Apprentissage par projet :

Réalisation d'une éolienne urbaine en matériaux de récupération

Marie Blondeau, Aline De Greef, Pierre-Alexis Douchamps, Benjamin Genêt, Marc Haelterman, Cyrille Lenders, Erwan Leroy, Pasquale Nardone, Vincent Raman, Aliénor Richard et Frédéric Robert

bapp@ulb.ac.be

Avenue F.D. Roosevelt 50, B-1050 Bruxelles (Belgique)

RESUME : Depuis 2002, la faculté des Sciences Appliquées de l'Université Libre de Bruxelles a introduit dans son cursus l'apprentissage par projet. Chaque année, les étudiants de BA1 (première année ingénieur civil) sont confrontés au défi de réaliser en groupe et sous la supervision d'un étudiant de MA1 (quatrième année) un dispositif technique concret: un lanceur de balles, une lunette de Galilée, un alcootest, etc. Cet article décrit plus particulièrement le projet 2007/08 (à savoir la réalisation d'une éolienne en matériaux de récupération), autant sous l'angle technique que sous l'angle pédagogique.

Mots clés : apprentissage actif, apprentissage par projet, éolienne, développement durable

1 INTRODUCTION

1.1 Contexte

Depuis 2002, la faculté des Sciences Appliquées de l'Université Libre de Bruxelles a introduit dans son cursus l'apprentissage par projet. Cette réforme témoigne de la volonté de passer d'une culture de transmission des connaissances à celle de construction des compétences par les étudiants.

Issue de la pédagogie socio-constructiviste, la pédagogie par projet se base sur la mise en activité des étudiants. Elle a pour principaux objectifs un apprentissage durable et approfondi, le développement de l'autonomie et de la créativité, la promotion de l'interdisciplinarité et la mise en évidence des différentes facettes de la profession. S'appuyant sur le travail en équipe, elle vise à responsabiliser les étudiants envers leurs pairs.

La motivation est également un mot clé de la pédagogie par projet. En effet, le fait de travailler en groupe sur un projet qui mène à une réalisation concrète est un facteur de motivation. De fait, les étudiants seront plus impliqués dans leur travail, ce qui aura pour conséquence un apprentissage plus efficace.

Cet article décrit le projet qui a été soumis en 2007/08 aux étudiants ingénieurs civils de BA1 (première année d'un cursus en cinq ans).

1.2 Présentation générale du dispositif

Le projet est réalisé par groupes de 6 ou 7 étudiants de BA1. Une des originalités de ce dispositif est que chacun de ces groupes (une trentaine environ chaque année) est placé sous la conduite d'un étudiant de 4^{ème} année (MA1), qui reçoit ainsi le statut de "chef d'équipe" (ce qui constitue pour lui-même un projet de 4 ECTS en MA1). Une fois le projet lancé, le chef d'équipe rencontre son équipe au moins une fois par semaine. Son rôle est de mener l'équipe au terme du

projet, tout en veillant au développement des compétences de chacun.

Le chef d'équipe est lui-même encadré par un superviseur (académique). Ce dernier est un membre de la faculté qui, sur base volontaire, encadre un ou deux chef(s) d'équipe au cours d'une année académique. Son rôle est de donner un feedback au chef d'équipe sur le développement progressif de ses compétences et la conduite du projet. De plus, il garantit le bon fonctionnement du projet au cas où le chef d'équipe ferait défaut.

Le projet vise en premier lieu une réalisation concrète, liée à la pratique de l'ingénieur. Les éditions précédentes ont par exemple pris pour thèmes: un lanceur de balles de tennis, une lunette de Galilée (lunette astronomique) et un alcootest.

Le projet 2007/08 a été choisi dans le domaine du développement durable (cette thématique ayant été récemment choisie comme l'un des deux axes stratégiques de la faculté): les étudiants ont pour mission de construire une éolienne, avec la contrainte supplémentaire d'utiliser un maximum de matériaux de récupération.

1.3 Objectifs pédagogiques et compétences développées

Le projet vise certaines compétences transversales classiquement visées en apprentissage par projet, par exemple: apprendre à travailler en équipe, planifier, communiquer, analyser un problème, faire des liens entre la théorie et la pratique ...

De plus, le projet vise à acquérir d'une part des connaissances et compétences disciplinaires, et d'autre part des compétences méthodologiques. En effet, sur le plan technique, le projet est multidisciplinaire, c'est-à-dire qu'il nécessite le développement de compétences issues de différentes disciplines des sciences de l'ingénieur. (Par exemple, construire une éolienne demande des compétences à la fois en mécanique, en électricité,

en réalisation de plans, etc.) L'intérêt de la pédagogie par projet est qu'elle amène les étudiants à découvrir par eux-mêmes les notions nécessaires à la réalisation du projet. Les objectifs méthodologiques, quant à eux, sont des compétences importantes du métier d'ingénieur : la reformulation du problème, la recherche et l'étude de solutions, l'expérimentation, ...

Le chef d'équipe développe également des compétences de différents types : la préparation et l'organisation du travail, le contrôle de son bon déroulement, l'animation de l'équipe et le suivi de son état d'avancement et de fonctionnement. De plus, il se voit confronté à des problématiques classiques en gestion d'équipe: motivation, gestion de conflits, autonomisation, délégation de tâches, etc.

Ainsi, pour les étudiants BA1, comme pour les chefs d'équipe, l'accent est mis sur la gestion du projet tout au long de l'année académique, sur leur capacité à faire des choix réfléchis, à rebondir face aux obstacles rencontrés, ... Dans ce sens, l'évaluation porte elle aussi sur l'évolution du groupe, sa capacité à argumenter ses choix, et à avoir un regard critique sur son propre fonctionnement.

2 L'EOLIENNE EN MATERIAUX DE RECUPERATION

2.1 Enoncé du projet

L'énoncé du projet est rédigé de façon à mettre les étudiants de BA1 dans une situation la plus proche possible de ce qu'ils pourraient être amenés à rencontrer dans leur future vie professionnelle. Pour cette édition 2007/08, situant tout d'abord la problématique environnementale, il propose aux étudiants de devenir des acteurs du défi écologique en s'impliquant dans la construction d'une éolienne en matériaux de récupération. Le projet répond ainsi à deux préoccupations fondamentales : utiliser une source d'énergie renouvelable et recycler des déchets.

L'aspect récupération de ce projet vise deux objectifs :

- Limiter l'énergie grise, c'est-à-dire l'énergie nécessaire à la construction de l'éolienne.
- Permettre une réalisation à bas coût, rentrant dans le budget maximum de 100 EUR par équipe.

Ceci ne constitue cependant pas une contrainte dure et l'utilisation de matériel neuf est également autorisée. Une justification de la nécessité ou de l'intérêt d'acheter du matériel est cependant attendue (meilleur rendement, difficulté de trouver le matériel en récupération, coût négligeable d'une pièce neuve...).

Les autres contraintes importantes du cahier des charges sont les suivantes :

- produire un maximum de puissance électrique ;
- fonctionner quelle que soit la direction du vent ;
- posséder un diamètre maximum d'hélice de 1,60m ;

- être reproductible facilement, c'est-à-dire utilisant des matériaux recyclables aisément disponibles ;
- être transportable montée ou démontée ;
- posséder sur son axe un embout adaptable sur une tête de foreuse (pour la validation, voir point 4).

L'énoncé de départ est volontairement court (2 pages, y compris le contexte) mais renvoie vers différentes ressources externes. Afin d'orienter les étudiants au début du projet, quelques pistes sont suggérées :

- étudier les différents types de génératrice disponibles, en portant l'attention sur le fait que certains moteurs de récupération peuvent également être utilisés en génératrice ;
- étudier les différents types de capteurs éoliens existants en analysant leurs avantages et inconvénients.

Ceci permet aux étudiants d'entrer rapidement dans le vif du sujet en donnant quelques pistes sur ces deux éléments relativement évidents. La partie transmission – faisant le lien entre le capteur éolien et la génératrice – a été laissée volontairement sur le côté pour que les étudiants soient confrontés d'eux-mêmes à cette problématique.

2.2 Parties principales d'une éolienne

Une éolienne est typiquement composée de trois parties jouant un rôle bien déterminé pour transformer l'énergie mécanique du vent en énergie électrique: le rotor, la nacelle et le mât [2]. Ce dernier permet de supporter la nacelle afin d'éloigner le système pales-rotor du sol et de l'exposer à une hauteur optimale par rapport au vent. Dans le cadre du projet, le dimensionnement du mât n'est pas considéré car la taille globale de l'éolienne est limitée par le cahier des charges.

Les parties principales de l'éolienne que nous présentons ci-dessous concernent donc plus particulièrement la partie mécanique de l'éolienne (le rotor et les pales), la partie électrique (la génératrice) et la transmission.

Le récepteur éolien

Les éoliennes peuvent être classées en deux catégories distinctes : les éoliennes à axe vertical et celles à axe horizontal [1][2]. L'appartenance à l'une ou l'autre des catégories dépend des besoins de l'utilisateur de l'éolienne : puissance électrique, rendement, exposition au vent, coût.

La première catégorie (axe vertical) est représentée essentiellement par les éoliennes Savonius et Darrieus. La Savonius est basée sur le principe de traînée différentielle où deux forces opposées appliquées sur deux demi-cylindres en opposition permettent de créer le couple de démarrage.

La Darrieus se base sur la variation de la portance et de la traînée d'un profil dont l'angle d'incidence avec le vent change. Ce principe ne permet pas un démarrage automatique de l'éolienne qui doit disposer d'un système d'entraînement. La conception des pales, profilées, est plus complexe que pour la Savonius ce qui peut augmenter le coût de conception. Pour les éoliennes

nes à axe vertical le générateur peut reposer près du sol et le rotor peut fonctionner quelle que soit la direction du vent. Néanmoins, soumis à plus de turbulence au niveau du sol, l'efficacité de telles machines est réduite par rapport aux éoliennes à axe horizontal.

Dans cette seconde catégorie (axe horizontal), on rencontre les éoliennes « communes » à trois pales qui fournissent une grande puissance (>30 kW) et sont bien équilibrées. Le couple est généré par la portance des pales. Leur nombre peut varier (1, 2, ou plus) en fonction de la vitesse du vent, du coût, du rendement désirés.

Le système de transmission

La transmission permet de faire le lien entre le mouvement du rotor entraîné par la force du vent et la génératrice qui transformera cette énergie mécanique en énergie électrique. Le système de transmission permet aussi d'augmenter la vitesse de rotation à l'entrée du générateur ce qui augmentera la tension induite à la sortie de celui-ci pour un nombre de pôles magnétiques donné (voir point suivant). Un démultiplicateur est ainsi généralement utilisé pour garantir une vitesse de fonctionnement adéquate. Celui-ci est un des points les plus délicats du dimensionnement de l'éolienne lorsqu'on désire obtenir une puissance électrique.

La génératrice

La génératrice est donc la partie de l'éolienne qui permet de convertir l'énergie mécanique fournie par le rotor en énergie électrique [2]. Différents types de machines électriques existent : machines asynchrones, synchrones, à courant continu, moteurs pas-à-pas. Le fonctionnement en génératrice peut être expliqué très simplement via la loi de Faraday : une spire voyant une variation de flux est le siège d'une tension induite. Pour créer ce flux, il est nécessaire de disposer d'une ou de plusieurs spire(s) alimentée(s) par une source extérieure ou d'aimants permanents. Le cahier des charges du projet privilégiait l'absence de source extérieure pour la production d'énergie électrique ce qui limite le choix des générateurs aux machines synchrones (ex : dynamos de vélo), aux machines à courant continu et aux moteurs pas-à-pas (utilisés alors en générateurs). Le nombre de pôles magnétiques influence d'une part le poids, la dimension du générateur mais aussi l'amplitude de la tension induite (tout comme la vitesse de rotation). Le choix du générateur est conditionné donc par le coût, la disponibilité, l'encombrement, la vitesse d'entrée de la machine.

3 REALISATION

Cette partie s'attache à décrire les différentes solutions envisageables et réellement mises en œuvre par les étudiants. Les difficultés de réalisation relatives à chaque solution sont également abordées.

3.1.1 Récepteur éolien

Le choix du type de récepteur éolien a été laissé libre. Les étudiants étaient donc confrontés à un premier choix fondamental entre le récepteur à axe horizontal et le récepteur à axe vertical. Leur choix devait être guidé à la fois par l'efficacité (rendement) du design choisi, mais également par les contraintes de fabrication (coût et utilisation de matériaux recyclables).

Le récepteur à axe horizontal est celui que l'on retrouve le plus souvent sur les éoliennes utilisées pour la production électrique sur nos réseaux de distribution. Les avantages de ce type d'éolienne par rapport à celles à axe vertical sont de fournir un couple régulier, de pouvoir démarrer seule, et éventuellement de pouvoir modifier l'angle d'attaque des pales pour contrôler la vitesse de rotation. De plus, ce type de récepteur est capable de récupérer plus efficacement l'énergie cinétique du vent.

Fig. 1: exemple d'éolienne à axe horizontal

Le récepteur à axe vertical a lui aussi des avantages. Tout d'abord, il est possible de placer dans la base de l'éolienne tous les composants mécaniques et électriques, ce qui la rend plus stable mécaniquement. De plus, de par sa symétrie, il n'est pas nécessaire de l'orienter face au vent.

Les étudiants ayant choisi la version à axe horizontal pouvaient intervenir sur les paramètres suivants pour voir leur influence sur le rendement : le nombre de pales et leur longueur, l'angle d'attaque, le profil des pales, le vrillage et l'évolution de la longueur du profil le long de la pale. Les étudiants ayant choisi la version à axe vertical pouvaient intervenir sur le nombre et la géométrie des pales, leur hauteur et la position de celles-ci par rapport à l'axe de rotation.

*Fig. 2: exemple d'éolienne à axe vertical
(de type Savonius)*

La réalisation peut s'avérer plus compliquée pour le récepteur à axe horizontal, suivant le degré de sophistication recherché par les étudiants pour améliorer le rendement. Les pales de l'hélice doivent être légères, éventuellement profilées et vrillées. Elles doivent également être rigides pour résister aux efforts aérodynamiques. L'axe de rotation devra quant à lui supporter la charge de l'hélice, qui est en porte-à-faux. Enfin, il faudra pouvoir équilibrer l'hélice autour de son axe. Un exemple de réalisation est fourni dans [3].

Pour le récepteur à axe vertical, la réalisation peut être plus simple. En effet, une version simplifiée du type Savonius pouvait être obtenue en utilisant un seau ou un tonneau coupé en deux par exemple. Cependant, il reste indispensable de correctement dimensionner le récepteur, pour limiter son inertie tout en assurant une bonne stabilité. Cet exercice est d'autant plus difficile que le choix des dimensions est contraint par le choix de matériaux recyclés.

Le choix de l'éolienne à axe horizontal se justifie d'ailleurs dans le cas d'une éolienne industrielle de forte puissance. Dans le cadre de ce projet, l'éolienne à axe vertical peut tout à fait convenir, du fait des moyens de réalisation utilisés, du faible rendement attendu, et de la faible puissance qui sera recueillie. Le récepteur de celle-ci est d'ailleurs plus facile à réaliser, et il est plus facile de faire varier les paramètres pour en comprendre l'influence.

3.1.2 Système de transmission

Le système de transmission assure la liaison entre le capteur éolien et la génératrice. Il peut prendre la forme d'un axe fixé de part et d'autre au capteur éolien et à la génératrice ou la forme d'un système à courroie ou chaîne reliant ces deux éléments.

Dans le cas d'un système muni d'un axe, ce dernier est en rotation sous l'action du capteur éolien et doit éga-

lement être relié au bâti fixe. Ceci doit être réalisé de sorte que l'axe soit soumis à un minimum de frottement au niveau des points de liaison avec le bâti. Pour ce faire, les roulements constituent une bonne solution, au contraire des paliers lisses qui génèrent plus de frottement.

Dans le cas de systèmes de transmission à courroie ou chaîne, un tendeur doit être prévu pour assurer la tension de la courroie ou de la chaîne de manière à éviter qu'elle ne glisse. Pour permettre la rotation du capteur éolien ainsi que sa liaison au bâti avec un minimum de frottement, des roulements peuvent être utilisés.

La force exercée par le vent sur le capteur éolien ainsi que le poids du capteur éolien constituent des charges reprises par les roulements; dans le cas d'une éolienne à axe vertical (horizontal), le poids génère une charge axiale (radiale) pour les roulements. Les roulements doivent donc être choisis de manière à supporter ces différentes charges. D'un point de vue pratique, la récupération de roues de patin à roulettes fournit des roulements à billes de bonne qualité.

3.1.3 Génératrice

Le principal problème réside dans le fait que l'éolienne tourne à faible vitesse, le design de l'alternateur doit donc être adapté afin que la tension délivrée ait une amplitude exploitable. Pour ce faire, la génératrice choisie doit comporter un grand nombre de pôles et/ou une démultiplication mécanique. La forme de la tension de sortie n'a par contre pas d'importance (continue ou alternative) puisque les tests s'effectuent sur des charges résistives (selon le cahier des charges: lampes à incandescence ou résistance pure), il ne faut donc pas envisager de réaliser un redresseur ou autre.

Etant donné que nous ne ferons aucune piste, les étudiants ont le choix entre construire la génératrice de leur système éolien par eux-mêmes ou récupérer celle d'un appareil électrique de la vie courante.

La conception d'une telle génératrice n'est absolument pas un problème trivial et doit être très soignée pour récupérer un minimum de puissance. De plus, pour respecter la contrainte sur le fonctionnement de la génératrice sans alimentation externe, il faut tenir compte du fait qu'elle doit comprendre un grand nombre d'aimants permanents, de préférence identiques et puissants, ce qui fait qu'ils sont difficilement récupérables, tout comme le cuivre nécessaire pour bobiner les enroulements. Acheter ces différents éléments est une solution fort chère et qui va à l'encontre des objectifs de ce projet. Si les étudiants choisissent cette voie, il faut qu'une personne qualifiée les informe des difficultés et vérifie si le design choisi est valide. Dans le cas de notre projet, aucun groupe ne s'est finalement risqué à la conception de sa propre génératrice.

La récupération d'une génératrice est une option beaucoup plus réaliste. La principale difficulté provient du fait que les moteurs utilisés dans les appareils électriques de la vie courante (tels que les moteurs asynchrones monophasés ou les moteurs séries universels) sont rarement réversibles. Les seuls moteurs qui sont

réversibles, toujours en tenant compte du fait que les étudiants doivent se passer d'alimentation extérieure, sont ceux qui contiennent des aimants permanents. Les étudiants doivent donc mettre en place une série de tests permettant de sélectionner quels moteurs peuvent ou ne peuvent pas être récupérés pour leur éolienne. La manière la plus simple de procéder est d'entraîner le rotor du moteur à l'aide d'un dispositif qu'ils mettent au point (par exemple connecter une visseuse à l'arbre de leur machine) et de mesurer la différence de potentiel, à l'aide d'un multimètre classique, entre les deux fils d'alimentation. S'ils mesurent une tension non négligeable, c'est que le moteur contient des aimants et qu'il peut être utilisé en génératrice. Les moteurs concernés sont en général des petits moteurs à courant continu (servomoteur) ou des moteurs pas-à-pas que l'on retrouve par exemple dans des imprimantes. Parmi les moteurs ayant passé ce test, il faut ensuite sélectionner celui le plus adapté à une application basse vitesse, et éventuellement prévoir une transmission si la tension mesurée est faible.

Une autre solution consiste à récupérer directement une machine conçue pour être utilisée comme génératrice telle la dynamo de vélo. Il faut cependant prendre garde au fait que cette génératrice est conçue pour tourner à haute vitesse (plusieurs milliers de tours par minute) et donc, pour pouvoir l'utiliser correctement, un rapport de démultiplication important (supérieur à 30) doit être obtenu grâce à la transmission.

4 VALIDATION EXPERIMENTALE

En fin de projet, une validation expérimentale des prototypes réalisés est proposée. Son but n'est pas d'évaluer les étudiants sur l'objectif atteint mais bien de les faire réfléchir sur leur démarche et éventuellement de leur faire remarquer certaines erreurs dans leur choix.

Cette validation se déroule avant le jury final qui constitue le cœur de l'évaluation des étudiants. Le comportement attendu des étudiants est d'avoir un regard critique sur leur travail et de présenter leurs conclusions au jury. L'agenda serré du projet ne permet qu'aux groupes les mieux organisés dès le départ de procéder à un travail itératif avec plusieurs validations expérimentales en fin de projet.

Le dispositif expérimental est constitué d'une soufflerie basse vitesse et d'une instrumentation virtuelle sous LabVIEW permettant la mesure des grandeurs électriques. En cas d'impossibilité de faire démarrer l'éolienne à l'aide de la soufflerie, une foreuse est utilisée pour entraîner l'éolienne afin de pouvoir quand même tester la partie électrique du prototype.

4.1 Tests électriques

Un instrument virtuel LabVIEW a été développé afin de faire toutes les mesures électriques nécessaires pour le projet (Fig. 3).

Deux essais sont effectués : un essai à vide et un essai en charge.

Fig. 3 : interface de mesure LabVIEW

4.1.1 Essai à vide

Aucune charge n'est connectée à la sortie de la génératrice et elle est entraînée par la soufflerie via le capteur éolien ou directement à l'aide de la foreuse.

L'allure temporelle de la tension de sortie est relevée (graphique temporel inférieur). Elle permet de reconnaître le type de machine utilisé (continue ou alternative). La tension efficace est calculée. D'autre part, la résistance interne a été préalablement mesurée à l'aide d'un ohmmètre.

Une puissance maximum peut être ainsi calculée en considérant qu'une charge de même résistance a été connectée (théorème d'adaptation d'impédance). Plusieurs hypothèses sont néanmoins faites : les réactances de la charge et de la source sont négligées et la vitesse de l'éolienne est supposée constante lorsqu'elle est mise en charge. Or, la vitesse a une influence linéaire sur l'amplitude de la tension induite et quadratique sur la puissance produite. Ce chiffre très théorique doit donc être interprété avec précaution.

4.1.2 Essai en charge

Cet essai permet de voir la puissance produite par l'éolienne lorsqu'une charge est raccordée à la génératrice. Il revient aux étudiants de choisir eux-mêmes la résistance la plus adaptée à leur génératrice. Un moyen simple pour ce faire consiste à se baser sur le théorème d'adaptation d'impédance et d'ainsi utiliser une résistance égale à la valeur de la résistance interne. Bien sûr, les étudiants doivent également prendre en compte le courant nominal de la machine. Cependant, il ne constitue généralement pas une limitation vu les courants obtenus.

Le graphique temporel supérieur montre ainsi l'allure du courant et de la tension. Le courant est mesuré à l'aide d'un shunt afin de le convertir en une mesure de tension à brancher à l'entrée du boîtier de conditionnement de mesure de la carte d'acquisition.

La tension et le courant efficaces sont calculés en intégrant sur le buffer d'acquisition. La puissance active

est calculée en moyennant la puissance instantanée, également sur la longueur du buffer. Une durée de deux secondes pour ce dernier permet de négliger les erreurs de calcul dues à la prise d'un nombre non entier de périodes. Pour information, le facteur de puissance de la charge est également donné.

La puissance et la tension efficace permettent de calculer la valeur de la résistance de charge connectée et d'ainsi constater si elle a été choisie de manière judicieuse.

4.1.3 Conclusions sur les résultats obtenus

La plus grande puissance obtenue pour la trentaine de prototypes testés est de 0,42 W, ce qui est évidemment très faible. Il est à noter que vu les dimensions imposées la puissance théorique maximale est limitée à quelques watts et que de surcroît les conditions de vent de la soufflerie ne sont pas très favorables, avec notamment une vitesse de vent très faible.

Il est intéressant de constater que tous les groupes présentent une éolienne en fin de projet, avec, au départ d'un même énoncé, des conceptions différentes et parfois fort imaginatives.

L'état d'avancement est variable (l'appellation "prototype" étant souvent bien justifiée) et représente en partie la qualité du fonctionnement du groupe et la compréhension des concepts et principes techniques sous-jacents. Les principaux défauts de conception constatés lors de cette validation peuvent se regrouper en 4 catégories :

- Mauvaise réalisation mécanique : trop de frottements, inertie trop importante de l'ensemble, mauvais alignement des axes.
- Choix de la génératrice basé uniquement sur la tension produite en négligeant l'influence de la résistance interne : certains prototypes sont ainsi capables de délivrer une tension à vide importante (jusqu'à 35V) mais ne délivrent presque pas de puissance car leur résistance interne est énorme.
- Mauvaise adaptation de la résistance de charge.
- Capteur éolien inefficace : trop petit, mauvais coefficient de performance dû à une réalisation approximative.

5 IMPACT PEDAGOGIQUE

Après cinq ans, la mise en place des projets au sein de la Faculté des Sciences appliquées semble globalement satisfaisante. En effet, plusieurs aspects nous amènent à penser que les principaux objectifs sont atteints.

Tout d'abord, le fait que tous les groupes d'étudiants de BA1 parviennent à réaliser un prototype dans les délais impartis indique qu'ils ont développé certaines compétences méthodologiques (comme établir un planning, émettre des hypothèses, analyser et dépasser les difficultés rencontrées, ...). Notons que même si tous les groupes partent du même énoncé, l'expérience confirme que les solutions proposées par les différents groupes sont variées.

Ensuite, il apparaît que les étudiants sont bel et bien motivés (voire parfois trop) par la réalisation du projet. Ainsi, il est difficile en fin de projet de les « décrocher » de la réalisation de leur projet afin qu'ils se penchent sur leurs autres travaux ou examens. De plus, il arrive que des étudiants qui abandonnent leur année académique poursuivent leur projet jusqu'à son terme.

Nous avons pu constater un réel progrès quant à la capacité à communiquer des étudiants. En effet, à mi-parcours comme en fin de projet, les étudiants doivent rendre un rapport écrit ainsi que faire un exposé oral témoignant de l'évolution de leur projet. Il s'avère que la qualité de leur rapport écrit, comme celle de leur exposé oral, augmente de manière significative au cours de l'année.

Pour finir, la réalisation du projet amène les étudiants à apprendre à travailler en équipe. En effet, la plupart des groupes parviennent à collaborer ainsi qu'à régler les conflits internes puisque la note attribuée en fin d'année est très souvent collective.

D'autres aspects du projet restent plus flous. Le rôle du chef d'équipe reste par exemple, après plusieurs années de pratique, difficile à définir précisément : dans quelle mesure peut-il aider son groupe (directement donner des informations techniques)? Est-il responsable de la réussite du projet? Doit-il en partie assumer un rôle d'enseignement, etc?

Enfin en l'absence d'une épreuve d'évaluation individuelle, il est difficile de juger si tous les étudiants de BA1 développent bien chacun les compétences disciplinaires attendues. D'où l'intérêt d'inscrire un tel dispositif dans un cursus comprenant également des cours plus "classiques" avec lesquels des liens pourront être faits.

Bibliographie

- [1] Erich Hau, "Wind Turbines – Fundamentals, Technologies, Application and Economics – Second Edition", Springer, 2006.
- [2] Ph. Leconte, Marc Rapin, Edmond Szechenyi, « Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie mécanique », BM 4640
- [3] Hugh Piggott, "Comment construire une éolienne – Aérogénératrice à alternateur discontinue – Eoliennes de 2.4m et 1.2m de diamètre", août 2004, hugh@scoraigwind.co.uk – info@krugwind.com