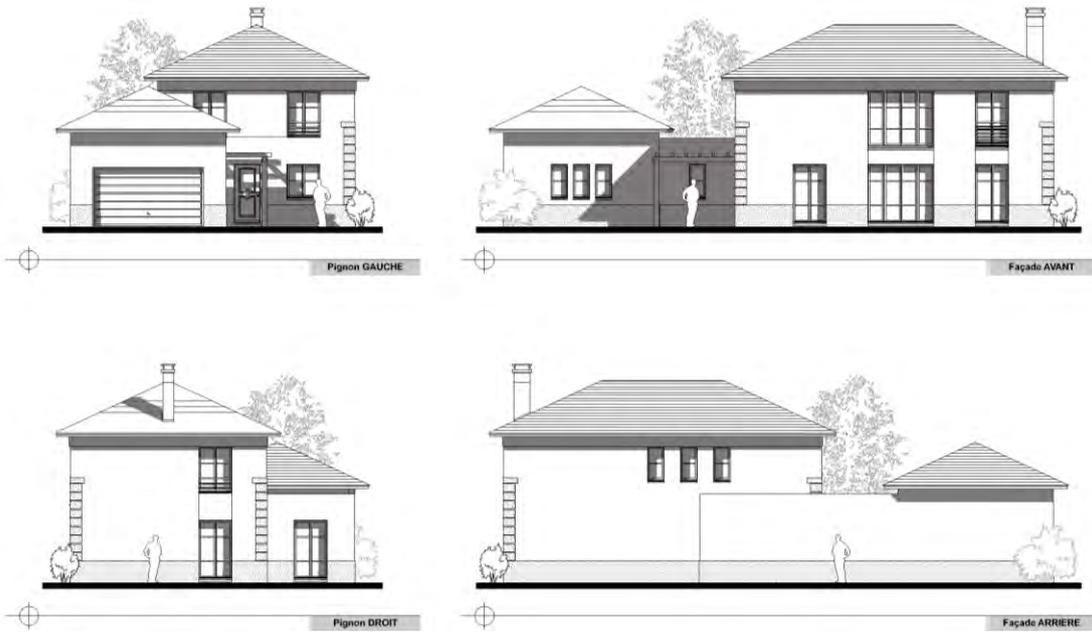
Plus de proximité

À DEUX PAS

- Écoles maternelle et élémentaire
- Centre commercial
- Stade, complexe sportif
- Médiathèque

TRANSPORTS

- Bus (ligne 8 Veolia) à 100 m pour rejoindre le centre-ville ou la gare SNCF
- Gare SNCF Le Perray (Paris Montparnasse en 46 minutes)
- Accès rapide : A10, A12, A13 par la N10



Analyse des éléments du cahier des charges par les élèves :

Après une phase d'investigation et de recherche, les élèves composant le groupe ont établi une carte heuristique de leur projet, représentée ci dessous, grâce au logiciel Mindview.

A partir de cette carte, ils ont défini la répartition des tâches suivante :

Elève 1

Modélisation thermique de la maison et de son contexte ; choix d'une solution d'isolation performante associée à une ou plusieurs solutions de chauffage pertinente permettant de respecter les contraintes de la réglementation thermique en vigueur et tout en valorisant l'environnement proche de la maison.

Elève 2

Choix d'une solution technique permettant la production de l'eau chaude sanitaire. Cette solution devra permettre la valorisation de l'environnement proche de la maison.

Modélisation des ouvrants afin de permettre l'optimisation de l'apport de solaire passif tout en conservant un confort d'été suffisant, associé à la mise en place d'un système d'éclairage performant permettant d'optimiser l'efficacité énergétique.

Elève 3

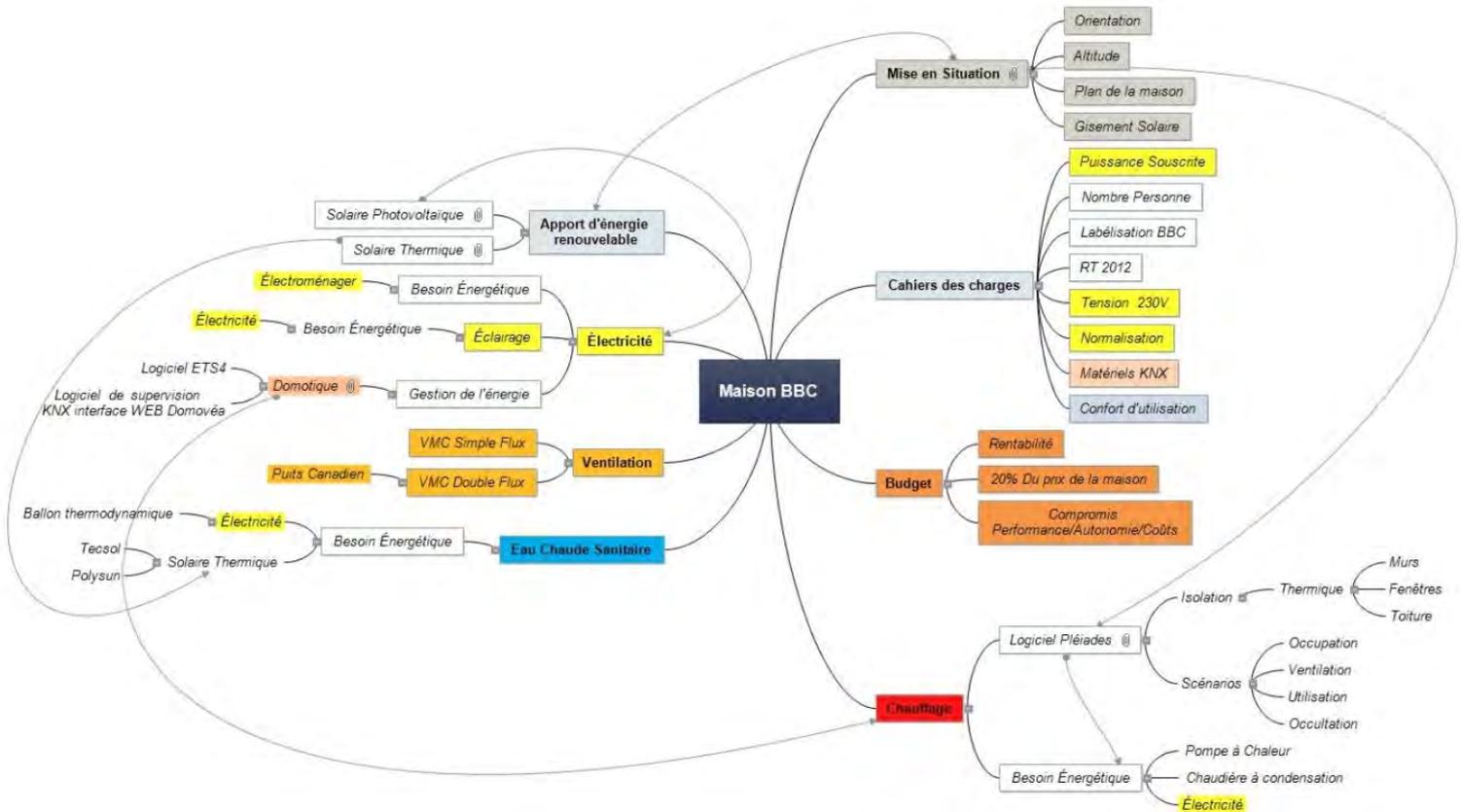
Etude technico-économique de la mise en place sur la maison d'un apport énergétique renouvelable sous forme électrique ;

Détermination des besoins en énergie électrique, prise en compte des besoins électriques et dimensionnement du tableau divisionnaire de la maison.

Elève 4

Mise en place d'une solution domotique permettant la gestion de l'éclairage naturel et artificiel, le pilotage du chauffage, dans le but d'optimiser la consommation énergétique du lieu ;

Mise en place d'une solution domotique permettant d'assurer le pilotage centralisé et à distance de la maison, ainsi que son suivi de consommation énergétique.



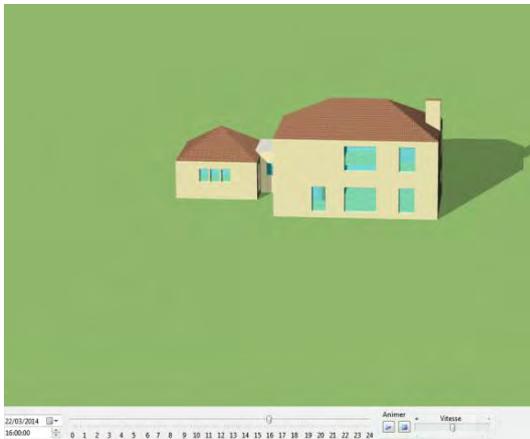
Carte heuristique du projet (Mindview)

DETAIL DU TRAVAIL MIS EN PLACE PAR L'ELEVE N°1:

La modélisation thermique dynamique (STD) de la maison dans les conditions exactes d'implantation est réalisée par l'intermédiaire du logiciel Pléiades de la société Izuba.

Ce logiciel permet de modéliser un bâtiment dans son contexte réel par le biais de la saisie du plan, en tenant compte de la situation géographique (zone RT, altitude, masques proche et lointain), et de la composition des parois.

Un rendu en trois dimensions permet de voir les effets des ombres portées sur le bâtiment, ainsi que le facteur de lumière du jour utilisables dans les pièces.



Ce logiciel permet aussi de réaliser des compositions de parois complexes à partir de la base de données EDIBATEC qui comprend l'ensemble des compositions de matériaux existant sur le marché.

Caractéristiques thermiques					Données RT	
Composants	T	cm	kg/m ²	λ	R	
Enduit extérieur	1.5	26	1.150	0.01		Extérieur ↓ Intérieur
Brique à alvéoles STURM BIOMUR 30	30.0	229	0.146	2.05		
Laine de roche	20.0	5	0.041	4.88		
Lame d'air > 1.3 cm	1.5	0	0.094	0.16		
Placoplatre BA 13	1.3	11	0.325	0.04		
Enduit plâtre	1.0	15	0.350	0.03		
Total		55.3	286		7.17	
Ponts thermiques globaux intégrés						
Ponts thermiques intégrés linéaires ou ponctuels						
Composants	T	Entraxe (m)	ψ	nb/m ²	X	W/K/m ²
Profil 1 - 2	1.00	0.050				0.05
						0.05

De plus il permet de mettre en place des générateurs de chaleur ou de froid existant sur le marché et et sur lesquels on peut définir des scénarios d'utilisation (température désirée heure par heure ceci sur une année complète)

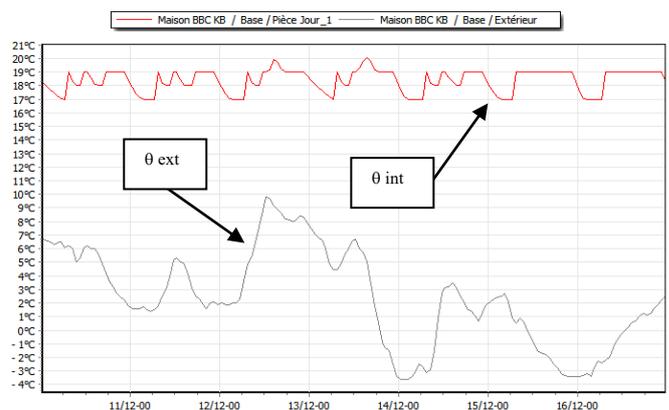
Sur ce logiciel, on peut aussi définir, pour que la simulation thermodynamique de la maison, soit plus proche de la réalité des scénarios :

- d'occupation journalière en pourcentage ;
- d'occupation annuelle pour tenir compte des vacances ;
- de température intérieure désirée ;
- d'occultation des fenêtres ;
- de ventilation des locaux...

Après simulation, l'élève a obtenu un résultat de 38 kWh/m² pour le STD

On peut voir que l'on est bien en dessous des objectifs fixés par la labelisation BBC (50 kWh/m²). Si l'on veut détailler davantage, le logiciel peut générer des graphiques de fonctionnement de la maison, comme par exemple :

- température intérieure sur l'année,
- Température et puissance thermique nécessaire au fonctionnement sur la semaine la plus froide,
- Zone de BRAGGER qui définit la température de confort sur l'année ;
- Diagramme de Sankey.....



Evolution des températures intérieures et extérieures pour la semaine la plus froide

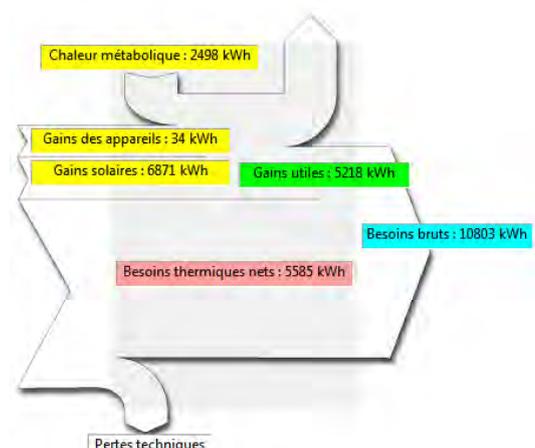


Diagramme de Sankey

DETAIL DU TRAVAIL MIS EN PLACE PAR L'ELEVE N°2:

Modélisation d'éclairagisme:

L'élève a réalisé une modélisation de l'éclairagisme de la maison par le biais du logiciel Pléiades afin de définir le facteur de lumière du jour sur les différentes pièces de la maison, ceci sur une année complète d'utilisation.

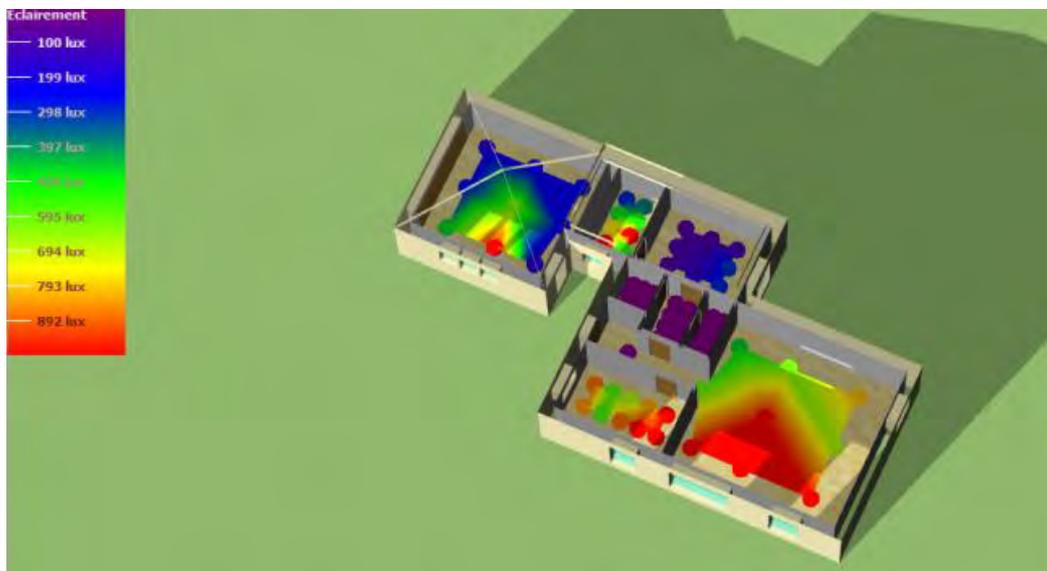
L'élève a ensuite modélisé les scènes d'éclairages des différentes pièces de la maison sous le logiciel gratuit DIALUX:

- afin de connaître le besoin en lumière artificielle,

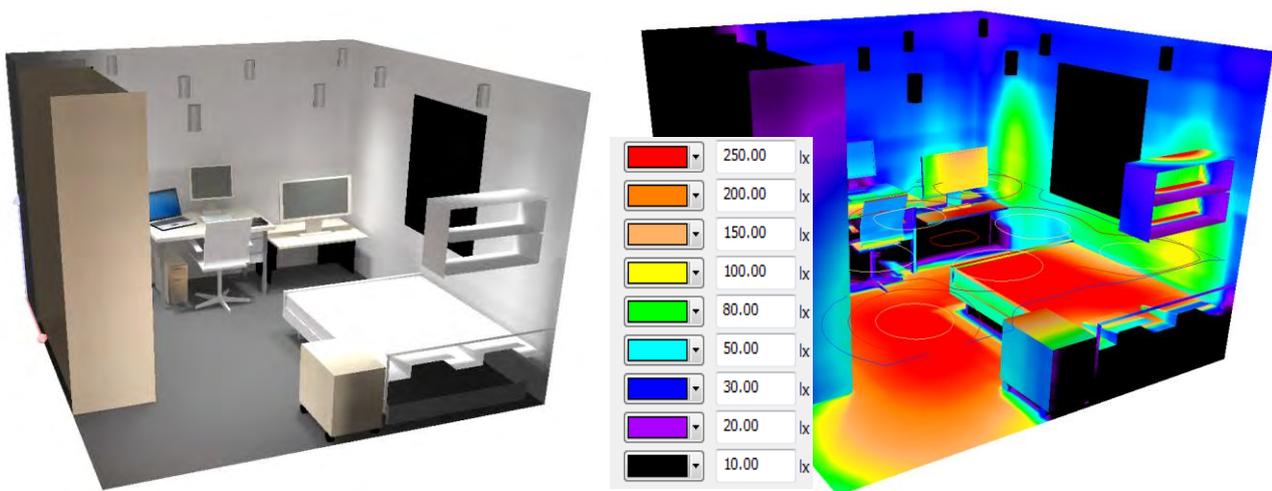
- afin de déterminer la technologie de luminaire à employer pour obtenir une utilisation alliant confort et efficacité énergétique.
- afin de définir les modes de commandes des luminaires.

Par exemple, ici la modélisation d'une des chambres de la maison permettant de valider le choix de la technologie LED.

Après avoir réalisé la modélisation des pièces, l'élève va devoir évaluer le besoin énergétique annuel du à l'éclairage des pièces de la maison, et va devoir aussi évaluer le gain énergétique du à ces choix.



Luminosité naturelle de l'habitation sur site (en collaboration avec l'élève 1)



Modélisation de l'étude de l'éclairage de la chambre

Simulation de production d'eau chaude sanitaire :

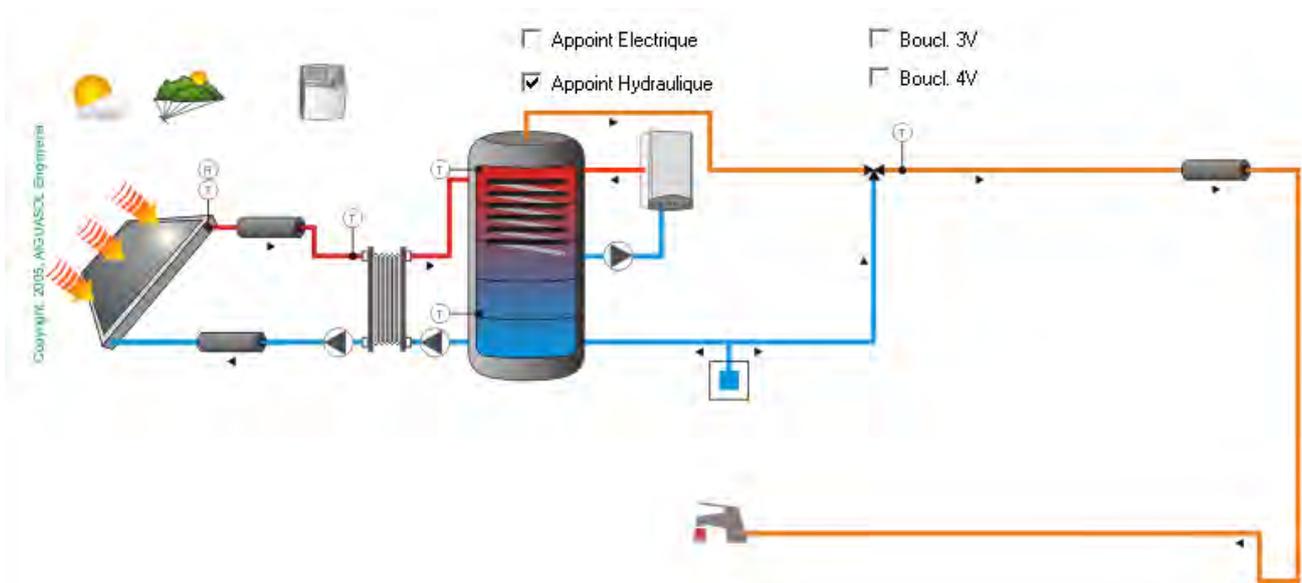
L'élève doit choisir une solution technique permettant la production de l'eau chaude sanitaire qui permet de valoriser l'environnement proche de la maison.

Deux solutions ont été envisagées par l'élève :

- Un ballon thermodynamique installé dans le garage exploitant les calories de cet espace tampon simulé par le biais d'une feuille de tableur Excel ;

- Des panneaux solaires thermodynamiques installés sur le toit du garage simulés par l'intermédiaire du logiciel TRANSOL version démo.

Cette dernière solution représentée ci-dessous lui a permis de définir la structure de production d'ECS, ainsi que le profil d'utilisation d'ECS annuel, de procéder à des choix technologiques (ici des capteurs thermique à ailettes sous tubes de la marque VIESMANN placés sur le toit du garage associés à un ballon à stratification de 300 l.



Structure de l'installation d'eau chaude sanitaire (ECS)

(a)

(b)

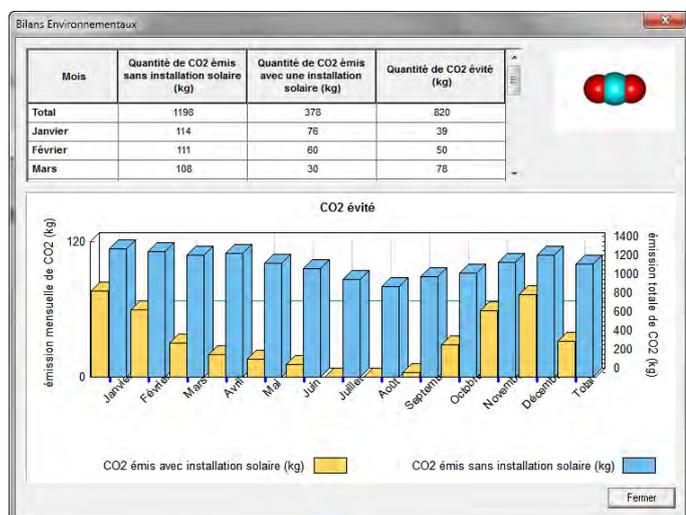
(c)

Etude de la production d'ECS avec capteurs thermiques solaires

(a) définition du lieu, (b) définition du profil d'utilisation, (c) choix du capteur solaire

Résultats énergétiques du système solaire thermique

[kWh]	Rad. sol. incidentes	Besoins nets	Besoins bruts	Apport des appoints	Conso. appoints	Production capteurs	Apport sol. à la conso.	Frac. sol. ECS
Janvier	415	516	588	408	390	204	199	34
Février	497	502	571	326	312	266	259	45
Mars	781	468	559	162	155	403	392	70
Avril	888	471	564	106	101	481	468	83
Mai	982	428	520	84	80	441	429	83
Juin	1 081	405	494	58	55	444	433	88
Juillet	1 175	348	449	0	0	476	464	103
Août	1 073	305	412	0	0	425	413	100
Septembre	858	361	457	24	23	432	420	92
Octobre	663	391	475	159	152	315	307	65
Novembre	439	454	528	321	306	206	201	38
Décembre	385	487	558	392	374	177	172	31
TOTAL	9 236	5 137	6 175	2 041	1 948	4 270	4 158	67



Bilan carbone de l'ECS

Cette solution permet d'amener 67 % d'énergie gratuite et d'éviter une production de 820 kg de CO2 par années d'utilisation. L'appoint sera effectué par le générateur de chaleur choisi par l'élève 1.

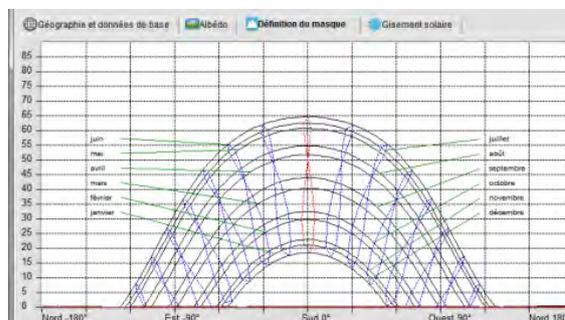
DETAIL DU TRAVAIL MIS EN PLACE PAR L'ELEVE N°3:

Mise en place d'un apport d'énergie renouvelable sous forme électrique :

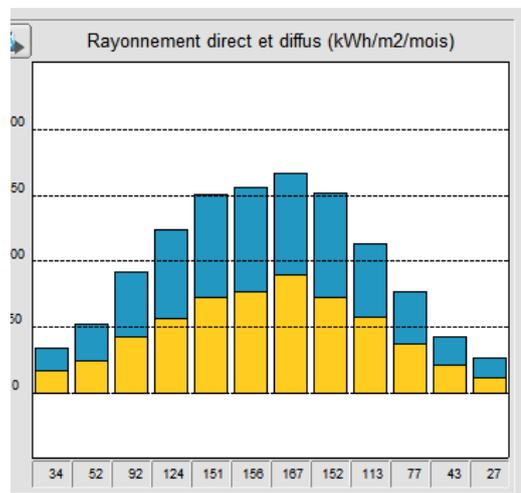
L'élève doit faire une étude technico-économique de la mise en place sur la maison d'un apport énergétique renouvelable sous forme électrique. Cette étude a été faite par le biais du logiciel Archelios qui permet de tenir compte des masques proches et lointains, de réaliser le choix du matériel composant une installation photovoltaïque (panneau solaire, onduleur, câbles...) et de faire une étude économique de l'installation.

Détermination des besoins en énergie électrique et dimensionnement du tableau divisionnaire de la maison :

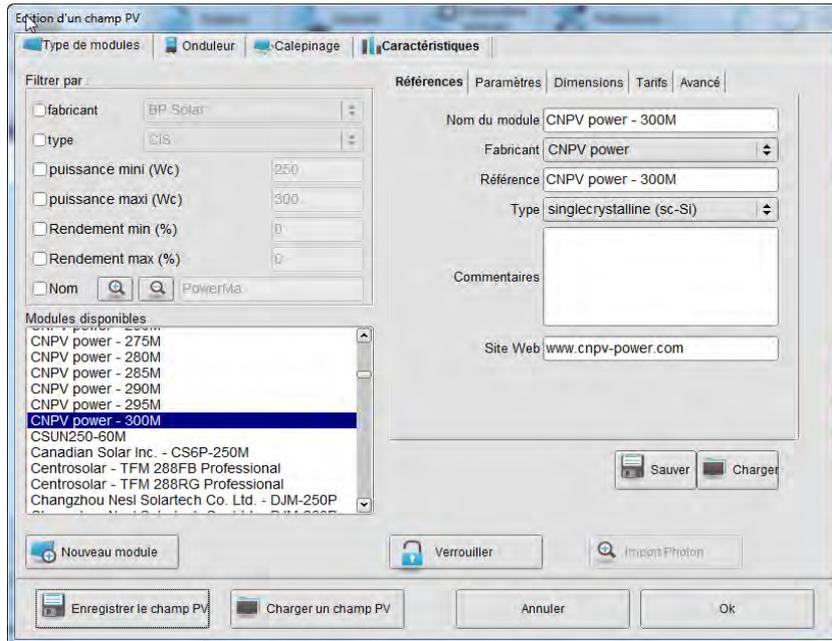
L'élève a utilisé le logiciel Archelios pour définir un profil d'utilisation de l'énergie électrique dans la maison, afin de voir si la maison avec l'installation des panneaux photovoltaïque a une balance énergétique positive sur l'année.



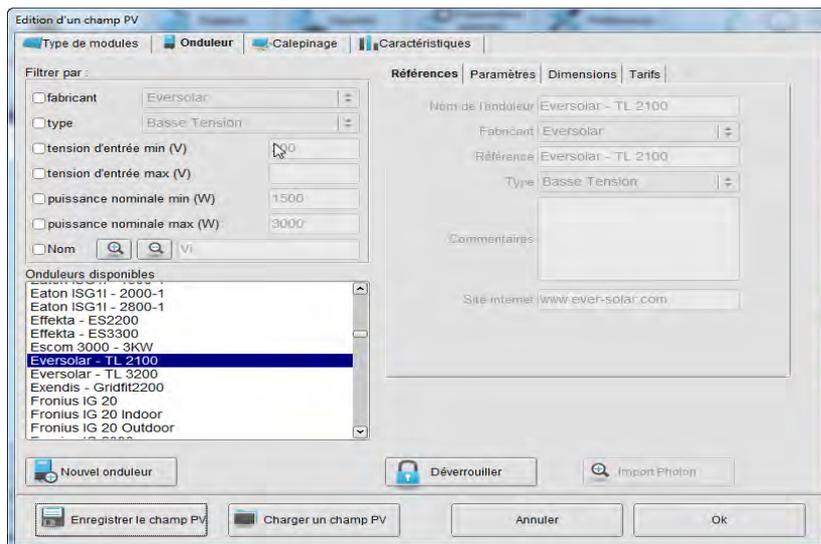
Détermination de l'ensoleillement



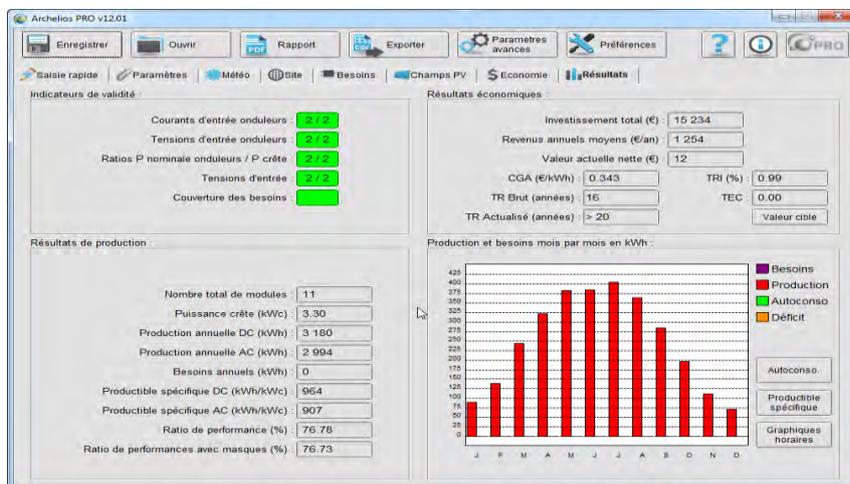
Détermination du gisement solaire



Choix des panneaux photovoltaïques

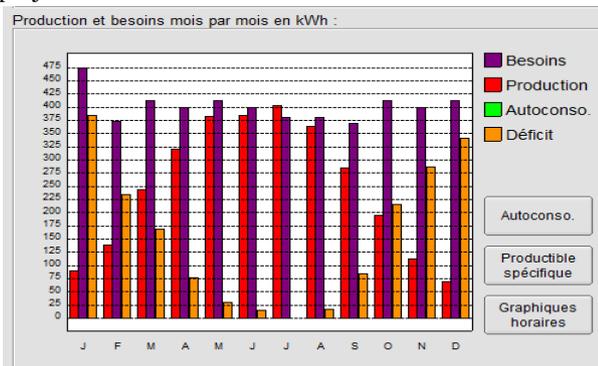


Choix de l'onduleur



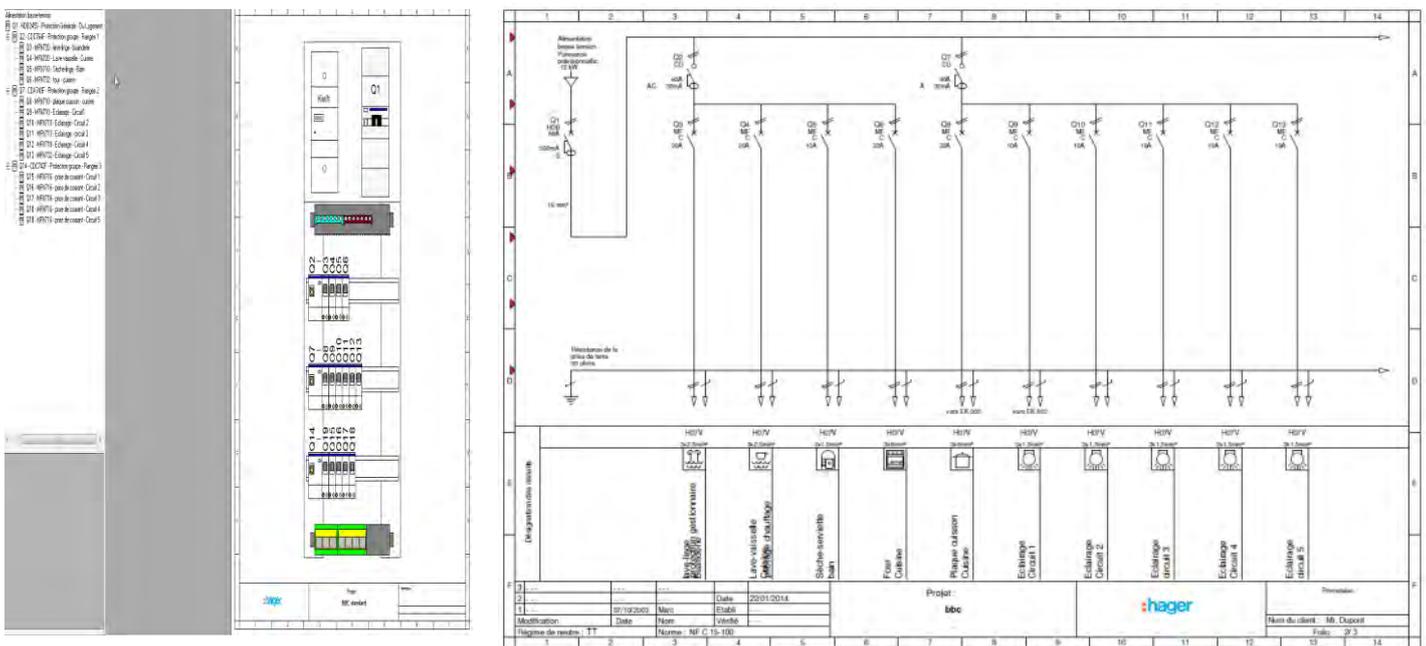
bilan global des panneaux photovoltaïques

On peut voir sur le graphique ci dessous que la balance énergétique n'est pas positive à ce stade du projet.



En effet pour le moment, le profil d'utilisation n'a pas incorporé les choix technologiques effectués par l'élève 2 sur les lampes et sur le mode de production de l'ECS.

Par contre cela a permis à l'élève de définir la structure du tableau divisionnaire de la maison. Cette construction a été faite à l'aide du logiciel 123 schéma de la société Hager comme le montre les documents ci-page suivante :



Structure et schéma du tableau divisionnaire

DETAIL DU TRAVAIL MIS EN PLACE PAR L'ELEVE N°4:

Mise en place d'une solution domotique dans le but d'optimiser la consommation énergétique du lieu :

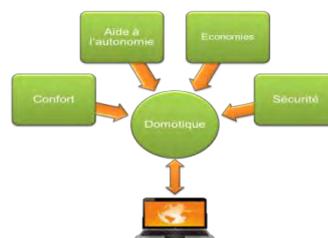
L'élève a mis en place une solution domotique basée sur la technologie KNX, technologie multi-constructeur;

- pour la gestion de l'éclairage des différentes pièces avec utilisation de commande centralisée avec mise en place de capteur. Par exemple un capteur de luminosité présence sera mis en place sur le séjour ;
- pour la commande des ouvrants (volets et stores) dans le but d'améliorer le confort d'été avec adjonction de capteurs de température dans les pièces exposées au sud ;

- pour la gestion centralisée du chauffage avec possibilité d'intervenir à distance.

Le prototypage partiel des pièces est réalisé conjointement avec l'élève n°3 par le biais d'une maquette fabriquée sur l'établissement représentant une maison, mais comportant des parties opératives réelles (éclairage, volets roulant, PAC, radiateur fil pilote, etc...).

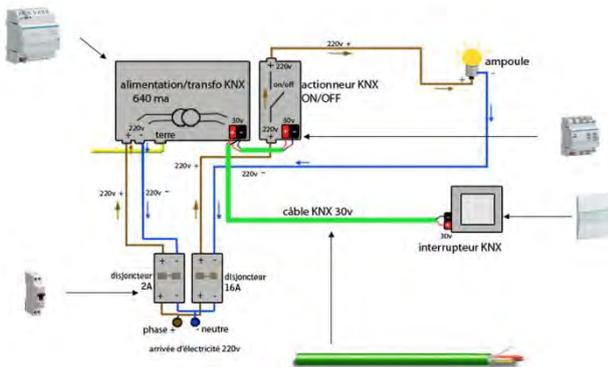
La programmation est faite à l'aide du logiciel ETS4 lite commercialisé par l'association KONNEX regroupant les sociétés fabricant du matériel KNX



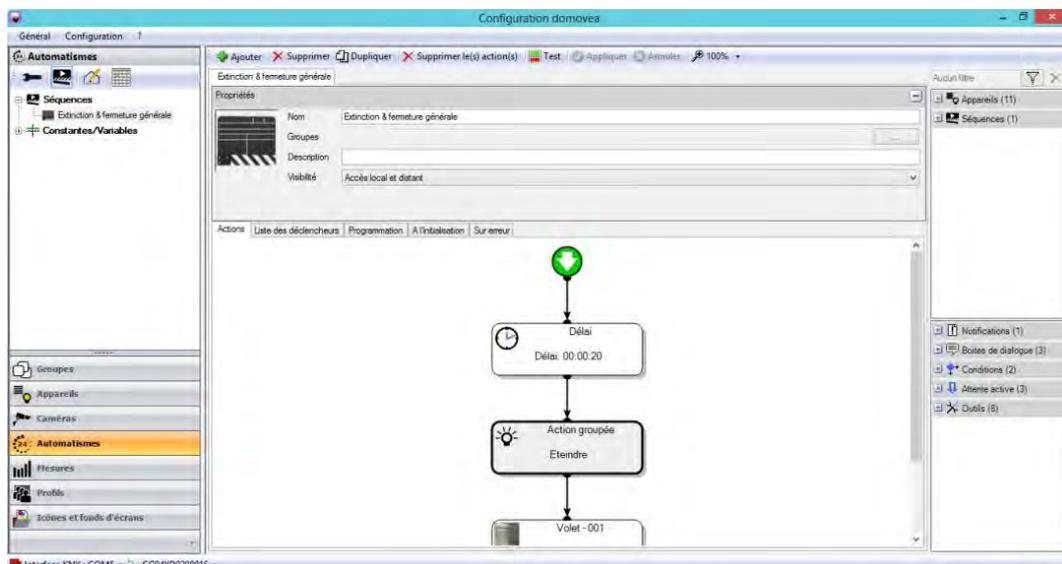


Mise en place d'une solution domotique permettant d'assurer le pilotage centralisé et à distance de la maison, ainsi que son suivi de consommation énergétique :

L'élève a mis en place un serveur WEB IP / KNX embarqué dans le tableau de répartition de la maison et qui vient s'interfacer avec l'ensemble du matériel KNX programmé sur l'habitation. Ce serveur est programmé grâce au logiciel DOMOVEA de la société Hager, compatible avec tous les fabricants de matériel KNX, et qui agit sur les adresses programmées par ETS4. Il permet entre autre :



- de centraliser les différentes commandes sur un écran de PC ou sur une tablette tactile,
- d'agir sur des zones de la maison par le biais de commande groupées ;
- de gérer des caméras de surveillance simplement ;
- d'assurer un suivi énergétique par le biais de compteur intégrée dans le gestionnaire d'énergie KNX installée sur la maison ;
- de permettre le pilotage à distance soit par tablette connectée en Wifi, soit par Smartphone par le biais du réseau GPRS.



Configuration d'une séquence d'extinction totale des lampes et volets roulants depuis superviseur



Page d'accueil de la supervision



fenêtre de visualisation comptage d'énergie

Retro-engineering : un exemple de démarche pédagogique ?

H. BEN AHMED, F. OUCHET, S. GARDETTE, R. LE GOFF LATIMIER

ENS Rennes, Département Mécatronique (benahmed@ens-rennes.fr)

Résumé : Dans cette contribution, il s'agit de partager notre expérience accumulée depuis 8 ans et de décrire un support pédagogique que nous avons mis en place au Département Mécatronique de l'ENS Rennes dans le cadre des enseignements par projet. Ce support est basé sur l'approche par Reverse Engineering d'objets mécatroniques industriels et commercialisés. L'approche proposée consiste en une analyse scientifique et technologique réalisée par des élèves de 1^{ère} année (niveau L3) sur des objets existants et devant mener à la compréhension des phénomènes physiques mis en œuvre et à la justification partielle des choix technologiques effectués. Le but de cet article est de décrire cette approche, le modèle d'encadrement pédagogique adopté et les modalités d'évaluation des élèves. A titre d'illustration, nous donnerons également quelques exemples de supports utilisés et les travaux associés effectués par les élèves.

1. Introduction

L'enseignement par projet semble être une voie incontournable de l'enseignement aujourd'hui. Ce concept d'enseignement par projet existe dans de nombreuses écoles et universités de l'enseignement supérieur mais la mise en pratique diffère largement selon les établissements. L'École Normale Supérieure de Rennes (évolution de l'Antenne de Bretagne de l'ENS Cachan au 1^{er} janvier 2014) propose dans le cursus du département mécatronique une formation par projet déclinée selon plusieurs modules.

Les élèves intègrent l'ENS Rennes principalement à l'issue d'un cycle préparatoire aux grandes écoles (concours ouvert aux filières PSI et PT) ou sur dossier pour tous les élèves justifiant au moins d'un niveau équivalent à un L2. Tous les élèves suivent pendant les deux premières années un double cursus mécanique et ingénierie électrique chacun sanctionné par un diplôme universitaire de L3 et M1. La troisième année consiste principalement à la préparation du concours externe de l'agrégation de sciences industrielles de l'ingénieur (délivrant un diplôme de M2 mention Formation à l'Enseignement Supérieur). Au cours de leur quatrième année, les élèves sont essayés dans les universités et grandes écoles françaises et européennes afin de choisir leur spécialité de recherche (M2 avec stage de recherche) et continuer, pour la majorité d'entre eux, leurs études du troisième cycle (doctorat).

L'apprentissage de la mécatronique et plus généralement des sciences technologiques permet facilement de rendre l'élève acteur de leur formation. De nombreux objets technologiques alliant mécanique et électricité sont habituellement utilisés par nos élèves

cherchant naturellement à comprendre et reproduire leur fonctionnement.

La formation proposée répond à la problématique suivante : quelles sont les compétences requises pour modéliser fidèlement le comportement, concevoir et dimensionner des objets de la mécatronique. Dès la première année du cursus mécatronique (existant depuis 2006-2007), l'élève est acteur de son savoir et doit mettre en œuvre ses compétences dans plusieurs modules de projet.

Au cours du premier semestre de L3 (S5), l'approche par projet est exclusivement portée sur l'étude de systèmes industriels existants par le module « Analyse de Systèmes Mécatroniques » (ASM). Le second semestre de L3 (S6) est l'occasion d'acquérir les techniques de conception et de faire de premières réalisations dans le module « Conception d'un Composant Mécatronique » (CCM). Les deux semestres de l'année de M1 permettent d'approfondir la conception et réalisation dans le module « Conception d'un Système Mécatronique » (CSM).

Ces trois modules adoptent une démarche progressive à la fois en termes d'autonomie des élèves, de complexité des notions abordées et d'étendue du travail demandé.

Ce papier présente principalement le premier module-projet dénommé « ASM » pendant lequel les élèves étudient, analysent et modélisent le comportement d'un système complet industriel et commercialisé.

2. Objectifs pédagogiques

Les différentes formations dont sont issues nos élèves (CPGE et formations universitaires) apportent toutes les bases de sciences de l'ingénieur nécessaires à la compréhension des concepts fondamentaux. Des disparités existent sur les élèves recrutés sur formations universitaires (pour la plupart exclusivement orientées électricité ou mécanique) ou sur la filière PT (jusqu'à présent majoritairement axée sur la mécanique).

Le fil conducteur de cette UE est de faire découvrir à tous les élèves le concept de mécatronique : étudier un même objet aussi bien sous ses aspects mécaniques et électriques. La compréhension du fonctionnement du système requiert des notions fondamentales telles que l'énergie, le signal, la physique, le contrôle, la fabrication, les matériaux...

Le premier objectif est de permettre aux élèves d'acquérir une certaine autonomie intellectuelle et organisationnelle : ils décident de la démarche à suivre, de la nature et de l'étendue des caractérisations sur le système mécatronique. Dans la pratique, ils avancent des hypothèses puis les valident ou de les infirment par des simulations, des calculs simplifiés ou des expérimentations.

Le second objectif concerne la recherche d'informations techniques sur les constituants internes du système et la validation de leurs caractéristiques en regard des performances du système complet. Cette phase de recherche technique permet également la comparaison du système étudié par rapport à ses concurrents.

Le troisième et dernier objectif est le partage et le transfert des connaissances acquises. Le travail réalisé, les résultats obtenus et la démarche expérimentale sont synthétisés dans un rapport technique dont le nombre de pages est volontairement limité puis par une soutenance orale devant un public d'élèves et un jury.

3. Modalités de mise en œuvre

Le module se déroule sur neuf séances de quatre heures chacune, les élèves ont aussi la possibilité de manipuler en dehors des créneaux initiaux.

La première séance est consacrée à la présentation du fonctionnement de cette UE, de ses objectifs et des modalités d'évaluation des élèves. Lors de cette première séance, les objets ou supports sont succinctement présentés aux élèves. Chaque binôme se positionne sur un support souhaité (ils sont tous différents) en concertation avec ses collègues en cas de « conflits ».

Les supports sont alors remis aux élèves ainsi que la documentation technique éventuelle. Notons à ce stade que les objets sont nécessairement commerciaux et en vente au « grand public ». Les documentations sont celles du constructeur. Aucun document de type « texte de TP » n'est remis aux élèves.

L'élève réalise ses expérimentations sur le plateau technique du département en relation avec l'équipe pédagogique (composée d'enseignants et d'enseignants-chercheurs) et le support technique (ingénieurs et techniciens du département). L'élève a à sa disposition du matériel de caractérisation, de conception et de prototypage en électricité/électronique et en mécanique.

Au premier abord, la liberté opérationnelle déroutait grandement les élèves, habitués à manipuler dans le cadre d'expérimentations guidées. L'encadrement de ces séances mérite ici d'être précisé. En effet, il ne s'agit pas d'un encadrement de type stage mais plutôt d'une assistance scientifique et technique. Les enseignants sont présents tout le temps des séances. L'initiative est laissée aux élèves. La proposition d'une problématique à identifier/mesurer, l'identification des paramètres d'intérêt, le choix de la méthode de mise en évidence (modélisation formelle, numérique ou expérimentale), le protocole de mesure, le besoin en matériel sont laissés sous la responsabilité des élèves. Les enseignants corrigent, formulent des questionnements, voire suggèrent des orientations.

L'aspect organisationnel est également laissé aux élèves. Ces derniers doivent définir pour chaque séance le programme à réaliser et les objectifs à atteindre. Ils doivent également anticiper les besoins en matériel et en instrumentation. Les enseignants corrigent, si besoin, leurs choix notamment en termes de pertinence mais aussi en termes de faisabilité technique ou économique.

En dehors des séances prévues, les élèves peuvent échanger sur la plateforme pédagogique de l'école¹ construite autour d'un Moodle. Ces échanges sont l'occasion de formaliser une demande de matériel spécifique à l'étude ou de présenter leur démarche expérimentale et les résultats obtenus en vue d'obtenir un retour ou une explication de la part des enseignants.

Les systèmes peuvent être réutilisés plusieurs années de suite et les rapports des années précédentes sont alors mis à disposition sur cette plateforme pédagogique. Les élèves peuvent alors réutiliser les résultats dans leurs études mais aussi faire preuve

¹ <http://edu.ens-rennes.fr/>

d'originalité dans leurs expérimentations afin de se démarquer des résultats déjà établis.

4. Modalité d'évaluation

L'évaluation est basée sur trois grands axes évaluant respectivement les trois objectifs précédemment présentés :

- Une note de contrôle continu est attribuée sur la méthodologie d'analyse du système : la démarche expérimentale, la prise d'initiative et l'autonomie des binômes sont sanctionnés par l'équipe pédagogique.

- Le rapport rédigé par chaque binôme présente chaque système, les protocoles d'études et les résultats obtenus. Ils sont relus par plusieurs enseignants et enseignants-chercheurs dont certains n'ont pas participé à l'encadrement des séances ; ce regard extérieur se base sur les critères classiques de présentation d'analyse et de présentation des résultats scientifiques. Les explications fournies dans le rapport doivent être synthétiques et permettre de comprendre le fonctionnement du système.

- Les élèves soutiennent leur travail et répondent aux questions devant un jury et un public constitué d'autres personnels du département et éventuellement d'autres élèves. Cet exposé dure environ quinze minutes et est suivi d'une période d'échange avec le jury et le public pendant environ quinze minutes. L'évaluation porte principalement sur la forme de la présentation et la pertinence des réponses aux questions du jury. Les évaluations du rapport et de la présentation sont basées sur :

- Démarche scientifique d'analyse (modélisation, expérimentation avec la précision des objectifs et l'analyse de résultats obtenus)
- Justification du contexte fonctionnel de l'objet et positionnement par rapport à d'autres solutions existantes
- Mutli-disciplinarité, voire Inter-disciplinarité
- Analyse suffisante des points d'intérêt

5. Exemples de supports

Dans ce qui suit, afin de donner un aperçu du travail réalisé par les élèves et les objets supports utilisés, nous donnerons de manière non exhaustive quelques exemples de travaux, extraits des rapports de certains élèves.

5.1. Aspirateur ROOMBA

L'aspirateur Roomba est un robot autonome capable de nettoyer le sol sur une certaine zone. Il a été conçu en 2002 et s'est démocratisé assez rapidement en quelques

années, avec plusieurs millions d'exemplaires vendus dans le monde.



Figure 1 : Photo du Roomba

Sur la figure 2 sont montrés le système d'entraînement, le dispositif de nettoyage, l'accumulateur ainsi que certains capteurs. Cela correspond à une première analyse réalisée par les élèves des diverses fonctions présentes dans le Roomba : références des composants, caractéristiques nominales, principe physique de fonctionnement, réalisation/matériaux,....

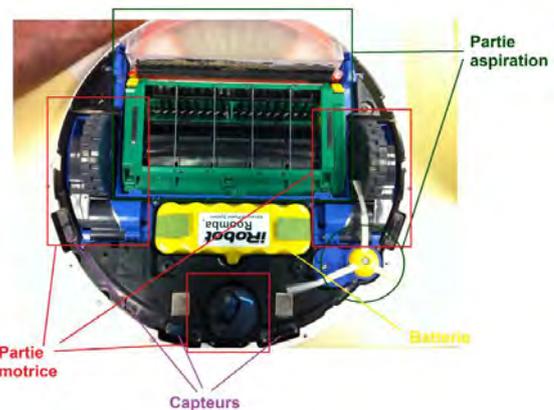


Figure 2 : Photo du dessous du Roomba

Le Roomba est un véritable système mécatronique intégré. Sur la figure ci-dessous est représentée la chaîne d'information et d'énergie.

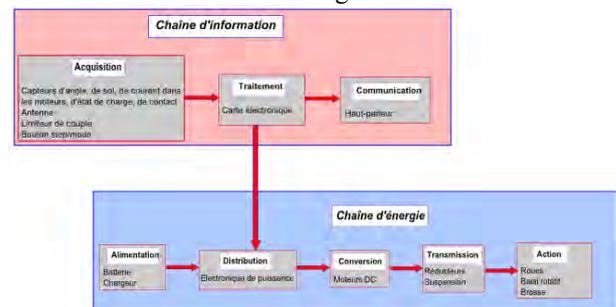


Figure 3 : Chaînes d'information et d'énergie du système

Capteurs : Toute une série de capteurs est placée à l'avant du robot Roomba. Premièrement, des capteurs angulaires sont répartis sur le demi-cercle avant de l'appareil. Ces capteurs correspondent à six couples de LED, une noire et une blanche, qui émettent dans l'infrarouge à travers une visière qui se situe le long de ce demi-cercle sur le carter avant. Il y a également des

capteurs de contact (les pattes en plastique sur les côtés et les pattes en métal sur l'avant) afin de détecter les chocs. Enfin, une antenne située à l'avant permet de recevoir le signal du chargeur de batterie, mais nous soupçonnons également qu'elle participe à la détection des obstacles. En effet, nous nous sommes livrés à une petite expérience : nous avons recouvert une surface verticale de tapis noir (non détecté par les capteurs), afin de déterminer la zone d'espace dans laquelle un obstacle est détectable. Successivement, nous réduisons la surface de tapis et lançons le robot dessus afin de voir s'il détectait les bords, sachant que lorsqu'il détecte un obstacle, il ralentit à son approche. Nous sommes arrivés à la conclusion que l'espace en question avait comme largeur 16,5 cm et comme hauteur 4,5 cm, soit exactement la position de l'antenne par rapport au sol.

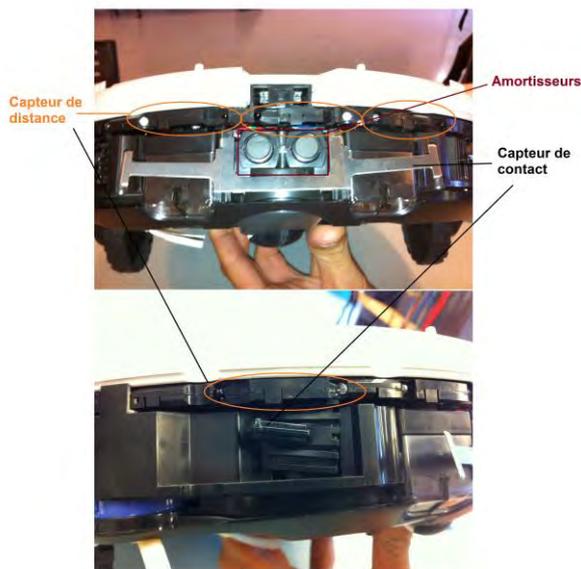


Figure 4 : Capturs

Analyse fonctionnelle : Concernant les analyses fonctionnelles ou opérationnelles, les élèves peuvent s'intéresser en particulier aux stratégies implémentées pour la réalisation de la tâche principale.

Parmi toutes les expériences qu'il nous semblait intéressantes à mener, les élèves se sont intéressés à la notion d'efficacité temporelle de nettoyage. Autrement dit, quelle est l'évolution temporelle de la surface nettoyée ?

Afin de faire des études comparatives, on s'est donc donné une surface sur laquelle tous les essais ont été effectués. Cette surface est rectangulaire, formée par quatre tables disposées sur leur tranche (cf. figure 5). Le relevé automatique de la surface balayée est réalisé à l'aide d'une caméra.

Nous avons fixé une webcam ainsi qu'un éclairage sur une barre de métal surélevée par rapport à la surface de travail considérée. Il a fallu poser le dispositif d'observation sur des tables adjacentes à celles formant l'enclos afin que l'angle de la caméra ne soit pas limitant dans l'étude du parcours du robot. La surface

de l'enclos est alors complètement visualisable. Un script Simulink fourni nous permet dès lors, via quelques réglages des paramètres de détection, de détecter les couleurs primaires sur une vidéo, et donc la position d'un point de couleur sur une vidéo.

On a de ce fait choisi d'utiliser des bouts de scotch de couleur, quitte à en disposer plusieurs côte-à-côte pour améliorer la détection par la caméra, et qu'on a placés sur la surface du robot pour repérer son positionnement sur le sol et sa direction. Le paramétrage est particulièrement sensible et nécessite de nombreuses itérations.

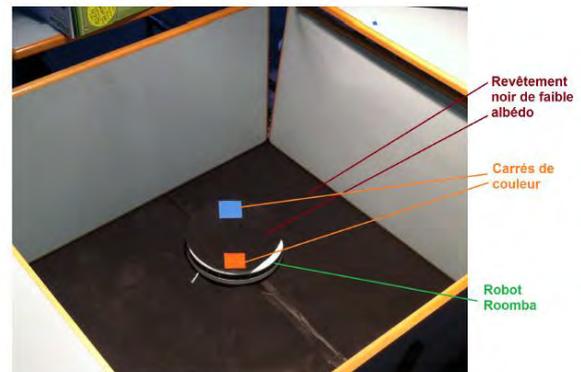


Figure 5 : Photo de la manip réalisée

Différents outils d'analyse et de traitement d'images fournis par les professeurs ont permis d'effectuer diverses études de caractérisation. Ainsi, il a été identifié l'évolution de la surface balayée en fonction du temps pour divers niveaux de saleté disposée au sol et divers obstacles. Cette évolution est de forme exponentielle. Par ailleurs, il a été également possible d'analyser les surfaces les plus balayées. Cette analyse est effectuée au travers un programme Simulink permettant de colorier en blanc les zones où la fréquence de passage du robot est élevée et en noir où la fréquence est faible. Un exemple d'image obtenue est donné ci-dessous où le rectangle rouge correspond à un obstacle fixe.

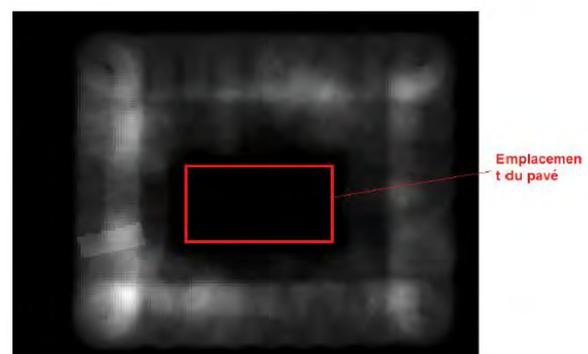


Figure 6 : Fréquence de passage du robot (le rectangle rouge correspond à un obstacle fixe)

D'autres analyses ont été effectuées telles que le comportement du robot vis-à-vis des obstacles (formes, dimension), ou encore sa consommation énergétique et son autonomie. Des analyses auraient pu également être menées relatives au chargeur de batterie.

5.2. Brosse à dents à recharge par induction

La brosse à dent (cf. figure 7) est un objet intéressant à plusieurs titres. Tout d'abord, c'est un objet de la vie courante. C'est un objet dont le coût d'acquisition est rudimentaire. Enfin, il comporte plusieurs informations scientifiques et techniques d'un grand intérêt pédagogique.



Spécificités techniques

- Autonomie (de la charge maximale à la décharge totale): 25 minute(s)
- Temps de charge: 16 heure(s)
- Batterie rechargeable: NiCd
- Tension: 220-240 V
- Fréquence: 50/60 Hz
- Consommation électrique: 2,9 W
- Tête à double brosse: La tête à double brosse a été conçue pour réaliser 15 000 mouvements par

Figure 7 : Photo de la brosse à dents à recharge par induction (HX160/022 de chez Philips)

Tout d'abord, une analyse fonctionnelle est réalisée. Celle-ci est synthétisée par le schéma de la figure ci-dessous.

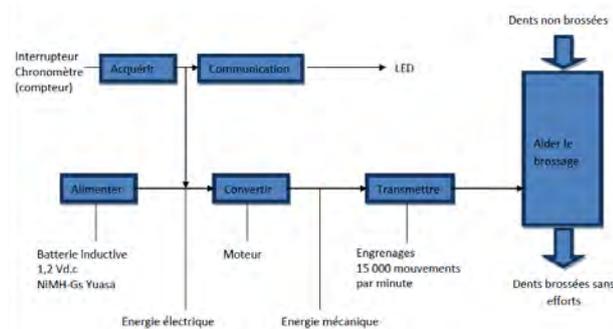


Figure 8 : Schéma fonctionnel

Matériaux/procédés de fabrication: Historiquement, les brosses à dents étaient des bâtons, qui servaient comme un cure-dent. Les brosses à dents d'aujourd'hui sont faites de plastique injecté ainsi que de poils nylon. Les brosses à dents sont un élément commun de tous les jours, qu'il faut pour des raisons hygiénique changer tous les trois mois. Il faut donc des matériaux peu chers pour la rendre abordable au grand public. Il faut de plus des matériaux résistant à l'eau permettant de rendre le système hermétique. Les axes de guidage protégés par des joints en caoutchouc sont réalisés en acier.

Les procédés de fabrication identifiés sont :

- Pour la partie brosse : Moulage par injection d'un premier composant en plastique dur du boîtier. Montage de la source lumineuse ou d'un élément conducteur de lumière sur le premier composant plastique. Moulage par injection d'un second composant en plastique souple du boîtier à proximité de la DEL. Moulage par injection du boîtier, d'un groupe intérieur comprenant une unité. Insertion, dans le boîtier, d'un groupe intérieur comprenant une unité d'entraînement, une source d'énergie et une source lumineuse à DEL.
- Pour la base, elle est faite en deux parties par du moulage par injection, puis on insère les composants électriques, et enfin du plastique est coulé dessus afin d'empêcher les personnes de pouvoir accéder à cette partie. Le risque de rentrer en contact avec des pièces nues sous tension est important.

Analyse sur cycle de vie : Partie non traitée par les élèves mais ce support peut faire l'objet d'une véritable étude ACV [1]. En particulier, via des outils adaptés, les élèves pourront réaliser une analyse sommaire sur les impacts environnementaux d'un tel objet de grande série et comparer les résultats à une solution passive de brosse classique.

Chaine électrique/électronique : Tout d'abord, pour des raisons de commodité et de sécurité évidente, la recharge s'effectue par induction (recharge sans contact). Cette chaine pose des problématiques scientifiques intéressantes sur le plan pédagogique d'électromagnétisme, d'électronique de puissance / de commande et de stockage énergétique.

La carte électronique comportant en particulier la bobine secondaire du système de recharge par induction est donnée à la figure 9. Un modèle PSIM pour la simulation du transfert énergétique de type transformateur avec entrefer a été réalisé par les élèves tel que montré par la figure 10. L'intérêt de ce modèle, au-delà de la familiarisation avec un outil de simulation électronique, est la confrontation des résultats entre un modèle soumis à des hypothèses et les mesures, eux-mêmes entachés d'erreurs de mesures.



Figure 9 : Photo de la carte électronique

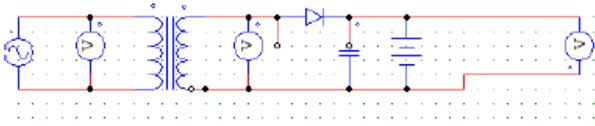


Figure 10 : Modèle PSIM de la recharge

Chaîne mécanique : Concernant la chaîne mécanique de transmission de puissance, elle est également riche pédagogiquement. Le démontage de la brosse par les élèves leur a permis de mener une analyse sur les choix d'entraînement adopté par l'industriel. La figure 11 montre les principaux organes associés à cette chaîne.

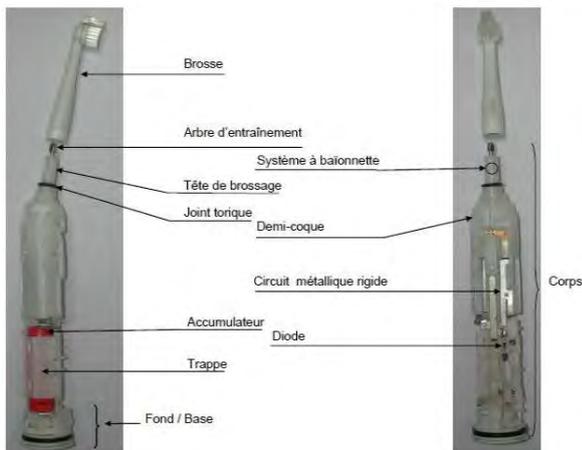


Figure 11 : Chaîne mécanique

De cette analyse, les élèves ont extrait le schéma cinématique de la brosse présenté à la figure 12.

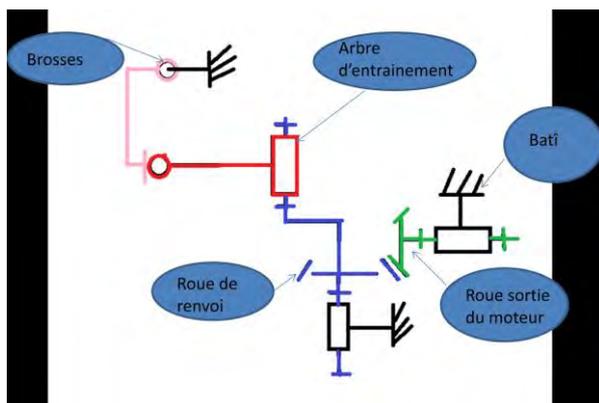


Figure 12 : Modèle cinématique

Toujours concernant cette chaîne mécanique, on peut noter que Philips a développé une tête escamotable qui se dérobe si la pression sur la gencive est trop forte. Un limiteur de couple constitué d'une pièce déformable (cf. figure 13) empêche une pression trop forte sur la gencive. C'est le système breveté de protection des gencives [2]. A partir d'un outil de modélisation

mécanique (SolidWorks), les élèves ont pu déterminer à partir de quelle pression la tête se dérobe.

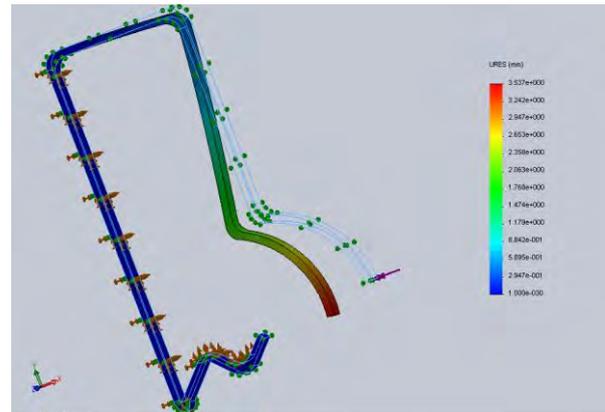


Figure 13 : Modélisation du ressort sous SolidWorks

Extrait de la conclusion des élèves : Dans ce projet, nous avons utilisé beaucoup d'outils numériques. Cela a été très constructeur. Nous nous sommes aperçus que la simulation était parfois loin de la réalité. Les logiciels ayant des subtilités ne concordant pas avec la réalité. Nous nous sommes aussi aperçus que les données du constructeur sont difficiles à obtenir. Nous avons eu du mal à effectuer certaines de nos mesures à causes des faibles puissances mises en jeu, les appareils de mesure mis à notre disposition n'étant pas toujours adaptés à ces niveaux de puissance. D'où une certaine imprécision dans les relevés.

Par ailleurs, ce projet a été très formateur. Il nous a permis d'apprendre à travailler en groupe, à manipuler avec précaution et à établir un protocole expérimental par nos propres moyens.

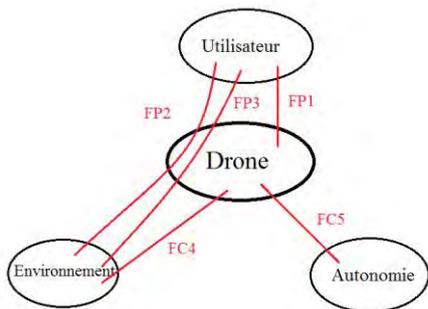
5.3. AR-Drone

Il s'agit là aussi d'un objet commercialisé pour le grand public, c'est un jouet pour être précis qui s'inscrit dans une longue tradition de modélisme aéronautique ; à ceci près que cet engin est plus sophistiqué qu'on ne pourrait le croire au premier abord : en effet, on ne contrôle pas l'appareil en contrôlant chaque moteur, mais en contrôlant directement une fonction (monter, descendre, avancer ...), et c'est le système embarqué qui effectue les calculs nécessaires pour exécuter cette fonction (l'asservissement s'effectue grâce aux nombreux capteurs embarqués). Comme indiqué sur la figure 14, l'hélicoptère est équipé de 4 moteurs électriques (d'où le nom de « quadricoptère »), de capteurs : accéléromètres, gyroscopes, altimètre, caméras, carte wifi, et embarque même un OS linux le tout alimenté par une batterie au lithium.



Figure 14 : Photo de l'AR-Drone 2.0 de chez Parrot.

Après une prise en main par les élèves très intéressée et joyeuse (...), ils ont réalisé un diagramme des interacteurs résumant les principales fonctions de service de l'Ar.Drone 2. Ce diagramme est donné à la figure 15.



- FP1 : Divertir l'utilisateur
- FP2 : Permettre à l'utilisateur de déplacer le drone dans son environnement
- FP3 : Permettre à l'utilisateur de filmer son environnement
- FC4 : Résister aux agressions de son environnement (eau, sable, vent..)
- FC5 : Être autonome

Figure 15 : Diagramme des interacteurs.

Motorisation : Le drone est doté de quatre moteurs brushless, un pour chaque hélice. Ces moteurs sont très intéressants pour le modélisme car ils peuvent être de très petite taille tout en offrant une puissance convenable, en tout cas suffisante pour, grâce aux hélices, de porter le drone. Les moteurs "brushless", littéralement "sans balai", sont plus intéressants que les moteurs à collecteur mécanique qui possèdent d'une part un défaut majeur de posséder des balais s'usant rapidement en particulier pour des vitesses de rotation élevée.

D'une puissance de 15 Watts, les moteurs effectuent 28000 tr/min en vol stabilisé, ce qui correspond à 3300 tr/min pour les hélices. La vitesse de rotation des moteurs peut varier entre 10350 et 41400 tr/min. Le kit présenté sur la figure 16 comprend un moteur avec sa carte électronique, qui comprend un microcontrôleur basse consommation 8bits ainsi qu'un contrôleur ADC 10 bits pour gérer la vitesse de rotation [3].



Figure 16 : Photo u moteur brushless et de son électronique

Mais cela soulève un problème. En effet un moteur brushless doit être alimenté en triphasé, et le drone fonctionne avec du courant continu (batterie), il est donc nécessaire d'avoir un onduleur, ce qui augmente le cout, la taille et les pertes d'énergie. Cela nécessite également de connaître la position du rotor (capteur direct ou indirect de position) à chaque instant pour l'autopilotage.

Le pilotage ou la commande de vol du dispositif est réalisé à partir de consignes de vol imposées par le pilote (sur une tablette ou un Smartphone par exemple), ces consignes sont récupérées via une liaison wifi par le calculateur embarqué (processeur 1 GHz 32 bits ARM). Ce dernier, via un modèle mécanique inverse et des retours des divers capteurs, en déduit les consignes appliquées à chaque moteur.

Les élèves se sont intéressés à cette chaîne d'information.

Mécanique de vol : Les mouvements possibles sont :

- Translation sur l'axe Z
- Roulis (rotation sur l'axe X)
- Tangage (rotation sur l'axe Y)
- Lacet (rotation sur l'axe Z)



Figure 17 : Définition des axes

La rotation des hélices engendre des efforts sur le vent. Or par la loi de rétroaction, le vent engendre des efforts sur l'hélice.

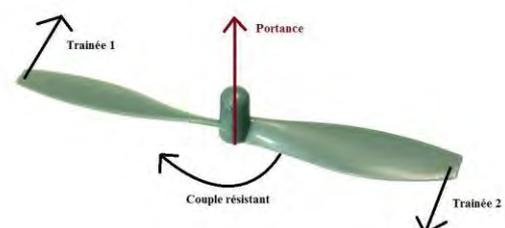


Figure 18 : Efforts sur l'hélice

Soit P la force de portance et T la force de trainée.

On a :

$$T = 1/2 \rho \cdot S \cdot C_x \cdot V^2 = K_x \cdot V^2$$

$$P = 1/2 \rho \cdot S \cdot C_z \cdot V^2 = K_z \cdot V^2$$

Avec

ρ : La masse volumique de l'air

S : La surface du disque de l'hélice

V : vitesse linéaire de l'hélice

C_x : Coefficient de trainée

C_z : Coefficient de portance

On a donc quatre efforts (un pour chaque hélice) et le poids. Il y a deux moteurs diamétralement disposés tournant dans le sens horaire et deux autres dans le sens trigonométrique.

Les différents mouvements possibles sont :

- Vol stationnaire : Le drone se stabilise à une certaine hauteur avec une vitesse nulle, puis il faut que la somme des forces et que la somme des moments au centre de gravité soient nulles pour obtenir un vol stationnaire. Si on supposait le centre de gravité au centre du drone, les quatre moteurs tourneraient à la même vitesse pendant le vol stationnaire.
- Translation verticale : Pour obtenir une translation verticale, il faut que la somme des forces soit dans la direction du déplacement voulu, et que la somme des moments au centre de gravité soit nulle. On augmente donc uniformément les quatre moteurs.
- Lacet : Pour obtenir un mouvement de lacet, il faut que la somme des forces et que la somme des moments selon les axes horizontaux au centre de gravité soient nulles. Il nous reste donc un couple selon l'axe horizontal qui va engendrer une rotation du drone. Pour ce faire, on accélère deux moteurs diamétralement disposés et ralentit les deux autres. Cela explique la disposition particulière des moteurs.
- Tangage et roulis : Pour obtenir un mouvement de tangage ou de roulis, il faut que la somme des forces et des moments selon l'axe vertical au centre de gravité soient nulles. Il reste donc un couple selon un axe horizontal qui va entraîner la rotation du drone. Pour ce faire on accélère deux moteurs "consécutifs" et on ralentit les deux autres.
- Déplacement horizontal : Pour obtenir un déplacement horizontal, on effectue d'abord un roulis ou un tangage, puis on augmente les moteurs ralentis pendant la première phase pour que la somme des forces s'oppose au poids.

Capteurs : Etant donné que l'utilisateur ne donne que des informations globales (monter, descendre, droite, gauche, avance, recule, tourne), il est nécessaire au drone de s'auto-stabiliser et de se repérer dans l'espace. Pour cela, le Drone dispose de plusieurs types de capteurs :

- Une centrale inertielle permettant au drone de connaître son orientation dans l'espace et son accélération, composée de :

- un « accéléromètre 3 axes » (en réalité 3 accéléromètres MEMS : 1 pour chaque axe) de précision $\pm 50\text{mg}$.
- un « gyroscope 3 axes » (en réalité 2 gyromètres MEMS, + un gyromètre de précision pour l'axe vertical) qui mesure l'angle suivant les 3 directions de l'espace. Précision $2000^\circ/\text{seconde}$
- Un magnétomètre 3 axes :
- Un capteur de pression : il est utilisé par le drone pour calculer son altitude (pour une hauteur supérieure à 6m)

Mesures : Les élèves ont pu tout d'abord relever la tension et l'intensité appliquées aux bobinages d'un des moteurs. Pour ce faire, la tension a été relevée à partir d'une sonde différentielle. Le courant est relevé via un shunt de précision.



Figure 19 : Mesure des courants/tension du moteur

Pour évaluer les capacités du drone à se déplacer, les élèves ont effectués différents relevés, en particulier la mesure de la portance. Pour ce faire, le drone est posé sur une balance et à l'aide du logiciel de contrôle, la vitesse de rotation des hélices est modifiée. Des mesures du poids soulevé sont effectuées, en retranchant les effets de la surpression due aux conditions aux limites présentes dans la manip mais qui n'existent pas dans le fonctionnement normal en le surélevant de quelques millimètres. On a ainsi la force de la portance des quatre hélices. Pour la gamme de portance qui lui permet de décoller, on modifie légèrement le protocole. On l'accroche à des poids (supérieur à la portance maximale du drone) et on mesure la différence de masse soulevée retranchée de l'effort causé par le vent.

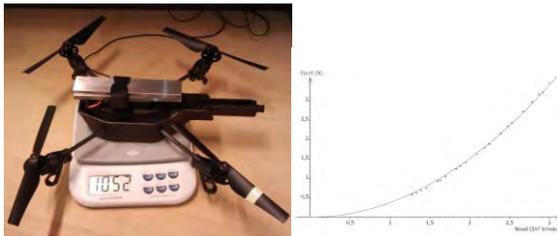


Figure 20 : Mesure de la force de portance

Chaque année, le nombre de supports mis à disposition est renouvelé partiellement (20%). D'autres supports ont été utilisés. Notamment :

- Machine à sorbet
- Robot 6 axes de chez Mitsubishi
- Manette Wii
- Lecteur laser de Code Barre
- Chariot de golf électrique
- Vélo à assistance électrique
- Scooter électrique
- ...

6. Notre bilan

Notre bilan par rapport à notre expérience encore réduite est globalement positif. Pour les enseignants, l'intérêt d'une telle démarche de « reverse engineering » réside dans l'approche par l'exemple de l'application des phénomènes physiques. Même si les élèves suivant cette UE ne possèdent pas, à ce stade de leur cursus, toutes les connaissances scientifiques et technologiques nécessaires, cette approche permet de mettre concrètement en évidence certains phénomènes et l'intérêt et la nécessité de les aborder lors des enseignements plus classiques.

Cela étant, ce type d'enseignement mobilise beaucoup de moyens humains (encadrement, techniciens) et nécessite un investissement probablement plus important de la part des enseignants. Cela implique aussi une plus grande vigilance dans l'organisation et le déroulement des séances en particulier concernant l'anticipation des demandes des élèves en termes de matériel d'expérimentation.

Il faut également noter que le choix des supports doit correspondre aux moyens expérimentaux disponibles et à la faisabilité des mesures. Des supports, intéressants d'un point de vue conceptuel peuvent s'avérer inexploitable à cause d'un taux d'intégration trop élevé.

7. Retour des élèves

Pour les élèves, les bilans réalisés à chaque fin de semestre sont dans l'ensemble satisfaisants. Ils apprécient la démarche ludique, au travers d'objets de la vie courante et l'approche expérimentale exigée. Leur première confrontation à la mécatronique leur semble très bénéfique et la comparaison théorie-mesure très utile.

Il est fait ponctuellement le reproche d'un manque d'anticipation de matériel d'expérimental ou encore de retard pris lors des séances lié à un dysfonctionnement accidentel de matériel ou d'objets.

8. Conclusion

Nous avons souhaité ici partager notre expérience dans la mise en place d'une démarche d'enseignement par projet. Notre bilan et celui des élèves est globalement positif. Cependant, il ne faut pas négliger les moyens humains, organisationnels et matériel que cette approche exige. Par ailleurs, cette approche n'est à notre sens pertinente que pour un effectif relativement réduit d'élève. Mais elle offre l'avantage d'offrir aux élèves un lieu d'expérimentation, d'initiative, d'autonomie et enfin de développer chez eux leur curiosité scientifique et technique et d'enrichir leur culture technologique. Compte tenu des supports choisis, c'est également un lieu de croisement de plusieurs disciplines plus ou moins couplées, en adéquation aux nouvelles orientations de l'enseignement en STII2D.

Cet article n'avait pas comme objectif de décrire précisément les divers supports et études effectuées (un seul article ne suffirait pas !) mais d'illustrer simplement la démarche pédagogique choisie.

Remerciements :

Les exemples de supports et les travaux associés intégrés à cet article ainsi que notre expérience acquise durant ces quelques années de pratiques n'auraient pu être possibles sans la complicité, l'investissement et le travail de nos élèves du magistère mécatronique de l'ENS Rennes des diverses promotions. Nous les remercions vivement pour tout cela.

Bibliographie :

- [1] <http://www.infoenergie69.org/particuliers/agir-au-quotidien/la-consommation-courante/faisons-le-point-68-68/l-analyse-de-cycle-de-vie-et-l-eco-conception>
- [2] <http://www.google.com/patents/EP2229917B1?cl=fr>
- [3] <http://ardrone2.parrot.com/>

Logiciel de mesure « large spectre » des puissances électriques en régime quelconque

Luc LASNE Stéphane YGORRA

Université de Bordeaux 1, Centre de Ressources en EEA
351, Cours de la Libération 33405 Talence cedex, France.
Contact e-mail : luc.lasne@u-bordeaux.fr

Résumé : Après un ensemble de rappels concernant les expressions théoriques des puissances électriques associées aux différents régimes de l'électricité (continu, sinusoïdal et surtout régime quelconque, aussi appelé « régime déformé »), cet article détaille la mise en œuvre des calculs de puissances à partir d'une série d'acquisitions numériques de tension et de courant. Les stratégies de calculs débouchent alors sur la conception d'un logiciel intégrant les calculs de spectres et de puissances, à partir du seul relevé oscillographique de la tension et du courant associés à un dipôle. Ce logiciel est conçu sur la base d'un script Scilab [1] (logiciel libre) et utilise les fichiers de données des oscilloscopes Tektronix (au format CSV). Il donne, de façon simple et compacte, la possibilité de faire des mesures de puissances détaillées, à large spectre puisque la bande passante est la même que celle de l'oscilloscope, et ce à travers plusieurs stratégies de calculs dont les différents résultats sont confrontés. La mesure complète des puissances est ainsi possible uniquement grâce à un oscilloscope et un ordinateur personnel.

1 Introduction

La détermination théorique et la mesure des puissances électriques sont souvent difficiles en dehors des cas d'école que constituent les régimes continu et sinusoïdal. Pourtant, les solutions de conversion de l'énergie électrique utilisant des tensions et courants non sinusoïdaux (on parle de « régimes déformés ») sont de plus en plus répandues et les moyens permettant le mesurage des puissances avec ce type de signaux se révèlent très chers et parfois limités dans la pertinence des données affichées et les bandes passantes associées aux mesures.

Pourtant, l'utilisation aujourd'hui démocratisée d'oscilloscopes numériques à large bande permet, sous réserve de récupérer les fichiers de données, de faire effectuer l'intégralité des calculs et des affichages, y compris les plus complexes, par un ordinateur simplement connecté à l'oscilloscope via un câble USB, comme le représente la *figure 1*.

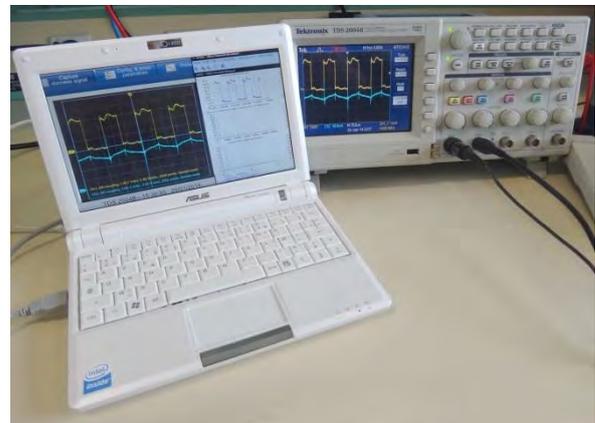


Figure 1 : Oscilloscope et PC+Logiciel SCITEK

2 Rappels : Puissances électriques et grandeurs associées

2.1. Puissance électrique

En physique, une « puissance » est définie comme le rapport de la quantité d'énergie échangée entre deux systèmes par le temps de l'échange. Deux grandeurs assez différentes sont alors associées à cette définition :

➤ On parle de « **puissance instantanée** » pour décrire la variation à chaque instant de l'énergie, ou en d'autres termes la dérivée par rapport au temps de

l'énergie échangée :

$$p(t) = \frac{dW(t)}{dt}$$

➤ On parle de « puissance moyenne » ou « **puissance active** » pour décrire la moyenne temporelle de la puissance instantanée (en régime périodique) :

$$P = \langle p(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} p(t) \cdot dt$$

Cette grandeur représente le véritable échange énergétique moyen, et c'est en général celle que le physicien utilise quand il parle sans précision de « puissance ». En d'autres termes, P représente le nombre de Joule par seconde qui caractérise l'échange de façon globale ; son unité est le Watt (W).

En électricité, la puissance instantanée consommée ou fournie par un dipôle s'écrit simplement comme le produit de la tension à ses bornes et de son courant.

Considérons simplement l'association générateur / récepteur représentée sur la figure 2.

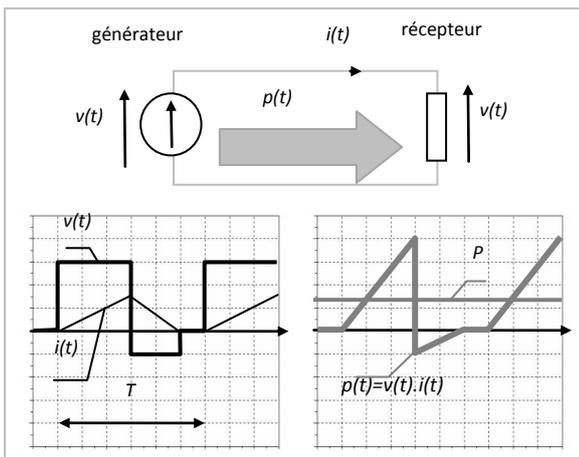


Figure 2 : Puissances instantanée et moyenne

Il est possible de prendre conscience de la différence entre puissance instantanée et moyenne sur cet exemple où la tension et le courant sont variables. Il apparaît dans la période un intervalle de temps où la puissance est négative, ce qui signifie que le « récepteur » a en réalité refoulé de l'énergie durant ce temps.

Pourtant, à l'échelle de la période, la moyenne de la puissance est bien positive ce qui signifie que le générateur fournit bien globalement de l'énergie au récepteur.

On retiendra ainsi que « LA puissance » consommée par le dipôle correspond à la puissance « moyenne », dite aussi « active » :

$$P = \langle v(t) \cdot i(t) \rangle$$

2.2. Puissance électrique en régime DC

Dans un circuit en régime permanent continu (DC) les tensions et les courants ne varient pas dans le temps. En conséquence, puissance instantanée et moyenne sont rigoureusement égales et s'écrivent simplement :

$$P = p(t) = V \cdot I$$

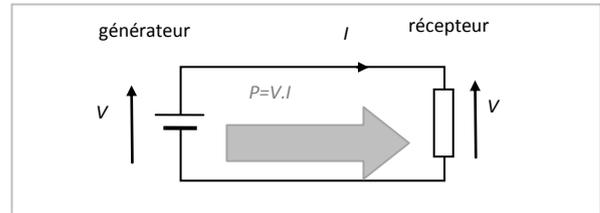


Figure 3 : Circuit en régime continu

NB : Dans ce régime particulier, les valeurs moyennes et efficaces des grandeurs sont également confondues.

2.3. Puissances électriques en régime sinusoïdal

Dans un circuit en régime alternatif sinusoïdal (AC) les tensions et les courants ont les formes génériques représentées sur la figure 4 et peuvent présenter un certain déphasage : φ .

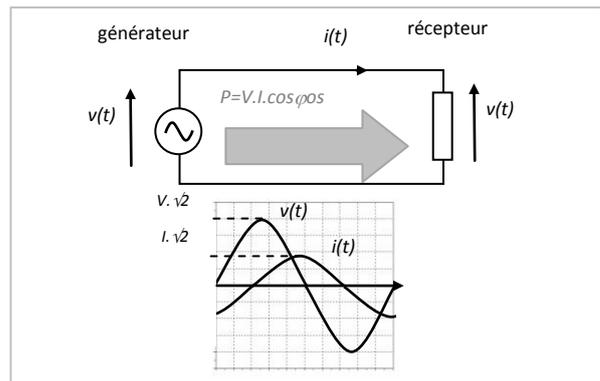


Figure 4 : Circuit en régime sinusoïdal

En écrivant la tension et le courant sous les formes : $v(t) = V \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t)$ et $i(t) = I \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi)$, c'est-à-dire sous les formes standard utilisées en physique (où apparaissent les valeurs efficaces des grandeurs : I et V), la puissance s'écrit :

$$\begin{aligned} P &= \langle v(t) \cdot i(t) \rangle \\ &= \langle 2 \cdot V \cdot I \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi) \rangle \\ &= \langle V \cdot I \cdot \cos(\varphi) - V \cdot I \cdot \cos(2\omega \cdot t - \varphi) \rangle \end{aligned}$$

Comme la valeur moyenne du cosinus de droite est nulle, cette expression se réduit à :

$$P = V \cdot I \cdot \cos\varphi$$

NB : les valeurs efficaces sont définies comme la racine de la moyenne du carré (RMS) des grandeurs. En régime sinusoïdal pur, on montre que, pour une

tension, $V = V_{max} / \sqrt{2}$ où V_{max} est l'amplitude de la tension.

En l'absence de déphasage, cette expression devient identique à celle du régime continu ; mais en revanche lorsque le déphasage est non nul, son cosinus module directement la valeur de la puissance réellement consommée par le dipôle. Pour mieux appréhender ces notions, il est d'usage de raisonner sur les vecteurs de Fresnel de la figure 5, qui représentent la tension et le courant précédents : \underline{I} et \underline{V} .

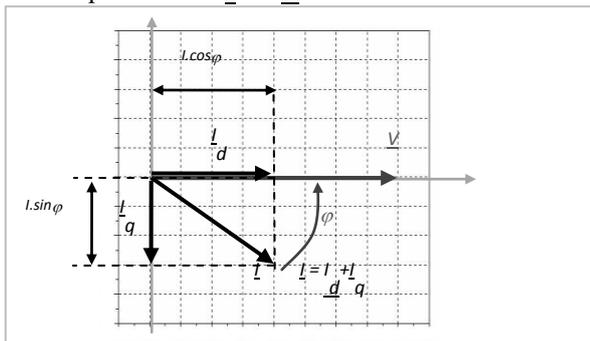


Figure 5 : Vecteurs de Fresnel

Le vecteur courant \underline{I} , déphasé par rapport à la tension d'un angle φ , peut être décomposé en deux vecteurs : \underline{I}_d et \underline{I}_q , le premier étant colinéaire à \underline{V} , le second perpendiculaire.

La décomposition est pratique puisqu'elle permet de comprendre que seule la partie du courant en phase avec la tension, \underline{I}_d , est porteuse de puissance active. En effet on reconnaît dans le produit de son module et de celui de la tension l'expression de la puissance active : $P = V \cdot (I \cdot \cos\varphi)$. En conséquence \underline{I}_d est appelée « partie active du courant ».

La partie en quadrature, \underline{I}_q , sera en revanche nommée « partie réactive ». Elle correspond à une composante du courant total \underline{I} qui n'est pas porteuse de puissance moyenne mais qui contribue toutefois à l'augmentation de son module. Plutôt que de s'intéresser de façon directe à ce courant, le physicien préfère généralement y associer une grandeur analogue à une puissance : la « puissance réactive » :

$$Q = V \cdot I \cdot \sin\varphi$$

dont l'unité est le VAR (Volt Ampère Réactif).

Parallèlement, le module complet du courant peut également être multiplié par celui de la tension de manière à obtenir une grandeur homogène à une puissance : la « puissance apparente » :

$$S = V \cdot I ;$$

son unité est le VA (Volt Ampère). Cette grandeur est souvent utilisée en électrotechnique comme « produit de dimensionnement » des appareillages.

NB : Dans toutes ces expressions, V et I sont des valeurs efficaces (RMS).

Dans ce cadre précis, les trois puissances précédentes sont liées par une formule simple :

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

Une analogie classique avec le théorème de Pythagore provient alors des projections orthogonales du courant, auxquelles sont dues les compositions des puissances : On parle alors du « triangle des puissances » représenté sur la figure 6.

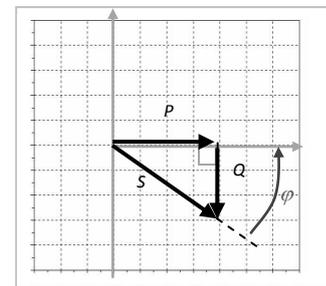


Figure 6 : Triangle des puissances

Enfin, une ultime grandeur est souvent associée aux puissances et au comportement énergétique des récepteurs électriques : le « facteur de puissance » : $k = \frac{P}{S}$.

Il permet de chiffrer simplement à quel point un récepteur est adapté à la conversion d'énergie électrique. Dans le cas du régime sinusoïdal,

$$k = \frac{P}{S} = \cos\varphi \in [0,1].$$

Lorsque le facteur de puissance est égal à 1, l'intégralité du courant qu'il consomme est porteur de puissance (autrement dit le déphasage et la puissance réactive sont nuls). Ce récepteur est alors équivalent à un dipôle résistif.

Au contraire, lorsque le facteur de puissance est nul, le dipôle consomme du courant mais aucune puissance ; c'est le cas des inductances et condensateurs dont la seule contribution est réactive.

En pratique ce facteur est très utilisé pour caractériser les appareillages et les installations. Les gestionnaires des réseaux électriques, et certaines normes, préconisent qu'il ne soit pas inférieur à 0,92 de manière à ce que la consommation de puissance en régime alternatif ne s'accompagne pas de surintensités

importantes dues à la puissance réactive, et donc de pertes en lignes importantes associées.

2.4. Puissances électriques en régime déformé

Lorsque la tension et le courant appliqués à un dipôle ne sont ni continus, ni sinusoïdaux, on parle de « régime quelconque » ou encore de « régime déformé ». Dans ce cas, les expressions des grandeurs associées à l'étude énergétique, et parfois même leurs définitions, deviennent plus complexes.

➤ Puissance active :

Elle reste définie de façon fondamentale comme la moyenne du produit tension courant :

$$P = \langle v(t) \cdot i(t) \rangle$$

➤ Puissance apparente :

Elle reste définie comme le produit des valeurs efficaces :

$$S = V \cdot I$$

➤ Puissance réactive :

C'est là que les difficultés apparaissent car, si elle reste définie comme la contribution, en terme de puissance, de la partie du courant en quadrature avec la tension, il est difficile d'y associer une écriture directe. Un problème supplémentaire réside dans le fait que, même dans le cas de courant et tension en phase, c'est-à-dire en présence de puissance réactive nulle, on montre que $P < S$. La différence entre puissance active et apparente se révèle ainsi également liée à l'aspect non sinusoïdal des grandeurs.

➤ Puissance déformante :

Pour tenir compte du fait que les grandeurs sont non sinusoïdales, on utilise enfin la notion de « puissance déformante », définie comme le « reste » du bilan des valeurs quadratiques des grandeurs puissances : D telle que :

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$$

NB : en d'autres termes, on montre qu'en régime déformé la relation $S^2 = P^2 + Q^2$ n'est plus vérifiée.

Approche spectrale du calcul des puissances

Les deux dernières définitions posent un problème : Elles n'explicitent pas clairement les puissances réactive et déformante en fonction des valeurs prises par le couple tension / courant. Il est donc généralement assez difficile de les dissocier et certains appareils de mesure « bon marché » ne proposent généralement sous le terme de « puissance réactive » que la grandeur globale :

$$\sqrt{S^2 - P^2}$$

Il y a pourtant un moyen pour détailler les expressions rigoureuses de l'intégralité des grandeurs : la décomposition en série de Fourier.

En effet, la tension et le courant étant de nature périodiques, il est possible de les décomposer sous l'écriture classique en notant va_n, vb_n, ia_n et ib_n les coefficients de Fourier, respectivement pour la tension et le courant :

$$v(t) = \langle v \rangle + \sum_{n=1}^{\infty} va_n \cdot \cos(n\omega t) + vb_n \cdot \sin(n\omega t)$$

$$i(t) = \langle i \rangle + \sum_{n=1}^{\infty} ia_n \cdot \cos(n\omega t) + ib_n \cdot \sin(n\omega t)$$

Pour plus d'efficacité, il est d'usage d'écrire la tension et le courant rassemblés sous la forme d'un seul terme sinusoïdal par ordre d'harmonique, dont l'écriture de l'amplitude met en avant les valeurs efficaces : V_n et I_n .

$$v(t) = \langle v \rangle + \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(n\omega t - \varphi_{vn})$$

$$i(t) = \langle i \rangle + \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(n\omega t - \varphi_{in})$$

Avec :

$$V_n = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{va_n^2 + vb_n^2} \text{ et } \varphi_{vn} = \text{Arg}(va_n + j \cdot vb_n)$$

$$I_n = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{ia_n^2 + ib_n^2} \text{ et } \varphi_{in} = \text{Arg}(ia_n + j \cdot ib_n)$$

Il devient alors possible de noter le « déphasage courant/tension » au rang d'harmonique n en formant la différence des phases des deux grandeurs :

$$\varphi_n = \varphi_{vn} - \varphi_{in}$$

Dans ce cadre précis, les puissance active, réactive et apparente s'explicitent de façon claire :

➤ Puissance apparente : Elle reste définie comme le produit des valeurs efficaces :

$$S = V \cdot I = \sqrt{\langle v \rangle^2 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \times \sqrt{\langle i \rangle^2 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}$$

NB : Chaque valeur efficace est la moyenne quadratique des composantes de Fourier, ce qui est une conséquence directe du théorème de Parseval.

➤ Puissance active : On la calcule en sommant les puissances actives associées à chaque rang d'harmonique (y compris les composantes continues) :

$$P = \langle v(t) \cdot i(t) \rangle = \langle v \rangle \cdot \langle i \rangle$$

$$+ \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cdot I_n \cdot \cos(\varphi_n)$$

- Puissance réactive : Elle est alors définissable comme la somme des puissances réactives associées à chaque rang d'harmonique :

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cdot I_n \cdot \sin(\varphi_n)$$

- Puissance déformante : Au vu des définitions précédentes, elle est simplement explicitée par la relation :

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}$$

3. Calcul des puissances sous Scilab à partir d'acquisitions numériques

3.1. Tension et courant échantillonnées

L'utilisation d'oscilloscopes numériques pour la visualisation des tensions et courants d'un circuit électrique permet aujourd'hui de façon très usuelle de récupérer les fichiers des données correspondantes à l'écran visualisé par l'utilisateur.

Ces fichiers contiennent les valeurs des grandeurs mesurées par échantillonnage, c'est à dire ponctuellement avec un intervalle de temps régulier appelé « période d'échantillonnage » : T_e . Chaque grandeur est ainsi représentée par un tableau de N valeurs, qu'il est également possible de considérer comme une matrice à une ligne et N colonnes.

Le « temps d'observation » du signal est le produit $N \cdot T_e$. Par ailleurs l'inverse de la période d'échantillonnage s'appellera « fréquence d'échantillonnage » ou encore « taux d'échantillonnage » (« sampling rate » exprimé en « échantillons par seconde »).

La figure 7 résume la correspondance entre l'écran observé par l'utilisateur de l'appareil et la réalité des valeurs et des grandeurs stockées.

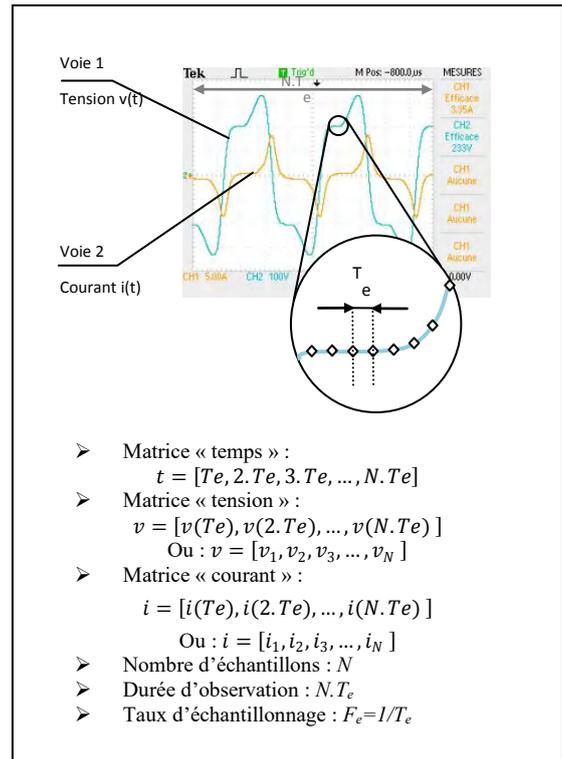


Figure 7 : Tension et courant échantillonnées

3.2. Calculs élémentaires

A partir des matrices v , i et t précédentes, il est possible de calculer de façon très compacte les principales grandeurs associées aux puissances électriques en utilisant les fonctions de base du logiciel Scilab [1] :

- Valeurs moyennes : Egalement appelées « composantes continues », elles représentent simplement la somme des échantillons divisée par N . Sous Scilab il sera intéressant d'utiliser directement la fonction « mean() » en écrivant :

$$V_{dc} = \text{mean}(v) \text{ et } I_{dc} = \text{mean}(i).$$

- Valeurs efficaces : On les obtient de façon générique en calculant la racine de la moyenne des carrés des échantillons (RMS). Sous scilab cela s'écrit :

$$V_{RMS} = \text{sqrt}(\text{mean}(v^2)) \text{ et } I_{RMS} = \text{sqrt}(\text{mean}(i^2))$$

NB : Il est également possible d'utiliser la multiplication matricielle pour cela :

$$V_{RMS} = \text{sqrt}((1/N) * v * v')$$

où v' représente la matrice conjuguée transposée de v .

- Puissance apparente : Elle se calcule par le simple produit des valeurs efficaces :

$$S = V_{RMS} * I_{RMS}.$$

- Puissance active : Elle est obtenue par moyennage du produit tension courant. Sous Scilab on écrit :

$$P = \text{mean}(v .* i).$$

NB : Sous scilab, le « .* » représente le produit terme à terme de deux matrices, et non pas le produit matriciel conventionnel qui lui est représenté par le seul « * ».

- Puissances réactive et déformante : Elles ne sont pas déterminables ni discriminables par des formules directes. La seule chose qu'il est possible de calculer à ce stade est le terme : $Q_{globale} = \text{sqrt}(S^2 - P^2)$ dont, de plus, le signe est indéterminé de par l'utilisation de la formule des carrés.

3.3. Détermination de la fréquence fondamentale et troncature des données

Tous les calculs précédents présentent un taux d'erreur minimal si les données couvrent un nombre entier de périodes des signaux mesurés (l'erreur n'est jamais vraiment nulle à cause de l'échantillonnage).

Il est ainsi nécessaire de déterminer la fréquence fondamentale des signaux de manière à tronquer les tableaux de données à un nombre entier de périodes mesurées. Sous Scilab, cela peut être fait à partir de la fonction `fft()` sur un des deux signaux, en programmant l'extraction de la fréquence correspondante au premier pic d'harmonique significatif (voir figure 8).

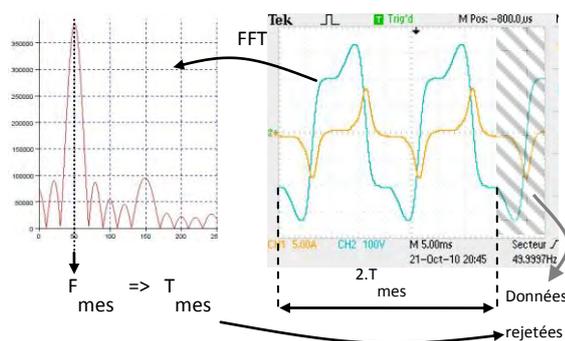


Figure 8 : FFT et troncature

La fréquence mesurée F_{mes} étant connue, il suffit de quelques manipulations sur les matrices pour tronquer les tableaux de données à un nombre entier de périodes.

Parallèlement, la connaissance de cette fréquence permet surtout le calcul précis des termes de la

décomposition en série de Fourier de la tension et du courant.

3.4. Spectres et décomposition en série de Fourier

Les expressions des coefficients a_n et b_n des décompositions en série de Fourier sont classiquement écrites sous forme intégrale. Par exemple pour la tension $v(t)$, le coefficient de rang n s'écrit : $va_n = \frac{2}{T} \int_0^T \cos(n\omega t) \cdot v(t) \cdot dt$.

En remarquant que cette expression représente le double de la moyenne du produit $\cos(n\omega t) \cdot v(t)$, il devient possible de l'écrire simplement sous Scilab à partir des matrices t et v :

Comme la matrice « temps » représente : $t = [Te, 2.Te, 3.Te, \dots, N.Te]$, et que :

$$\cos(n * \omega * t) = [\cos(n\omega Te), \cos(n\omega \cdot 2.Te), \dots]$$

On retrouve le coefficient de Fourier de rang n en écrivant simplement :

$$\begin{aligned} va_n &= 2 * \frac{1}{N} * \text{cos}(n * \omega * t) * v' \\ &= 2 * \frac{1}{N} \cdot [\cos(n \cdot \omega Te), \cos(n\omega \cdot 2.Te), \dots] \cdot \begin{bmatrix} v(Te) \\ v(2.Te) \\ \dots \end{bmatrix} \\ &= 2 * \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \cos(n \cdot \omega \cdot i.Te) \cdot v(i.Te) \end{aligned}$$

NB : il est également possible d'écrire ce calcul sous forme de valeur moyenne :

$$van = 2 * \text{mean}(\text{cos}(n * \omega_{mes} * t) .* v)$$

En opérant de même pour les coefficients b_n (avec des sinus) et de même avec la matrice courant, on obtient sans difficulté le détail des valeurs des coefficients de Fourier de la tension et du courant.

En utilisant directement les formules

$$V_n = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{va_n^2 + vb_n^2} \text{ et } \varphi_{vn} = \text{Arg}(va_n + j \cdot vb_n)$$

$$I_n = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{ia_n^2 + ib_n^2} \text{ et } \varphi_{in} = \text{Arg}(ia_n + j \cdot ib_n),$$

l'ensemble des grandeurs permettant le calcul des puissances par la méthode harmonique (voir paragraphe 2.4) est parfaitement déterminé.

Enfin, une grandeur usuelle est également facile à préciser : le THD (Total Harmonic Distorsion) ou « taux de distorsion harmonique » qui est défini comme le rapport de la racine de la somme quadratique des harmoniques par la valeur du fondamental :

$$THD = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots}}{V_1}$$

4. Mise en œuvre du logiciel SCITEK

4.1. Contexte matériel

La firme Tektronix met gratuitement à disposition des utilisateurs de ses oscilloscopes un logiciel qui permet de faire des saisies d'écran, mais également de récupérer les fichiers de données correspondants aux mesures, grâce à une simple connexion d'un PC au port USB situé à l'arrière de l'appareil.

Une fois la connexion établie, la fenêtre de capture des données du logiciel « Open Choice Desktop » [2] (voir la *figure 9*) permet de façon très simple et rapide d'enregistrer les données des voies sélectionnées, mais également de les copier vers le « presse papier », ce qui s'avère très pratique pour actualiser les informations et faire des mesures assez fréquentes.

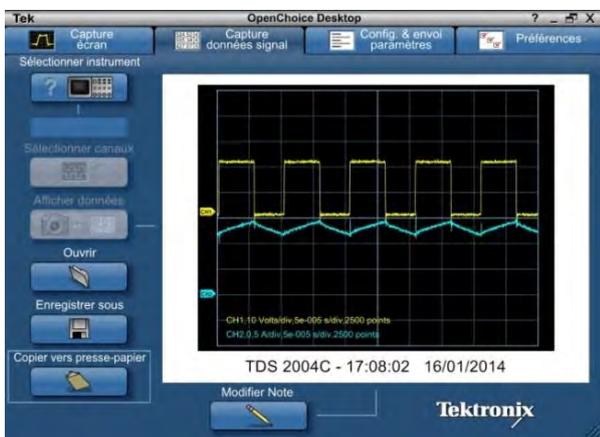


Figure 9 : La fenêtre d' « Open Choice Desktop »

Le logiciel « SCITEK » [3], développé intégralement sous la forme de script Scilab, permet dans tous les cas de récupérer les fichiers de données (au format .CSV), de les convertir en matrices de données et ainsi de mener l'intégralité des calculs de puissances et de spectres présentés précédemment. En exécutant le script « SCITEK.sce », la console Scilab s'ouvre, et l'exécution du script ouvre une fenêtre permettant de récupérer le contenu du presse papier, de choisir un fichier .CSV précis, de configurer les options et les calculs.

Une fois le calcul lancé, la fenêtre représentée sur la *figure 10* regroupe, de haut en bas, les tracés des données tronquées, les tracés des spectres linéaires et logarithmiques, ainsi que la liste des valeurs des grandeurs caractéristiques et des puissances de tous ordres.

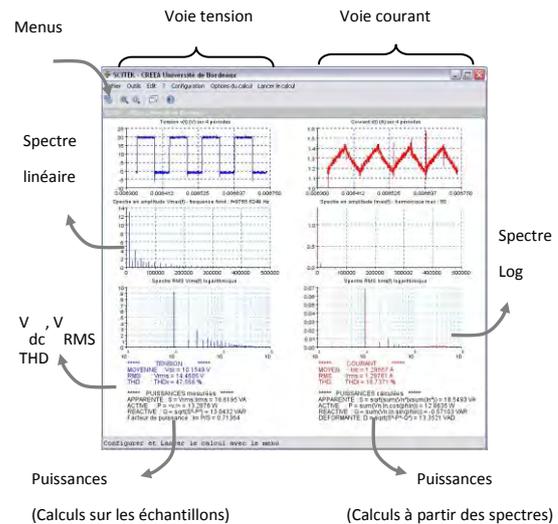


Figure 10 : La fenêtre résultat du logiciel « SCITEK »

Les valeurs des puissances sont exposées à travers les deux approches développées précédemment. La partie gauche de la fenêtre précise les valeurs calculées à partir des seuls échantillons, alors que la partie droite propose les valeurs calculées à partir des spectres calculés, plus précisément à partir des décompositions en série de Fourier. L'utilisateur pourra alors comparer ces résultats et se référer à sa guise à ceux provenant de la démarche qu'il préférera ; sachant l'erreur relative qui sépare les deux méthodes est généralement faible (2 à 3% sur la plupart des mesures).

4.2. Tests pratiques en conditions

Comme le calcul des puissances et la détermination des spectres dépend uniquement de l'oscillogramme choisi par l'utilisateur, la « bande passante » du dispositif complet correspond pratiquement à celle de l'oscilloscope. En d'autres termes il devient, grâce à ce type de logiciel, possible de réaliser des mesures de puissances sur une bande passante effective de l'ordre de la dizaine de MHz. Ceci peut s'avérer particulièrement intéressant dans le cadre de l'électronique de puissance actuelle où l'énergie électrique est le plus souvent convertie avec des fréquences de découpage de l'ordre de 10kHz à 100kHz, et où les harmoniques significatifs ne dépassent donc pas généralement l'ordre de grandeur de la dizaine de MHz.

Afin de valider le fonctionnement de l'ensemble, une série de tests a été menée sur des dispositifs de conversion d'énergie électrique présentant des fréquences fondamentales assez différentes.

➤ Tension et courant « secteur » 50Hz

Bonne adéquation des mesures aux résultats théoriques. Fonctionnement correct de la mesure de

fréquence fondamentale. Correspondance totale (erreur de 0.5%) des deux types de calcul (sur échantillons et sur spectres).

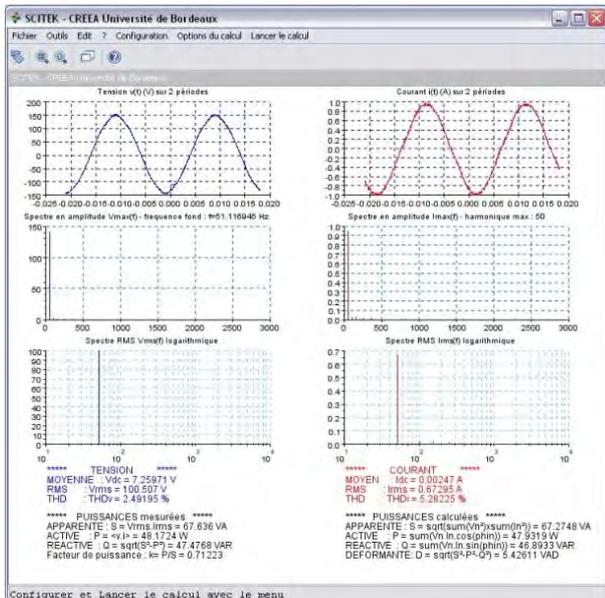


Figure 11 : SCITEK / charge inductive monophasée

➤ Tension et courant découpés à 1kHz

Bonne adéquation des mesures aux résultats théoriques. Fonctionnement correct de la mesure de fréquence fondamentale. Correspondance (erreur de 4%) des deux types de calcul (sur échantillons et sur spectres). Dissociation des puissance réactive et déformante fonctionnelle.

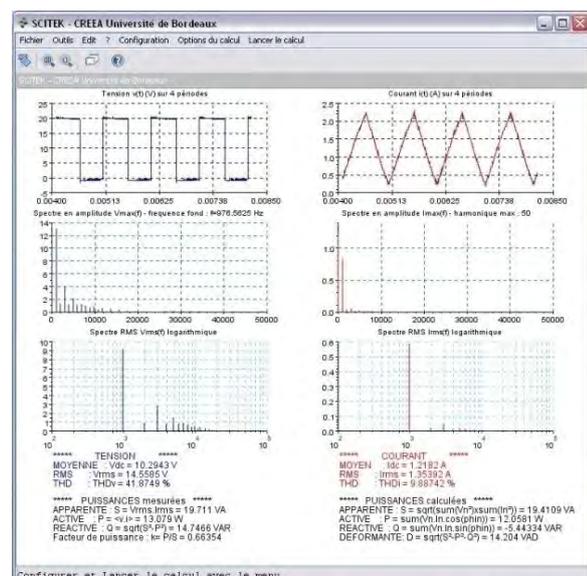


Figure 12 : SCITEK / hacheur découpage à 1kHz

➤ Tension et courant découpés à 100kHz

Bonne adéquation des mesures aux résultats théoriques. Fonctionnement correct de la mesure de fréquence fondamentale. Correspondance (erreur de

0,2%) des deux types de calcul (sur échantillons et sur spectres). Bonne dissociation des puissance réactive et déformante.

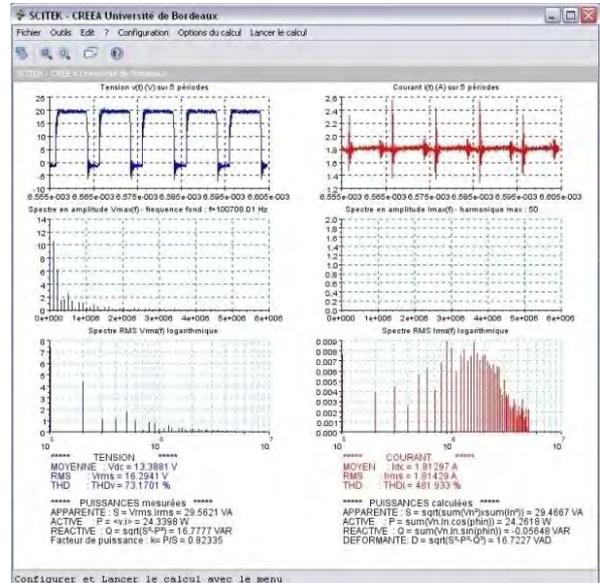


Figure 13 : SCITEK / hacheur découpage à 1kHz

4.3. Conclusions et précisions sur SCITEK

Les calculs de puissance et de spectres ne dépendent manifestement pas de la fréquence des signaux acquis par l'oscilloscope. En conséquence, l'objectif initial est atteint, et ce à travers un ensemble de fichiers scripts « open source » et peu volumineux. L'utilisation du logiciel ne requiert que les installations (gratuites) d'Open Choice Desktop et de Scilab. Il a été également intégré au logiciel, via des menus intuitifs, des options pratiques telles que la saisie de facteurs de sondes, le choix des voies utilisées, le choix de l'ordre maximal d'harmoniques dont le calcul tient compte, et la possibilité de saisie manuelle de la fréquence (si elle est connue par l'utilisateur).

SCITEK se présente ainsi, de façon particulière, comme une source précieuse de mesures dans le cadre de TP ou de manipulations très diverses. Il requiert juste l'utilisation d'un petit PC équipé des logiciels qu'il suffit de relier à l'oscilloscope par le câble USB (voir figure 1).

De plus, la puissance du logiciel Scilab autorise des évolutions très diverses. Il devient tout à fait envisageable de faire évoluer le code pour intégrer aux affichages des diagrammes de Fresnel, des mesures plus diversifiées, des calculs de rendements et d'énergies, etc.

En d'autres termes il devient possible d'obtenir des mesures associées d'habitude à des appareils professionnels dont le coût atteint plusieurs milliers d'Euro, simplement par évolution d'un code Scilab lisible et porté par une interface gratuite et évolutive.

5. Références

[1] : **Scilab** est un logiciel libre développé par l'INRIA, disponible pour Windows ou Linux. Téléchargez le à l'adresse suivante : <http://www.scilab.org/fr>

[2] : **Open Choice** Desktop est téléchargeable gratuitement sous réserve de renseigner un formulaire à partir de l'adresse :

<http://www.tek.com/oscilloscope/tds210-software/openchoice-desktop-application-tdspcs1-v23-0>

[3] : **SCITEK** est un ensemble de script Scilab que vous pouvez vous procurer gratuitement en contactant l'auteur de l'article (luc.lasne@u-bordeaux.fr) . Pour le faire fonctionner, de-zipper le fichier SCITEK.zip dans un répertoire de votre choix et double-cliquer sur SCITEK.sce (installations préalable de Scilab et Open Choice Desktop requises).

Liens et articles connexes

- « Récupérer les données d'un oscilloscope numérique sous GNU/Linux » par Thomas LAVARENNE - BUP n°928 (2010)
- Page personnelle de Jean-Michel MILLET : acquisitions de données pour REGRESSI, etc : <http://jean-michel.millet.pagesperso-orange.fr/regressi.html>

Etude de cas de la conception d'un parc d'hydroliennes

(Partie 1)

Franck LE GALL

Lycée Jules Ferry, 29 rue du Maréchal Joffre 78000 Versailles

Résumé : Dans cet article, nous proposons de développer l'étude de cas de la conception d'un parc d'hydroliennes. Nous y développons les étapes nécessaires à la conception technique en partant du dimensionnement des machines tournantes à la connexion sur le réseau EDF. Bien que ce parc soit en réalité fictif, cet article ambitionne de donner une vue d'ensemble de ce type de projets. Cet article est très largement inspiré du chapitre 14 de "Energie thermique, houlogénération et technologies de conversion et de transport des énergies marines renouvelables" écrit par M. J Courault [1]

1. Introduction

Dans le contexte du réchauffement climatique planétaire, il est devenu évident que la part des énergies renouvelables devait progresser dans la production globale d'électricité.

En France, le potentiel des centrales hydrauliques est déjà arrivé à maturité. Il faut donc se tourner en particulier vers le solaire, l'éolien ou l'hydrolien. Depuis quelques années, les filières solaire et éolienne sont explorées mais il est manifeste que le domaine de l'hydrolien est pour l'instant sous utilisé.

En effet, avec son potentiel de 3,5 GW, soit plus de deux fois la puissance installée du futur EPR de Flamanville, la filière hydrolienne française peut jouer un rôle non négligeable dans l'approvisionnement électrique du pays.

On trouve dans la littérature [2,3], de nombreuses informations sur l'énergie hydrolienne mais il existe peu d'articles de synthèse sur les projets d'implantation de ces installations.

Dans cet article, nous présentons l'étude de cas d'une ferme d'hydroliennes d'une puissance globale de 10 MW constituée d'une vingtaine d'hydroliennes de puissance unitaire de 500 kW.

Bien que ce parc soit en réalité fictif, nous basons notre étude sur des données réalistes présentes dans la littérature. Nous passons en revue les solutions technologiques qui pourraient être envisagées dans un projet d'une telle envergure sur toute la chaîne de conversion de l'énergie en partant des machines installées jusqu'à la connexion au réseau EDF.

Les détails de la connexion au réseau et particulièrement tous les aspects de filtrages seront

développés dans la seconde partie de cet article qui paraîtra dans un prochain numéro de la revue 3EI.

2. Caractéristiques du site naturel envisagé

Nous savons depuis longtemps qu'en France il existe plusieurs lieux favorables aux hydroliennes, le raz de Blanchard ou le site de Paimpol-Bréhat choisi par EDF [2,3] pour l'installation de son parc d'hydroliennes pilotes, sont de bons exemples en la matière.

Ces sites constituent des goulets de faibles profondeurs (jusqu'à 40 m) et possèdent des vitesses maximales de surface de l'ordre de 3 à 5 m/s à marée montante (en général ces vitesses sont plus importantes à marée montante qu'à marée descendante). Les profils de vitesses classiques sont homogènes sur la verticale, avec une légère augmentation des vitesses vers la surface du fait d'une part, des frottements sur le fond et d'autre part, des effets du vent sur la surface libre de l'eau. Il existe parfois des goulets immergés de profondeur supérieure à 40 m mais les technologies ne sont pas encore mures pour l'exploitation.

Nous retiendrons donc pour notre étude de cas un site avec des vitesses maximales de surface de 5 m/s exploitant un flux bidirectionnel correspondant à des marées d'une durée approximative de 6h00.

3. Dimensionnement des hydroliennes

3.1. Dimensionnement mécanique

Les puissances des éoliennes étant généralement comprises entre 300 kW et 5 MW, on peut supposer que les hydroliennes suivront une semblable évolution dans les décennies qui viennent. A titre d'exemple, la

puissance unitaire des générateurs Open Hydro de la ferme hydrolienne de Paimpol-Bréhat est de 500 kW.

L'énergie primaire utilisée par les hydroliennes provient soit des courants de marée, soit des courants océaniques. Ces derniers sont bien plus constants mais leur profondeur ne permet d'envisager leur exploitation qu'à long termes. Nous nous limiterons donc aux courants de marée, flot et jusant, dont l'exploitation est plus immédiate. Dans chaque région du monde les marées sont différentes, en France, sur la côte atlantique les marées de type semi diurne à irrégularité bimensuelle ont généralement des marnages dont les maxima et les minima varient de 1 à 2 et cela sans évoquer les marées d'équinoxe. Il est facile de parler des marnages, un peu moins des courants résultants mais en première approximation pour un site donné, on peut dire que les courants de marée sont proportionnels à la dérivée, par rapport au temps, du marnage.

La capacité d'exploitation de l'énergie primaire disponible dépend directement des caractéristiques de l'hydrolienne choisie (dimensions, puissance, vitesse de rotation et la profondeur d'immersion ...) qui sont à déterminer en fonction de la vitesse des courants [4], [5].

La puissance de l'hydrolienne peut être appréhendée à partir de la puissance cinétique d'un fluide traversant un disque de section S est donnée par :

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3$$

ρ masse volumique de l'eau de mer 1025 kg/m³.

S section couverte par l'hélice en m².

V vitesse du courant m/s.

Malheureusement cette puissance n'est pas totalement disponible car la vitesse amont du fluide n'est pas nulle et le théorème d'Albert Betz (en 1920) montre que le maximum de puissance est donné par :

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \cdot C \approx 238,53 \cdot D^2 \cdot V^3$$

Où le coefficient C est égal à 16/27 (rendement hydrodynamique maximal).

Le premier graphique de la figure 1 montre l'évaluation de la puissance théorique en fonction de la vitesse du courant, pour différents diamètres de l'hélice. Compte tenu de la masse volumique de l'eau, on notera que cette puissance est, à diamètres identiques, de plusieurs ordres de grandeurs supérieures à celle des éoliennes.

En faisant l'hypothèse d'une vitesse du courant de marée évoluant de manière sinusoïdale avec une amplitude de 5 m/s (second graphique de la figure 1), on trouve que pour un diamètre de l'hélice de 3 m, sans écrêtage de la puissance, la puissance moyenne sur 12

heures est de 113,89 kW soit 42% de la valeur Crête (graphique 3 figure 1).

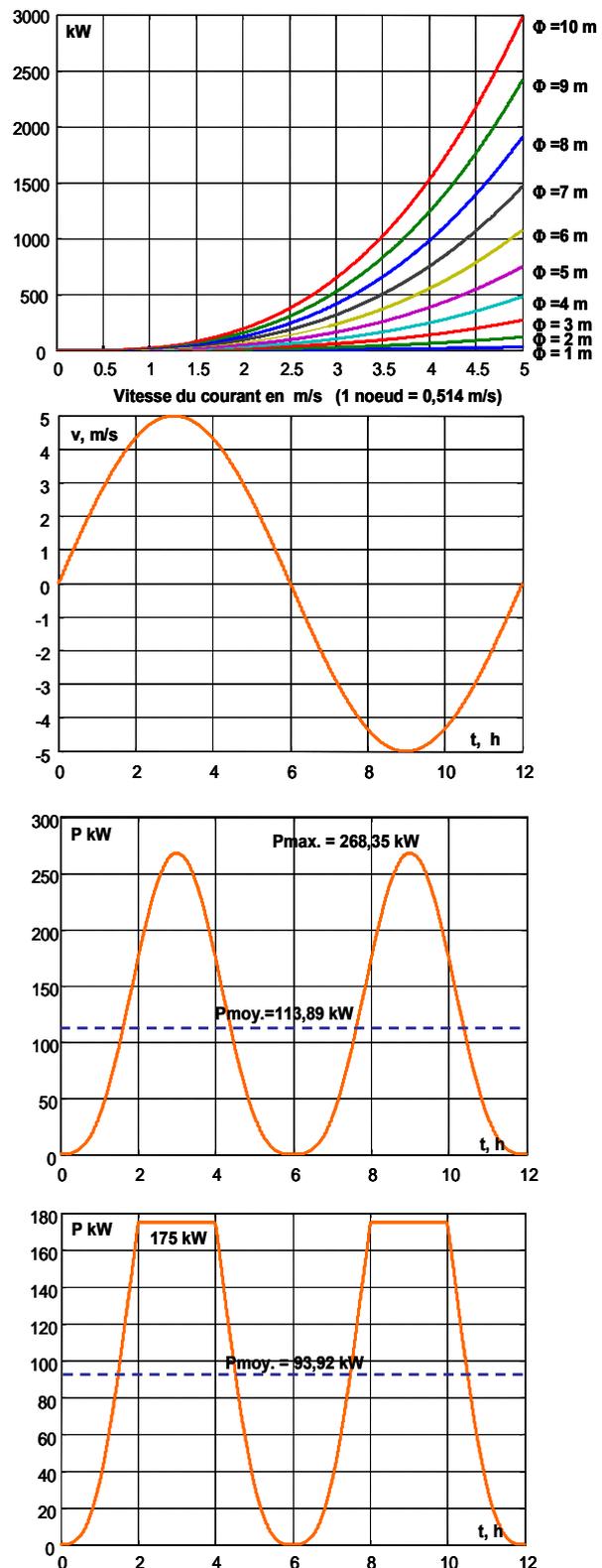


Figure 1. Puissance en fonction du temps avec un diamètre de l'hélice de 3 m.

Cette puissance d'origine mécanique qui doit être injectée sur le réseau est donc caractérisée par des

oscillations très importantes qu'il est souhaitable de limiter.

Cette limitation peut être réalisée mécaniquement par l'utilisation de pas variable des pales mais aussi, lorsque cette première méthode n'est pas possible, en écrêtant la puissance électrique à l'aide de convertisseurs. Dans le cas étudié (graphique 4 figure 1), avec écrêtage à 175 kW nous arrivons à une moyenne de 93,92 kW soit 53,7% de la valeur crête (175 kW). La régulation de puissance est, dans ce cas, l'une des fonctionnalités importantes du convertisseur machine.

Cette stratégie revient donc à être capable de faire fonctionner l'installation à puissance constante. IL faut donc réduire le couple quand la vitesse augmente. Pour réaliser ce type de fonctionnement deux stratégies sont envisageables selon les possibilités offertes par la génératrice.

- Si le flux inducteur est directement réglable (machines synchrones à rotor bobiné), on peut, au-delà du seuil de vitesse, réduire le flux inducteur, ce qui est favorable au dimensionnement (en tension) du convertisseur statique.

- Si le flux inducteur n'est pas réglable (machines à aimants permanents), on peut obtenir un fonctionnement à puissance maximale constante, à moindre surdimensionnement du convertisseur statique, grâce à un contrôle spécifique des courants et de leur déphasage dans les limites permises par les caractéristiques électriques des machines.

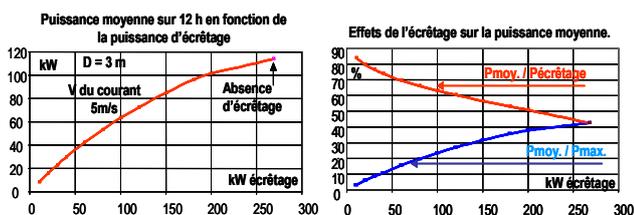


Figure 2. Puissance, avec ou sans écrêtage.

Bien que l'écrêtage permette de limiter l'amplitude des fluctuations de puissance, il faut envisager un dispositif supplémentaire capable de boucher le trou de puissance entre deux écrêtages, en injectant avec un dispositif de stockage, l'énergie manquante. Soit par exemple un écrêtage à 67,5 kW (le but étant d'avoir la possibilité d'envoyer sur le réseau une puissance constante), tous calculs faits, avec les hypothèses des lignes précédentes, on trouve qu'il faudrait une énergie d'environ 600 MJ. Le stockage d'une telle énergie est aujourd'hui économiquement difficilement réalisable. Il faut donc envisager de mettre sur le réseau la totalité de la puissance hydrolienne, avec des limitations pour les courants exceptionnellement forts (équinoxes par

exemple) et également des limitations imposables par les gestionnaires de réseau.

- Pour l'électronique le dimensionnement sera fait sur les valeurs maximales de puissance (constantes de temps faibles).

- Si les fluctuations de la puissance sont sur des échelles de temps suffisamment courtes devant les constantes de temps thermiques des machines, la puissance efficace peut être considérée comme dimensionnante. Mais si les fluctuations sont plus lentes, ce qui est le cas avec les cycles de marées, le dimensionnement doit prendre en compte la puissance maximale.

La machine est dimensionnée selon des considérations de couple, de vitesse de rotation et de fréquence, le choix du diamètre de l'hélice détermine alors la puissance, la vitesse de rotation et le couple, on peut faire, en partant du diamètre, une estimation sommaire de la vitesse de rotation, en admettant que la vitesse maximale en extrémité de pale est de 10m/s [5] (il s'agit d'une limite pour éviter la cavitation), figure 3.

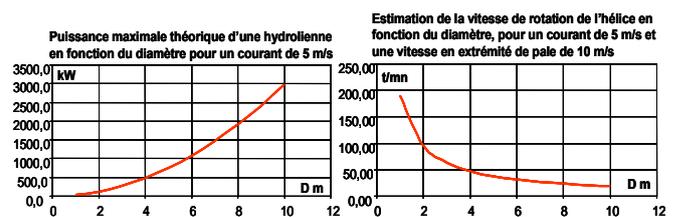


Figure 3. Puissance, vitesse de rotation.

D m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P kW	29,8	119,3	268,3	477,1	745,4	1073,4	1461,0	1908,2	2415,1	2961,6
Ω rpm	190,99	95,49	63,66	47,75	38,20	31,83	27,28	23,87	21,22	19,10
p	8	14	20	26	32	38	44	52	58	64
F Hz	25,46	22,28	21,22	20,69	20,37	20,16	20,01	20,09	20,51	20,37

Tableau 1. Possibilités d'entraînement direct de la machine (ordres de grandeur).

- Le tableau 1 suggère un certain nombre de possibilités, polarité / fréquence, en fonction de la vitesse. Le choix des polarités a été fait en tenant compte de la fréquence maximale, pour la puissance maximale, 20 Hz (figure 3). Pour les petits diamètres 1m, 2m au maximum, on peut avoir quelques hésitations entre machines asynchrones et machines à aimants permanents. Mais pour les diamètres supérieurs, la machine à aimants est mieux adaptée. Ces machines sont généralement des machines annulaires, conséquence d'un grand nombre de pôles. Cela présente l'inconvénient d'avoir un générateur de fort diamètre susceptible de « faire de l'ombre » aux hélices et d'affecter les performances de la conversion. Si ce problème apparaissait il faudrait probablement envisager de vrais générateurs annulaires en disposant

les aimants sur une couronne en extrémité des pales et le stator sur une couronne externe pour que la génératrice reste discrète et ne gêne pas les écoulements. Il s'agit de technologies à entraînement circulaire consistant en l'intégration d'une machine synchrone à aimants à une roue hydraulique « rim driven ». Les parties actives de la machine sont ainsi placées en périphérie de la roue hélice (rotor à aimants) et dans une tuyère (le stator canalise le fluide). Cette architecture qui semble prometteuse fait l'objet de réalisations industrielles.

On peut également envisager des machines plus classiques, en introduisant entre l'hélice et la machine un multiplicateur. Le tableau 2 montre les rapports de multiplication, polarités et fréquences, envisageables dans ce cas.

Ω t/min	190,99	95,49	63,66	47,75	38,20	31,83	27,28	23,87	21,22	19,10
Multiplicateur	8	16	24	32	28	32	38	32	36	40
Vitesse en Sortie	1527,9	1527,9	1527,9	1527,9	1069,5	1018,6	1036,8	763,9	763,9	763,9
p	2	2	2	2	3	3	3	4	4	4
F Hz	50,9	50,9	50,9	50,9	53,5	50,9	51,8	50,9	50,9	50,9

Tableau 2. Multiplicateur/polarité, pour arriver à des fréquences proches de 50 Hz.

Même en augmentant la polarité, pour les vitesses faibles, le rapport de multiplication est élevé... Une solution asynchrone / multiplicateur, n'est raisonnablement acceptable que pour les petites puissances pour lesquelles $\Omega > 150$ t/min.

3.2. Technologies des Machines tournantes

Les considérations précédentes sur le dimensionnement de hydroliennes nous conduisent, a priori, vers le choix d'un entraînement direct réalisé avec une machine synchrone à aimants permanents à grand nombre de paires de pôles. Nous allons approfondir cet aspect afin de voir si cette solution est unique et quelles en sont les conséquences sur la chaîne de conversion électrique.

- Une première conséquence de l'entraînement direct, est la taille de la machine. En effet du fait du grand nombre de pôles, on obtient une machine assez grosse. A contrario, avec un entraînement indirect, la machine peut être optimisée par un multiplicateur de vitesse de manière à réduire la polarité de machine (entre 4 et 8 pôles). Cette machine sera de taille plus réduite mais la présence du multiplicateur est pénalisante (masse, fiabilité, risque écologique de l'huile)).

- La seconde conséquence concerne la fréquence de fonctionnement du convertisseur statique.

En effet ces convertisseurs peuvent être envisagés avec plusieurs types de composants, principalement des IGBT ou des IEGT. Ils sont de la même famille, disons simplement qu'un IGBT a de faibles pertes de commutation et de fortes pertes en conduction, pour l'IEGT, c'est le contraire. De plus ils peuvent être utilisés sous la forme de modules ou sous une forme pressée, figure 4.



Figure 4. IGBT et IEGT, deux technologies de boîtiers.

La technologie, dite module est la plus classique et la plus utilisée (coût plus faible et mise en œuvre plus simple), le refroidissement simple face et la technologie interne rendent ce composant sensible (durée de vie) aux fluctuations de pertes qui engendrent un cyclage thermique. Du fait des constantes de temps thermiques internes, on constate des vieillissements prématurés jusqu'à une fréquence de fonctionnement de 15 Hz, d'où la nécessité d'un déclasserement en puissance pour arriver à une durée de vie satisfaisante. Les composants pressés sont, comme les thyristors, refroidis par les deux faces et leur technologie interne est plus robuste.

Mais leur mise en œuvre est complexe : à l'intérieur du boîtier on trouve dix ou douze ensembles IGBT ou IEGT / diode qu'il convient de presser et de refroidir de manière homogène. Cela conduit à des systèmes de serrage et de refroidissement soigneusement élaborés et délicats. Les composants pressés acceptent les cyclages thermiques beaucoup mieux que les modules.

Donc, pour des raisons de fiabilité, on recherchera, pour les entraînements directs, un couple vitesse / polarité susceptible de donner une fréquence moyenne comprise entre 20 Hz ou 30 Hz. Pour les entraînements indirects on recherchera une fréquence maximale inférieure à 100 Hz (cette limite se justifie par la fréquence MLI de découpage qui devra être limitée entre 1000 et 2000Hz (pour limiter les pertes de commutation)).

Deux familles de machines tournantes sont donc a priori envisageables, les machines à flux propre (synchrones classiques à inducteur bobiné ou synchrones à aimants permanents) et les machines à flux induit (asynchrones).

a) Machines à flux propre

- Machines synchrones à rotor bobiné (MSRB).

Elles sont classiques, bien connues et largement utilisées à vitesse variable (fréquence variable), dans l'industrie : gros ventilateurs, grosses propulsions des navires, laminoirs et bien sûr dans les éoliennes.

Pour l'application aux hydroliennes, c'est une solution qui ne sera pas retenue. En effet, les deux solutions classiquement retenues pour contrôler le courant d'excitation de la roue polaire sont incompatibles avec l'application aux hydroliennes.

- L'alimentation du rotor par le système de bagues et de balais pose des problèmes d'usure et de maintenance.

- La solution qui consiste à une alimentation sans bagues ni balais avec une génératrice asynchrone inversée et un redresseur tournant ne convient pas à une application qui nécessite une inversion du sens de rotation.

- Machines synchrones à aimants permanents (MSAP). Il s'agit d'une technologie relativement nouvelle en forte puissance (au-delà de quelques MW), les machines synchrones classiques peuvent être utilisées à fréquence fixe (alternateurs ou compensateurs), les machines à aimants sont généralement associées à une conversion statique. Le début de leur développement, lié à l'électronique de puissance, n'a pas trente ans. Les applications typiques de ses machines sont les propulsions des navires, de surface et des sous-marins, elles sont de plus en plus utilisées dans les éoliennes. Avec les aimants il est bien évident que la désexcitation pose quelques difficultés, mais elle n'est pas obligatoire pour les hydroliennes.

Les avantages des machines à aimants sont nombreux :

- Les machines sont autonomes, sans excitation, dès qu'elles sont entraînées elles peuvent produire de l'énergie.
- Elles sont beaucoup plus compactes que les machines classiques.
- Les couples de court-circuit sont faibles.

Mais elles sont relativement coûteuses quels que soient les aimants utilisés (Samarium Cobalt ou Néodyme Fer Bore) et nécessitent, pour être compactes, des terres rares...

b) Machines à flux induit.

- Machines asynchrones à Cage (MAS). La machine asynchrone à cage est la plus répandue entre quelques watts et 5 MW. Elle est simple, robuste et

attrayante, mais elle n'a pas de flux propre, il faut donc lui fournir de la puissance réactive.

- Machines asynchrones à rotor bobiné (MADA). Dans le cas présent on parlera de machines à double alimentation (Doubly Fed Generator). L'intérêt de cette solution réside dans le dimensionnement réduit de l'électronique de puissance. En général elle est utilisée pour des variations de vitesse de +/- 20% autour de la fréquence de synchronisme : ainsi la puissance le dimensionnement du convertisseur rotorique est réduite. Ce convertisseur peut également fournir, au travers du rotor le réactif nécessaire : pour la magnétisation de la machine et pour le réseau.

Cette solution est très utilisée sur éoliennes, elle suppose un multiplicateur de vitesse pour tomber sur des polarités intéressantes (4, 6 ou 8 pôles), c'est donc une solution « grande vitesse ». Les faibles vitesses relativement à la vitesse de synchronisme (forts glissements) augmentent la tension rotorique donc le dimensionnement du convertisseur n'est plus attrayant. Il est donc évident que cette machine peut éventuellement avoir un intérêt dans les applications hydroliennes.

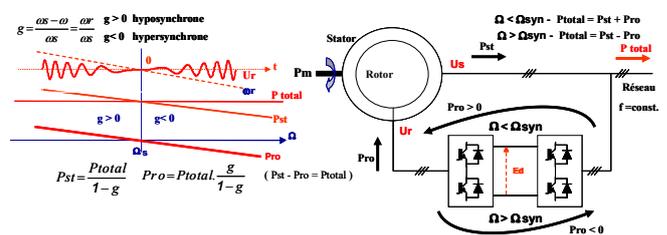


Figure 5. Machine asynchrone à double alimentation.

Il s'agit, d'une machine construite comme une machine asynchrone, excitée en amplitude et fréquence variable. La fréquence statorique est constante, c'est par l'excitation que l'on maintient la pulsation du champ tournant à une valeur égale à la fréquence du réseau d'alimentation. Par rapport à un alternateur classique, synchrone, cette machine présente l'avantage d'une très grande dynamique (variations rapides de P et Q possibles, sous réserve d'un contrôle performant) puisqu'elle n'a pas d'amortisseurs. Cette machine asynchrone, excitée à fréquence variable devient en fait une machine synchrone généralisée.

Le principal inconvénient réside dans l'alimentation du rotor par des bagues et des balais. Une autre difficulté apparaît avec les dimensions faibles de l'entrefer qui pose des problèmes pour des machines soumises à des vibrations et des chocs.

Enfin, on peut aussi envisager les machines à Réductance variable (MRV). Leur variété de structures électromagnétiques est grande, on peut de façon simplifiée retenir deux familles, celles dites synchrones à réductance variable alimentées comme les machines synchrones excitées, et celles à double saillance (statorique et rotorique) que l'on alimente plutôt en courants unidirectionnels pour des onduleurs en demi-ponts asymétriques. Bien que le rotor ne comporte ni aimants permanents ni enroulement d'excitation, on peut les utiliser en mode générateur à condition de les magnétiser avec un onduleur qui leur fournit de la puissance réactive (comme les machines asynchrones). Les performances sont d'autant meilleures que les variations de leurs inductances propres sont élevées. La construction est simple (rotor denté sans conducteurs ni aimants) mais elles requièrent plus de masse que les machines synchrones excitées pour avoir des performances comparables. Les machines à double saillance permettent aisément d'avoir de grands nombres de pôles et peuvent être envisagées pour des entraînements directs à basse vitesse, mais leur entrefer doit alors être faible devant le pas polaire ce qui peut poser des problèmes lorsque les contraintes mécaniques sont fortes.

	MSAP	MSRB	MRV	MAS à cage	MADA
Compacité	++	-	--	Multiplicateur	Multiplicateur
Robustesse	++	-	+++	-	-
			Malgré la faiblesse de l'entrefer		
Cos ϕ	0,95	1	0,8	0,86	1
Adéquation avec le convertisseur	++	++	-	-	+
Opération sur réseau isolé	-	+++	--	-	++
Rendement	93 %	91 %	94 %	93 %	95 %

Tableau 3. Classement qualitatif des machines

Le tableau 3 rassemble les principales caractéristiques des différentes machines tournantes envisagées. Il apparaît alors que la solution la plus pertinentes pour l'application aux hydroliennes reste la MSAP.

3.3. Onduleurs de tension en Modulation de Largeur d'Impulsion

a) Aspects thermiques et prix des composants

Pour les fortes puissances nécessaires pour des installations de plusieurs dizaines de kW on trouve, chez la plupart des grands constructeurs d'IGBT les tensions suivantes : 600V, 1200V, 1700V, 3300V,

4200V, voire 6500V, mais le bon choix est aussi fonction des quantités produites par les constructeurs pour répondre aux différents marchés (coût et fiabilité du fait du retour d'expérience). On peut dire qu'au début des années 2000 les composants 3300 V étaient les meilleurs sur un plan technico-économique (du fait du marché de la traction ferroviaire), avec des intensités de définition comprises entre 200 et 2400 A. Ces intensités ne sont que des points de repère, en fait, c'est la température de jonction, dans l'application, qui fixe le calibre en courant, donc l'ensemble des pertes (commutation et conduction) et les performances de refroidissement. La température, pour assurer une bonne fiabilité sera dans tous les cas, dits nominaux, de l'ordre de 90°C à 100°C, sachant que la température maximale est, suivant les constructeurs, de 125°C ou de 150°C. Il reste donc une petite marge pour des transitoires exceptionnels.

Dans les lignes précédentes nous avons évoqué le problème du cyclage thermique, la figure 6, montre les indications d'un constructeur (EUPEC) sur ce point pour une technologie de type module.

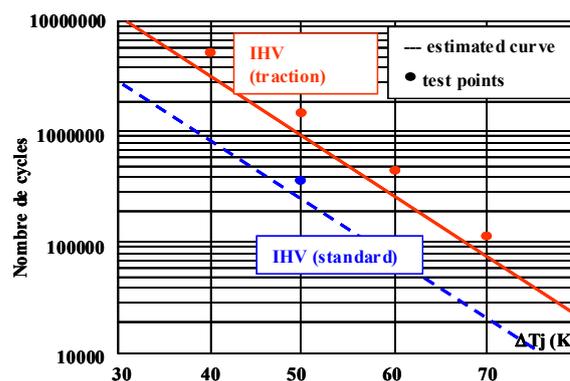


Figure 6. Nombre de cycles supportables en fonction de l'amplitude des fluctuations de température de jonction (Extrait de la documentation EUPEC).

Il s'agit du nombre de cycles de la température de jonction. Il est bien clair qu'un générateur alimentant un convertisseur (MLI) à basse fréquence (10 Hz par exemple) va engendrer les fluctuations de température de jonction dans la demi-période. L'évaluation de ces variations ne peut être faite qu'en prenant en compte l'ensemble des constantes de temps thermiques de l'IGBT lui-même et du refroidisseur. C'est la raison pour laquelle une fréquence machine supérieure ou égale à 20 Hz est souhaitée pour rester dans un domaine classique d'utilisation : à 20 Hz l'amplitude des fluctuations de température est plus faible et le cyclage est réduit. Cela dit, rien ne s'oppose à des fréquences plus basses, mais du fait du cyclage il faudra déclasser les IGBT (prendre un calibre en courant plus fort) de manière à réduire les pertes,

réduire les résistances thermiques, et accroître l'inertie thermique pour limiter les variations de température à un niveau compatible avec la durée de vie souhaitée de l'équipement.

Outre le cyclage thermique dû à la fréquence machine que nous venons d'évoquer, mais il faut également prendre en compte celui imposé par le procédé. La prise de conscience des problèmes de cyclage a commencé avec la traction ferroviaire, et plus particulièrement les applications métro et tramway. Du fait des inter-stations courtes, un métro accélère puis freine et s'arrête (~40s) en permanence. Dans le cas des hydroliennes ce cyclage est sans doute négligeable.

b) Tensions des convertisseurs

A vitesse variable, les machines tournantes triphasées sont dans tous les cas alimentées par des convertisseurs MLI. La figure 7 représente les formes d'onde de tension typiques aux bornes des machines. Le convertisseur triphasé pris en compte est classique avec une tension d'alimentation continue de 1000 V.

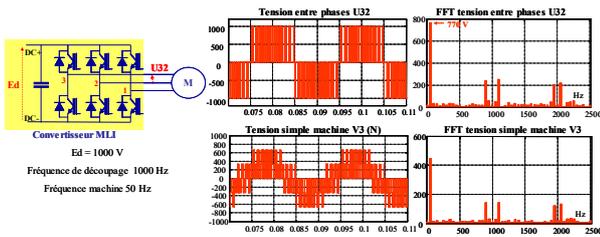


Figure 7. Tensions machine.

Plus précisément, pour un convertisseur (MLI) en source de tension, la tension maximale de sortie est égale à la tension continue Ed.

$$\text{Donc } E_d \geq U_s \text{ max.} \cdot \sqrt{2}.$$

La tension appliquée à un IGBT, à l'état bloqué est Ed. En fait il doit être tenu compte des surtensions de commutation qui conduisent traditionnellement à dimensionner les IGBT au double de Ed (le surdimensionnement en tension est fonction de la puissance des équipements, en petite puissance, la compacité de l'ensemble bus IGBT, permet un surdimensionnement moins important, de l'ordre de 1,5, mais pour les équipements plus puissants, la compacité évoquée est plus faible, donc avec des inductances plus fortes, d'où un surdimensionnement de 2).

Ainsi pour une tension de sortie de 400 V, Ed=566 V le choix du calibre en tension est de 1200 V. Le tableau 4 reprend ce calcul en choisissant une tension, a priori, en fonction de la puissance de manière à obtenir des couples courant / tension compatibles avec les IGBT du marché.

Rendement 0,94 et cos Φ = 0,9

D m	1	3	5	6	7	8	9	10
P kW	29,82	268,35	745,41	1073,39	1461,00	1908,24	2415,12	2981,63
Us	400	400	600	800	1000	1100	1100	1100
Is	50,87	457,83	847,83	915,66	997,05	1183,88	1498,35	1849,82
Ed calcul	565,69	565,69	848,53	1131,37	1414,21	1555,63	1555,63	1555,63
Ed retenu	600	600	850	1200	1500	1600	1600	1600
U IGBT	1200	1200	1700	2400	3300	3300	3300	3300

Limite en courant pour un IGBT 3300 V- 1200 A

Tableau 4. Choix des tensions IGBT en génération hydrolienne (avec une vitesse du courant de 5 m/s).

Ainsi il existe aux bornes de la machine une succession de fronts raides, à la fréquence de découpage (1000 Hz sur la figure 7), susceptibles d'exciter des fréquences propres, donc des surtensions à l'intérieur des bobinages et d'engendrer des courants capacitifs, entre conducteurs et entre conducteurs et la masse, qui affectent les systèmes d'isolation. La commutation des IGBT produit des dV/dt qui sont de l'ordre de 4000 V/μs. Des normes basées sur l'expérience des constructeurs de machines montrent que la valeur maximale acceptable des dV/dt, pour une bonne durée de vie des isolants, est des 500 V/μs, d'où la nécessité d'un filtrage.

Pour des puissances considérées inférieures à 1800 kW, la structure 2 niveaux de la figure 7. est bien adaptée, même si les courants sont relativement élevés pour des composants de calibre de 1200 A, dans ce cas il conviendra de mettre deux IGBT en parallèle (ce qui est classique).

Si les puissances unitaires des hydroliennes devraient croître, il faudrait alors adopter d'autres structures de convertisseurs, augmentant ainsi soit les courants, soit les tensions.

Sur la gauche de la figure 8., il s'agit d'associations de composants en série ou en parallèle. Cela semble simple mais c'est en fait assez compliqué, car l'équilibrage des tensions ou des courants n'est fonction que de leurs caractéristiques (statiques et dynamiques) et il est bien évident que cet équilibrage est également fonction de la technologie. La mise en série, est pratiquée, mais c'est l'association la plus délicate : elle nécessite des dispositifs statiques d'aide (snubbers et inductances saturables) à l'équilibrage des tensions, dispositifs qui hélas sont dissipatifs.

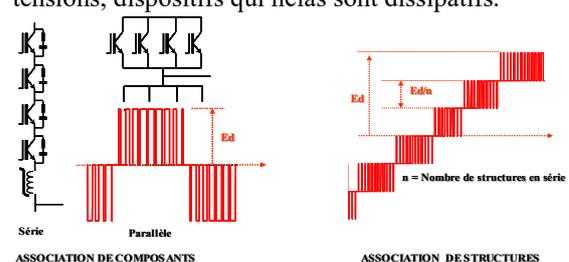


Figure 8. Structures multi-niveaux : augmentation de la puissance des convertisseurs.

Sur la droite de la figure 8. il s'agit d'association de structures en série. Plusieurs avantages sont à noter. Le premier est bien sûr en relation avec l'équilibrage des tensions : les schémas mis en œuvre, figure 9. assurent un équilibrage naturel entre lesdites structures, les composants élémentaires sont donc utilisés de manière classique et simple. Le second avantage est en relation avec les charges alimentées, machines ou transformateurs, qui sont ainsi alimentées par des tensions plus élaborées, ce qui facilite le filtrage et/ou la réduction des dV/dt .

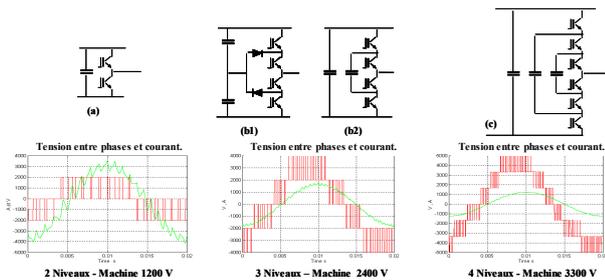


Figure 9. Alimentation d'une machine synchrone 5MW - $X=20\%$ (X réactance inverse subtransitoire en %), par différents types d'onduleur (un seul bras représenté) - Fréquence de découpage 1 kHz

A gauche la structure (a) dite deux niveaux est la plus classique, elle a servi de référence dans les lignes qui précèdent. Noter que la machine perçoit directement la fréquence de découpage des IGBT et il en résulte une certaine ondulation du courant machine, à cette fréquence (sur une machine asynchrone on retrouve les effets de ces ondulations dans la cage, sur une machine synchrone classique, dans les amortisseurs, les amortisseurs jouent un rôle nuisible dans les machines synchrones autopilotées et alimentées par onduleur de tension).

Au milieu de la figure 9, la structure (b2) est dite multiniveaux à cellules imbriquées, avec 3 niveaux. Chaque interrupteur travaille avec une fréquence de découpage (f_m) de 1 kHz, mais du fait de l'imbrication, la fréquence de découpage perçue par la machine est de 2 kHz, d'où une réduction de l'ondulation sur les courants. Il doit être noté que dans le cas (a) l'amplitude des échelons de tension aux bornes de la machine est E_d , dans le cas (b2) elle n'est que $E_d/2$, ce qui est appréciable pour les charges alimentées (dV/dt plus faibles). De plus il doit être signalé que l'équilibrage de la tension aux bornes du condensateur flottant ($E_d/2$) est naturel.

La structure (b1) est aussi une structure trois niveaux, c'est même la plus pratiquée, elle est dite NPC (*Neutral Point Clamped*). Elle peut donner les mêmes résultats que la topologie (b2), mais elle est le plus souvent contrôlée différemment, les interrupteurs

centraux fonctionnent à une fréquence de découpage plus faible. Les conséquences sur les charges alimentées sont minimales, et les pertes de commutation sont réduites.

La structure (c) est du type multiniveaux à cellules imbriquées, avec quatre niveaux. Dans ce cas la machine perçoit une fréquence de découpage qui est égale à trois fois la fréquence des IGBT, l'ondulation sur les courants est donc faible ce qui est particulièrement visible sur la figure 9. Là encore le maintien de la tension aux bornes des condensateurs flottants est naturel ($E_d/3$ et $2E_d/3$). C'est dire qu'un contrôle de ces tensions n'est pas nécessaire, pour autant qu'il existe un courant actif.

En conclusion, nous retiendrons que la structure 2 niveaux de la figure 7 conviendra très bien aux machines synchrones à aimants permanents envisagées pour notre application. Toutefois, pour des puissances plus élevées, on choisira des structures plus complexes comme les NPC.

4. Fermes d'hydroliennes et connexion au réseau EDF

4.1. Disponibilité de l'énergie ou, à défaut, sa prédictibilité

L'énergie hydrolienne, bien que fluctuante a pour avantage d'être prédictible et est donc susceptible d'être très intéressante pour les gestionnaires de réseaux à hauteur de 3 à 10%... Cela est parfaitement réaliste, il a été estimé que 25 TWh annuels seraient disponibles sur le littoral atlantique français (Raz Blanchard, Passe du Fomveur...).

4.2. Stabilité de l'énergie fournie.

C'est au niveau des fermes de production qu'il importe de faire le lissage de la puissance en prenant en compte le foisonnement des puissances fournies par les différents générateurs. Dans le cas des hydroliennes, la prise en compte des décalages entre les marées (entre Ouessant et Dunkerque il y a 30 min de décalage) contribue aussi à ce lissage. Il est évident que ces 30 min sont bien peu si l'on considère qu'avec cette technique le « trou de puissance », à marée haute ou à marée basse est de l'ordre de deux heures... Mais nous sommes en présence d'une production certaine pendant 20 heures, ce qui n'est pas le cas en éolien. Bien sûr il y a des fluctuations avec l'amplitude des marées mais avec les hydroliennes actionnées par les courants des marées, la prévision et la gestion sont possibles.

a) Le contrôle des gradients de puissance.

La valeur des gradients de puissance est en relation d'une part avec la puissance des sources, hydroliennes dans notre cas, et d'autre part avec la puissance des réseaux de raccordement. Il faut donc évoquer la nature des générateurs qui alimentent lesdits réseaux. Quand on injecte de la puissance dans un réseau stable, égalité des puissances consommées et produites, il est nécessaire de réduire la puissance des sources préexistantes pour éviter soit des augmentations de fréquence soit des instabilités (les types d'instabilité possibles sont nombreux, en particulier les oscillations hyposynchrones [6]) : si l'on injecte un mégawatt dans un réseau de 1 GW aucun gradient n'est nécessaire, mais s'il s'agit d'une injection de 200 ou 300 MW la montée en puissance ne peut être instantanée. Si la source préexistante est d'origine nucléaire il lui faudra plusieurs dizaines de minutes pour réagir, si elle est thermique ou hydraulique plusieurs minutes. Pour ce qui concerne la puissance réactive, les temps sont beaucoup plus courts : il ne s'agit que de régler le courant d'excitation des alternateurs [7].

Le contrôle des gradients de puissances active et réactive sont des nécessités pour la stabilité des réseaux, leurs valeurs sont donc fonction de la puissance des générateurs, de la puissance du réseau et de la nature de la production.

b) La stabilité en tension.

Pour assurer la stabilité de la tension il faut gérer la fourniture ou l'absorption de la puissance réactive.

Dans le cas des alternateurs de réseau, le facteur de puissance définit les excitations. Dans le cas des alimentations statiques on règle la puissance réactive en jouant sur l'amplitude des tensions (et pour la puissance active en jouant sur la phase, comme on joue sur l'angle interne avec les alternateurs) : la puissance apparente est alors dimensionnante.

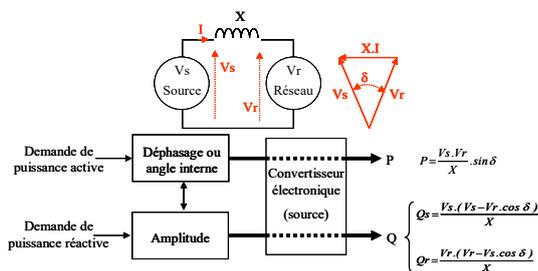


Figure 10. Echanges de puissance entre source et réseau.

En règle générale comme les réseaux absorbent de la puissance réactive, les alternateurs permettent de fournir cette puissance en régime permanent. En revanche, dans le cas des hydroliennes, il peut y avoir de grandes longueurs de câbles capacitifs, et donc une production naturelle de puissance réactive qui peut affecter l'installation. Les différents convertisseurs réseau d'une ferme doivent alors prendre leur part et éventuellement être capable d'absorber ce réactif.

4.3. Liaison continue

Il s'agit de la liaison continue entre les convertisseurs machine et réseau, entre des entités qui fonctionnent à des fréquences différentes. Il s'agit d'un point fondamental, bien que le matériel soit des plus réduits, deux conducteurs et quelques condensateurs. Les condensateurs sont fondamentaux, et la technologie ne l'est pas moins.

Les courants commutés, le facteur de puissance côté alternatif des convertisseurs, ainsi que les composantes inverses des courants alternatifs ont une importance significative sur le dimensionnement des condensateurs du bus continu.

Rem : Le dimensionnement de la liaison continue sera vu en détails dans la partie 2 de cet article.

4.4. Transmission, les schémas possibles

La transmission de l'énergie vers les réseaux de transport ou de distribution est un problème réel tant au plan technique qu'au plan économique. Depuis une dizaine d'années, avec la construction et la mise en service de plusieurs fermes d'éoliennes offshore de grande puissance, un certain nombre de techniques de raccordement ont vu le jour. Elles sont en partie applicables aux hydroliennes.

Pour les hydroliennes, la profondeur entraîne également des difficultés d'installation. La vitesse des courants étant décroissante quand on s'éloigne de la surface [5], la profondeur est un paramètre fonctionnel important, comme la topologie des fonds sur lesquels on dispose les structures...

Les modes de raccordement aux réseaux sont en relation d'une part avec les puissances et d'autre part avec les distances immergées.

a) Première solution pour une dizaine d'hydroliennes

Les convertisseurs de fréquence sont immergés à quelques mètres des générateurs, à une profondeur de 20 à 50 mètres. La liaison avec les machines s'effectue par des câbles courts ($U < 1$ kV) convenablement dimensionnés en courant. Les raccordements machines / convertisseurs s'effectuent au moyen de connecteurs sous-marins.

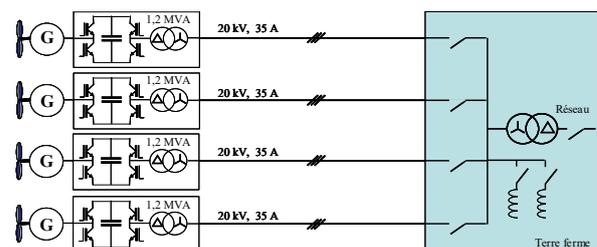


Figure 11. Raccordements individuels, faible puissance.

Les longueurs entre les convertisseurs et le poste de distribution à terre, sont relativement importantes. En effectuant des raccordements individuels, la pose des câbles est simple : en fait les conditions de pose du câble ou des câbles sont déterminantes. Les paramètres suivants permettent de trouver la bonne solution.

- Longueur de câble par touret.
- Nombre de câbles que le bateau câblé peut poser en même temps, dans le même ensoufflement.
- Nature des sols, et profondeur, pour réaliser l'ensoufflement.

Poser plusieurs petits câbles peut avoir un intérêt économique. Dans ce cas les disjoncteurs de chaque hydrolienne sont sur la terre ferme en technologie classique.

La figure 11 retient de manière arbitraire une tension de transport de 20 kV. Il est bien évident que la meilleure tension sera déterminée en fonction du site et des conditions de pose.

b) Pour un plus grand nombre d'hydroliennes

Imaginer un regroupement pour n'avoir, en principe qu'un seul câble à tirer vers la terre, peut avoir un intérêt. Cette solution suppose la mise en place d'une plateforme pour installer les disjoncteurs de protection, les inductances de compensation des capacités des câbles, du matériel de communication.

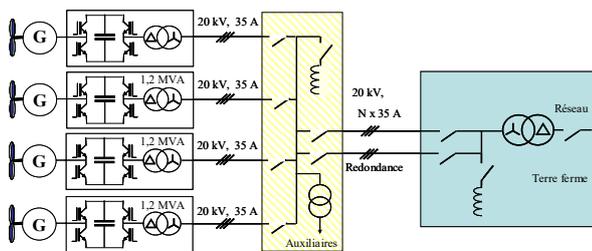


Figure 12. Raccordement avec regroupement en alternatif.

Pour des profondeurs de 20 à 50 mètres le coût d'une infrastructure de relais n'est pas négligeable. Si un tel choix est fait, la plate forme supportera une ou des inductances de compensation des câbles.

Nous avons introduit une redondance entre la plate forme et la terre, il ne s'agit que d'une option.

c) Regroupement en continu

N convertisseurs machines immergés, pour N hydroliennes et un convertisseur réseau sur une plate forme. On pourrait imaginer une économie. En fait ce ne sont pas les convertisseurs immergés qui constituent l'essentiel du coût, mais le conditionnement

d'immersion, ce n'est donc pas en regroupant les convertisseurs réseaux qu'une économie substantielle peut être faite. Cela d'autant plus qu'il est logique d'optimiser les convertisseurs machines, tension et courant : par exemple une tension continue de 1 kV pour une puissance de 1 MW. Dans ce cas un convertisseur réseau unique aurait une puissance de N fois 1 MW, mais avec une tension continue de 1 kV... Les constructeurs proposent effectivement des convertisseurs d'une dizaine de MW, mais pour obtenir ces puissances ils augmentent la tension continue. Autre solution, mettre des convertisseurs en parallèle sur la plate forme...

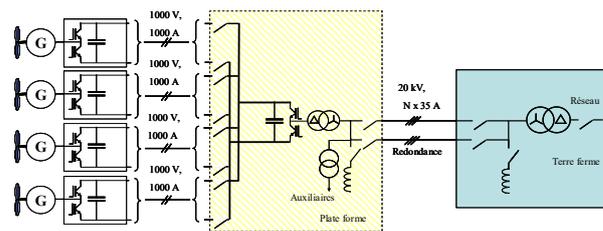


Figure 13. Regroupement continu.

De plus les liaisons entre les modules immergés et la plate forme s'effectuent avec des câbles continus, basse tension (1 kV), fort courant (1 kA), plus coûteux à tous points de vue (câbles eux-mêmes et pose) que les câbles alternatifs.

L'extension du bus à courant continu sur plusieurs centaines de mètres pose problème. L'augmentation de l'inductance entre le convertisseur réseau et les convertisseurs machines peut entraîner des oscillations, voire des surtensions. D'où assez souvent la nécessité d'introduire des dispositifs d'amortissement (RC série, entre les deux polarités, voire un amortissement dynamique). Cette difficulté est commune à d'autres procédés comme la métallurgie par exemple où de grandes quantités de variateurs de vitesses sont alimentés par des bus à courant continu qui peuvent avoir une centaine de mètres. Dans tous les cas la démarche est la même : par la géométrie, par des regroupements de conducteurs, rechercher la minimisation des inductances linéiques. Sur les lignes de la métallurgie on réalise des bus plats et larges, dans le cas présent, seul les regroupements de conducteurs sont susceptibles d'atteindre les objectifs de minimisation des inductances linéiques figure 14., on parle alors de compensation, même si celle-ci est relativement imparfaite.

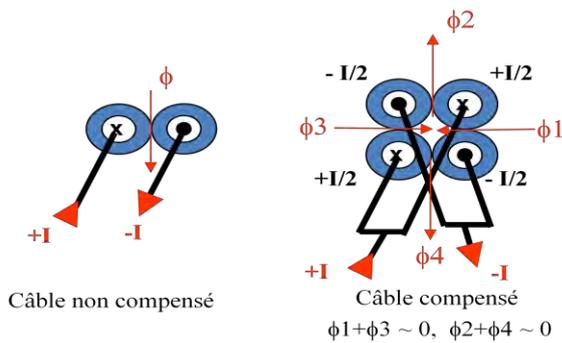


Figure 14. Principe de la compensation des câbles.

Flux magnétique vu par l'environnement et inductance sont liés, la compensation est donc très favorable à la protection du milieu marin.

5. Conclusion

Cet article qui constitue un résumé du chapitre 14 écrit par M. J Courault pour le livre "Energie thermique, houlogénération et technologies de conversion et de transport des énergies marines renouvelables" nous a permis de passer en revue différents aspects de la conception d'un parc d'hydroliennes et de dégager une solution viable pour ce type de projets.

La solution optimale compatible avec l'état de l'art des technologies actuelles reste celle qui utilise les sous-ensembles les plus banalisés (réduction des coûts). D'autant que la plus grosse des difficultés réside dans l'association de composants comme la machine, le convertisseur et les câbles de transmission.

Pour le futur, il convient bien entendu de s'interroger sur les innovations possibles. Génératrice et convertisseurs électronique de puissance sont probablement les éléments qui sous la pression des marchés sont susceptibles de faire évoluer les concepts.

- La génératrice annulaire à aimants permanents est aujourd'hui une vieille idée qui faute de besoins n'a pas été réellement développée et surtout industrialisée.
- Côté convertisseur, une évolution des topologies, entre 500 kW et 2 MW est peu envisageable, nous disposons aujourd'hui d'une pluralité de solutions : les deux niveaux classiques, les trois niveaux de type NPC, les multiniveaux à cellules imbriquées et même les convertisseurs dits matriciels qui apparaissent, il y a quelques années, comme la solution universelle de conversion. L'évolution la plus probable viendra des composants : réduction des pertes, augmentation des températures de jonction.

6. Remerciements

Cet article doit énormément à M. J. Courault qui a gentiment mis à disposition les documents nécessaires à la rédaction de cet article et a bien voulu en effectuer une relecture attentive. Je tiens à lui adresser mes plus vifs remerciements.

7. Références

- [1] COURAULT. J, MULTON et col, Energie thermique, houlogénération et technologies de conversion et de transport des énergies marines renouvelables, Hermes-Lavoisier 2012.
- [2] ABONNEL. C Edf prépare le premier parc hydrolien pré-industriel ; Revue 3EI N°59.
- [3] Energie des mers. Publication ECRIN.
- [4] J.-P. Caron et J.-P. Hautier- *Modélisation et commande de la machine asynchrone. EDITIONS TECHNIP – 1995.*
- [5] J. F. Daviau, H.Majastre, J.Ruer. *Divers aspects de l'exploitation de l'énergie des courants marins. Publication SeaTech Week – 2004.*
- [6] Michel Crappe – *Commande et régulation des réseaux électriques. EGEM – HERMES – LAVOISIER – 2003.*
- [7] Michel Crappe – *Stabilité et sauvegarde des réseaux électriques. EGEM – HERMES – LAVOISIER – 2003.*
- [8] Carson . *Wave propagation in overhead wires with ground return , Bell System technical journal, Vol 5, 1926*
- [9] ANGOT André – *Compléments mathématiques à l'usage des ingénieurs de l'électrotechnique et des télécommunications. Editions de la revue optique 1965.*



LES ARCHIVES DE **La Revue 3E.I.** POUR PARTAGER L'ENSEIGNEMENT DU GÉNIE ÉLECTROTECHNIQUE ET DE L'ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE



1994-1995

- 1 La machine asynchrone (reproduction Xérox)
- 2 Association machine asynchrone et convertisseur statique
- 3 La machine synchrone (reproduction Xérox)

1995-1996

- 4 Influence des convertisseurs statiques sur les réseaux
- 5 L'électrothermie
- 6 Première approche sur les réseaux

1996-1997

- 7 La machine à courant continu
- 8 La conversion d'énergie
- 9 Les composants inductifs et capacitifs en électronique de puissance
- 10 Pratiques pédagogiques et réalités industrielles

1997-1998

- 11 Le transformateur
- 12 Les capteurs
- 13 Le génie électrique dans l'armement
- 14 Pratiques pédagogiques et réalités industrielles

1998-1999

- 15 Les aimants et électroaimants
- 16 L'automatique en électrotechnique
- 17 L'appareillage haute tension
- 18 Pratiques pédagogiques et réalités industrielles

1999-2000

- 19 La traction électrique ferroviaire
- 20 Energies renouvelables
- 21 Moteurs électriques pour applications de grandes séries
- 22 Pratiques pédagogiques et réalités industrielles

2000-2001

- 23 Les automatismes industriels
- 24 L'éclairage
- 25 L'Etat de l'Art en électronique de puissance
- 26 Pratiques pédagogiques et réalités industrielles

2001-2002

- 27 Métrologie : mesures et estimations
- 28 Convertisseurs propres
- 29 Les alimentations et convertisseurs embarqués

- 30 Pratiques pédagogiques et réalités industrielles

2002-2003

- 31 Mesures dans les systèmes électrotechniques
- 32 Applications des micro-ondes de puissance
- 33 L'électronique dans l'automobile
- 34 Applications pédagogiques et réalités industrielles

2003-2004

- 35 L'outil informatique dans l'enseignement
- 36 La problématique de l'énergie, la place de l'électricité
- 37 Applications pédagogiques et réalités industrielles
- 38 Applications pédagogiques et réalités industrielles

2004-2005

- 39 La production décentralisée d'électricité (1)
- 40 La production centralisée d'électricité (2)
- 41 Matériaux magnétiques pour convertisseurs d'énergie
- 42 Pratiques pédagogiques et réalités industrielles

2005-2006

- 43 Les réseaux électriques embarqués
- 44 Réseaux de transport d'énergie
- 45 Matériaux piézo électriques
- 46 Applications pédagogiques et réalités industrielles

2006-2007

- 47 Matériaux électro actifs
- 48 Stockage de l'énergie - 1^{ère} partie
- 49 Stockage de l'énergie - 2^{ème} partie
- 50 Pratiques pédagogiques de l'académie de Lille

2007-2008

- 51 Gisements d'économie d'énergie (1)
- 52 Gisements d'économie d'énergie (2)
- 53 FPGA (Field-Programmable Gate Array)
- 54 Pratiques pédagogiques de l'académie de Toulouse

2008-2009

- 55 Piles à combustible (1)

- 56 Piles à combustibles (2)
- 57 La Cogénération
- 58 Pratiques pédagogiques de l'académie de la région Paca

2009-2010

- 59 L'énergie des Mers
- 60 Les standards de communication
- 61 Les Aspects thermiques dans les convertisseurs
- 62 Applications pédagogiques de l'Académie de Versailles

2010-2011

- 63 Véhicule électrique
- 64 L'avion plus électrique
- 65 Compatibilité électromagnétique (CEM)
- 66 Applications pédagogiques : Académie de Créteil

2011-2012

- 67 L'éclairage
- 68 Défaillance et durée de vie du matériel électrique
- 69 Bâtiment du futur...
- 70 Applications pédagogiques : les STIDD

2012-2013

- 71 Systèmes d'acquisition, matériel embarqué
- 72 Convertisseurs multicellulaires, série, parallèle, de puissance
- 73 Réseaux de transport de l'énergie et liaisons continues
- 74 Réalité Industrielle et Recherche

Le DVD « Archives » est disponible !!!



Voici regroupés tous les articles des numéros 0 à 59, de Mai 1994 à Décembre 2009, sous forme numérique au format pdf (pdf scannés pour les plus anciens et pdf vectoriel pour les plus récents), sur le DVD que vous pouvez commander en remplissant le bulletin de commande suivant. Vous pouvez consulter les thèmes abordés sur cette page.

BON DE COMMANDE >>> A retourner à la SEE - La Revue 3E.I. - 17 rue de l'Amiral Hamelin - 75783 Paris cedex 16 - France - Fax : 33 (0)1 5690 3719

Tarifs au 1 ^{er} janvier 2014 Prix unitaire TTC		
Quantité	France & UE	Hors UE
A partir de :	Prix unitaire	
1 Volume	12 €	14 €
3 Volumes	10 €	12 €
DVD (TVA 19,6%) Archives La Revue 3E.I.		
Individuel	60 €	70 €
Collectivité (CDI, laboratoire...)	100 €	110 €

- Je commande les numéros :
[] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] []
- Et/ou la série complète des années :
[] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] []
- Je commande le DVD Archives

Nom et prénom :

Société : Fonction :

Adresse :

Code postal [] [] [] [] [] Ville : Pays :

Tél. : [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] e-mail :

Je règle la somme totale de : € TTC (TVA 2,10 %)
par chèque bancaire à l'ordre de la SEE
 Carte bancaire (Visa, Eurocard/Mastercard, American Express)
N° Carte : []
Date de validité : [] [] [] [] [] [] [] []
N° cryptogramme : [] [] [] [] [] [] [] [] (3 derniers chiffres au dos de la carte)

Date, signature et cachet s'il y a lieu :

De l'innovation à l'application



enova

PARIS 2014

Le salon des technologies en
électronique, mesure, vision et optique

