

COMPTES RENDUS D'INNOVATIONS

REPORTS OF INNOVATION

L'apprentissage de la conception en génie mécanique : le rôle du projet : compte rendu d'innovation

Learning mechanical engineering design : the role of project : report of innovation

Edurne AGUIRRE, Benoît RAUCENT

Université catholique de Louvain
Faculté des Sciences Appliquées, département de Mécanique
Place du Levant, 2
B-1348 Louvain-la-Neuve, Belgique.

Résumé

Dans l'apprentissage de la conception en génie mécanique, le projet joue un rôle complémentaire aux enseignements traditionnels de type déductif. Classiquement, le projet est placé en fin de cycle et a pour objectif de développer l'esprit de synthèse et d'intégrer les acquis en résolvant un problème de grande envergure. En complément de ce type de projet, nous proposons depuis cinq ans des projets d'initiation placés en début de cycle, avant les cours magistraux. Cette nouvelle approche repose sur le découpage de l'apprentissage en trois temps : la contextualisation, la décontextualisation et la recontextualisation.

Mots clés : projet, ingénieur mécanicien, conception, contextualisation.

Abstract

In the learning of mechanical engineering design, projects aim to introduce a new approach, complementary to the deductive approach of the traditional courses.

Usually, projects are performed at the end of the studies and have for objective to develop synthesis, to integrate knowledges, thanks the resolution of a wide-ranging problem. In complement of these project, we propose, since five years, an initiation project, at the beginning of the cycle, before the courses. This approach is based on the cutting-out of the learning in three steps : contextualisation, decontextualisation, recontextualisation.

Key words : *project, mechanical engineering, conception, contextualisation.*

Resumen

En el aprendizaje de la concepción en “génie mécanique», el proyecto juega un rol complementario en las enseñanzas tradicionales de tipo deductivo. Clásicamente, el proyecto está ubicado al final del ciclo y tiene por objetivo desarrollar el espíritu de síntesis e integrar las adquisiciones resolviendo un problema de gran envergadura. Para complementar este tipo de proyecto, nosotros proponemos desde hace cinco años unos proyectos de iniciación ubicados al inicio del ciclo, antes de los cursos magistrales. Este nuevo enfoque reposa en la descomposición del aprendizaje en tres tiempos : la contextualización, la descontextualización y la recontextualización.

Palabras claves : *proyecto, ingeniero civil mecánico, concepción, contextualización.*

1. INTRODUCTION

La résolution d'un problème de conception consiste «... à créer, à construire une chose à partir d'outils, de règles et d'éléments existants, portés au jour par l'analyse...» (Pruvot, 1993, p. 10). Il s'agit de trouver une solution optimale à un cahier des charges imposé par le client. Cette démarche, dite «inverse», est cependant fort différente de celle adoptée dans la majorité des enseignements où un canevas logique déductif, dit «direct», est suivi en faisant découvrir ou comprendre un modèle ou un principe.

Lorsque les étudiants en génie mécanique sont confrontés à un problème de conception, ils ont, de ce fait, du mal à adopter la «démarche inverse». Le malaise apparaît dès les phases initiales de conception qui nécessitent un maximum de créativité. Les étudiants négligent l'analyse fonctionnelle ou le choix du concept et cherchent à se «raccrocher», le plus vite possible, au dimensionnement, afin de revenir à un problème direct qu'ils maîtrisent mieux. Ainsi, par exemple lors de la conception d'un pont, ils ont tendance à choisir arbitrairement un concept (exemple : un pont suspendu), et à ramener le problème de conception au simple calcul du diamètre du câble porteur.

Afin de pallier cet état d'esprit, plusieurs projets ont été intégrés dans le curriculum lors de la réforme des candidatures en 1994 en faculté des sciences appliquées de l'Université Catholique de Louvain (UCL) à Louvain-la-Neuve. Les projets visent tant à contextualiser les études qu'à mettre en application les connaissances acquises. Parallèlement, les cours de conception des étudiants ingénieurs mécaniciens ont également été revus afin de renforcer ce type d'apprentissage. L'objectif est de former «au» et «par» le projet en développant des aptitudes telles la synthèse, l'esprit de créativité ou l'apprentissage coopératif.

La section suivante de l'article présente l'intégration des projets dans le curriculum des étudiants ingénieurs mécaniciens et, en particulier, le rôle dévolu au projet en début et fin des cycles. Les objectifs et particularités de chaque projet sont décrits dans la troisième partie. Enfin, la quatrième partie synthétise les spécificités de l'enseignement par projet et présente l'approche duale parfois mal prise en compte par les enseignants ou mal perçue par les étudiants.

2. INTÉGRATION DES PROJETS DANS LE CURRICULUM

Les études d'ingénieur civil s'adressent à des étudiants ayant réussi leurs études d'humanités (niveau du baccalauréat) et un examen d'admission portant sur les mathématiques. Elles comportent cinq années d'études réparties sur deux cycles. Le premier («candidatures», en 2 ans) porte sur les enseignements de base (i.e mathématiques, physique, etc.) et les sciences humaines. Le second cycle («techniques», en 3 ans) est réservé à l'apprentissage d'une spécialité (c'est-à-dire : mécanique, électricité, sciences des matériaux, etc.)

L'enseignement de la conception en génie mécanique est réparti sur les quatre premières années. La cinquième année est réservée en majeure partie au travail de fin d'études.

À l'UCL, comme dans la plupart des institutions, un projet de fin de second cycle fait la synthèse des enseignements reçus et les applique à un problème concret de conception mécanique.

L'originalité de notre approche est d'avoir intégré, en complément de cet enseignement de «synthèse», des projets en début de cycle faisant découvrir, de façon intuitive, un processus de conception ou les fonctions et caractéristiques des organes d'une machine.

Le tableau 1 présente les caractéristiques de quatre projets proposés en génie mécanique et les objectifs poursuivis.

Année d'étude	Objectifs	Exemples de réalisation	Spécialité	Nbre d'étudiants	Nbre heures	Encadrement
1 (candi)	Initiation à la démarche du projet	Conception d'un engin volant	toutes	320 (groupes de 8)	45	8 assistants 8 étudiants
2 (candi)	Rôle du calcul dans la conception	Conception d'un planeur	au choix	50 (groupes de 4)	45	2 assistants
1 (techn)	Initiation à l'analyse fonctionnelle	Étude d'un mécanisme	méca	25 (groupes de 2)	45	2 assistants 1 technicien
2 (techn)	Synthèse	Conception d'une machine	méca	50 (groupes de 2)	80	5 assistants

Tableau 1 : Les projets par année d'études

Cette chronologie particulière repose sur un apprentissage en trois cycles :

- la contextualisation, qui consiste à placer l'étudiant devant un problème réel et l'invite à le résoudre par une approche intuitive tout en découvrant certains aspects techniques. Les thèmes proposés abordent des problèmes authentiques tant au niveau de leur contenu, de leur complexité que de la variété des aspects à traiter ;

- la décontextualisation correspond à l'étape d'analyse et de maîtrise des connaissances au travers des cours magistraux en génie mécanique ;

- la recontextualisation vise le transfert des connaissances et compétences acquises lors des cours et leur application en situation réelle, ce qui nécessite, de la part de l'étudiant, leur complète intégration dans sa méthodologie de travail (étape de synthèse).

3. LES PROJETS

3.1. Premier projet : initiation à la démarche du projet

Lors du premier semestre de la première candidature, le projet offre aux nouveaux étudiants un lieu « d'action » où faire preuve de dynamisme, de réflexion, d'intuition, de créativité etc., et exprimer leur enthousiasme pour leurs nouvelles études, et représente également un lieu « social » de travail en équipe facilitant leur intégration dans le milieu universitaire.

Le thème du projet est laissé très ouvert afin de favoriser la phase de création et ne pas se focaliser directement sur des aspects techniques ou économiques. Les sujets proposés depuis cinq ans ont été la conception

d'un cadran solaire, d'un engin roulant à propulsion électrique, d'un engin flottant démontable, d'un engin volant rattaché au sol et d'un engin utilisant l'énergie développée par une bougie.

Le terme «engin» (du latin ingenium, intelligence, habileté) est préféré à celui de «véhicule» car plus ouvert, et, de ce fait, plus porteur d'innovation et de prouesse technologique ou artistique. Les étudiants définissent eux-mêmes les fonctions de leur engin et en proposent des solutions techniques cohérentes.

Les étudiants répondent avec ingéniosité et enthousiasme au défi proposé. Leur motivation est d'autant plus grande qu'ils perçoivent l'impact du projet sur leur formation, qu'ils maîtrisent l'orientation de leurs recherches et qu'ils se sentent capables de les mener à bien.

Le projet se subdivise en quatre étapes. Dans un premier temps, chaque groupe imagine un concept à réaliser. Les exemples vont du plus ludique (exemple : engin électrique de plage) au plus fonctionnel (exemple : le transport de blessés dans un parc d'attractions).

Ensuite, chaque étudiant propose plusieurs esquisses du concept (figure 1) à l'assistant qui en fournira une critique constructive (exemple : faut-il cacher le blessé ou le montrer afin d'inciter le public à la prudence ?)

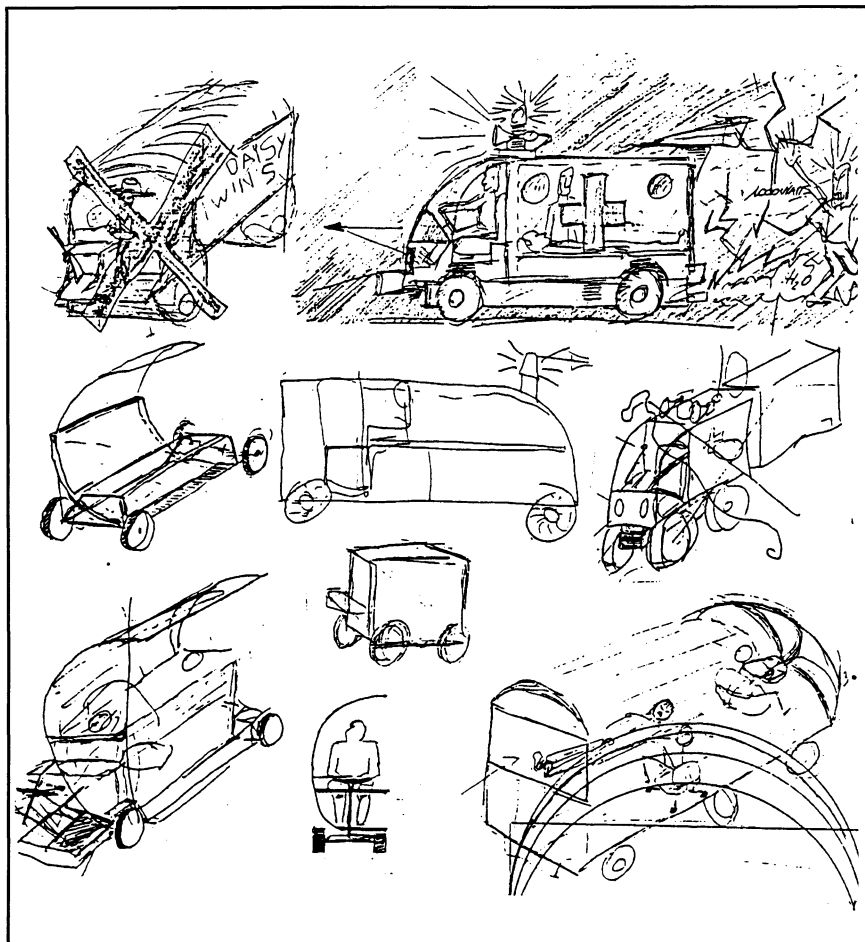


Figure 1 : Esquisses d'un engin roulant de secours pour un parc d'attractions (Asproni et al., 1994)

Sur la base de cette solution «schématique» ou conceptuelle, les étudiants dimensionnent leur engin en abordant intuitivement les aspects techniques. Par exemple, les notions de structure et de résistance de matériaux sont abordés grâce à des maquettes en carton, en Legos™, etc.

Le concept aboutit enfin à la réalisation d'un plan d'ensemble et d'une vue en perspective qui permet de présenter l'engin en situation. Afin de dépasser ce stade conceptuel, certains projets ont conduit à la réalisation de prototypes (figure 2).



Figure 2 : **Présentation des engins volants**

Environ 350 étudiants sont concernés par ce projet d'un volume horaire de 45 heures. Afin de susciter une dynamique de travail, les étudiants sont répartis par groupes de huit qui travaillent de manière autonome sous la supervision d'un assistant-chercheur architecte, pour la partie initiation au projet, et d'un assistant-chercheur mécanicien, pour l'aspect mécanique. De plus, deux étudiants-moniteurs (étudiants en années «techniques») participent à l'encadrement en assurant le suivi rapproché des étudiants. Les enseignants supervisent les séries et forment le jury d'évaluation.

Par le biais de l'enquête pédagogique organisée chaque année (Aguirre, à paraître), les étudiants font part de leur enthousiasme pour ce projet et en particulier pour la réalisation pratique et les aspects humains du travail en équipe.

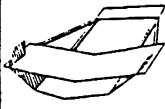

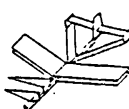
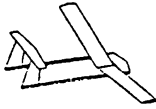
3.2. Deuxième projet : le rôle du calcul dans la conception (première synthèse)

En deuxième année, les étudiants choisissent deux projets parmi ceux proposés par les cinq spécialités de la faculté (c'est-à-dire : mécanique, électricité, informatique ou mathématiques appliquées, construction civile ou architecture, matériaux ou procédés).

Ces projets abordent un problème précis d'ingénierie et utilisent les connaissances acquises dans les autres enseignements. Ils contextualisent les orientations du diplôme que chaque étudiant devra choisir en début de troisième année.

Un des projets proposés par les mécaniciens est centré sur l'utilisation du calcul dans un problème de conception (modélisation et simulation de systèmes mécaniques). Sa particularité est de bien faire ressortir les phases initiales de conception pure (la synthèse) et les phases d'analyse (le calcul).

Le projet se réalise en trois phases. Lors de la première étape, par exemple de la conception d'un planeur, les étudiants doivent faire preuve d'imagination et proposer des esquisses de planeur illustrant diverses alternatives. Sur la base d'arguments tels que la facilité de construction, la stabilité (notion intuitive à ce stade), ils sélectionnent, en accord avec les enseignants, une solution à développer (figure 3).

	 Bi-Plan	 B-2	 Delta	 M-C'
Originalité	+	0	++	-
Solidité	0	+	-	+
Faisabilité	+	+	-	0
Stabilité	-	-	+	++
Réglage	0	-	++	+
Portance/poids	+	++	0	+
Total	++	++	+++	++++

très mauvais --, mauvais -, moyen 0, bon + excellent ++

Figure 3 : Argumentation des alternatives et choix de la solution (adaptée de Goyens et al., 1996)

Dans un second temps, les étudiants réalisent une maquette de leur planeur, en modélisent les performances et évaluent certains paramètres (exemple : la traînée) lors d'essais en soufflerie. Ensuite, ils simulent le vol du planeur et en déduisent la longueur du vol avant atterrissage.

Enfin, le prototype est construit et essayé sur le lanceur. Cet essai fait l'objet d'une compétition amicale entre étudiants.

Un indice de performance permet d'évaluer sans ambiguïté la solution proposée. Il s'agit de vérifier l'adéquation entre la distance parcourue estimée par simulation et celle effectivement parcourue durant l'essai. Afin de fixer les règles du jeu dès le départ, les matériaux utilisables sont imposés et les conditions de vol sont uniformisées par l'utilisation d'un lanceur commun.

Ce projet concerne une cinquantaine d'étudiants répartis en groupes de quatre. Les thèmes abordés étant très divers (exemples : conception, essai de soufflerie, modélisation aéronautique, simulation numérique, etc.), l'encadrement nécessite une équipe d'assistants spécialisés dans chacun de ces domaines.

D'autres thèmes ont été abordés tels la conception de véhicules à propulsion mécanique (Raucent & Johnson, 1997).

Par le biais des enquêtes pédagogiques, les étudiants expriment leur intérêt pour la clarté de l'enjeu et l'aspect pratique de la réalisation d'un prototype. Ce projet remplit ainsi parfaitement son rôle d'initiation à la synthèse et de découverte d'une discipline particulière.

3.3. Troisième projet : introduction à l'analyse fonctionnelle

Au travers d'une expérimentation pratique, le premier projet des étudiants de la spécialité mécanique (second cycle) les initie à l'étude fonctionnelle d'une machine. Il se veut un lieu de découverte et de prise de conscience des problèmes liés aux mécanismes classiques. Il s'agit en effet d'examiner ces mécanismes et d'apprendre à se poser des questions précises et pratiques quant à leur fonctionnalité et leur mise en oeuvre (transmission, étanchéité, assemblage, etc.)

Les questions de fond (souvent plus théoriques) sont ensuite abordées dans les cours magistraux de la filière «construction des machines».

Le projet proposé se réalise en deux phases. Dans un premier temps, les étudiants, par groupe de deux et sous la supervision rapprochée d'un technicien spécialisé, démontent un mécanisme complexe ayant de nombreuses fonctionnalités, à savoir un moteur de voiture. Les informations

récoltées et les croquis des composants sont consignés dans un cahier de laboratoire.

Dans un second temps, les étudiants étudient le fonctionnement d'un composant particulier du moteur. Ils prennent des croquis, s'interrogent sur la fonction de chaque surface (exemples : glissement avec frottements, assemblage fixe, étanchéité, etc.), mesurent les états de surface et les cotes fonctionnelles, estiment les tolérances, etc. (figure 4).

Ils exécutent ensuite le schéma fonctionnel à la main et le plan d'atelier sur un logiciel de dessin assisté par ordinateur (AUTOCAD™).

Les enseignants insistent sur l'exactitude des dessins techniques et le respect des normes de représentation, car il s'agit d'un mode de communication à part entière. De plus, le plan est la première validation du concept. En dessinant, les contraintes apparaissent et les idées se mettent en place.

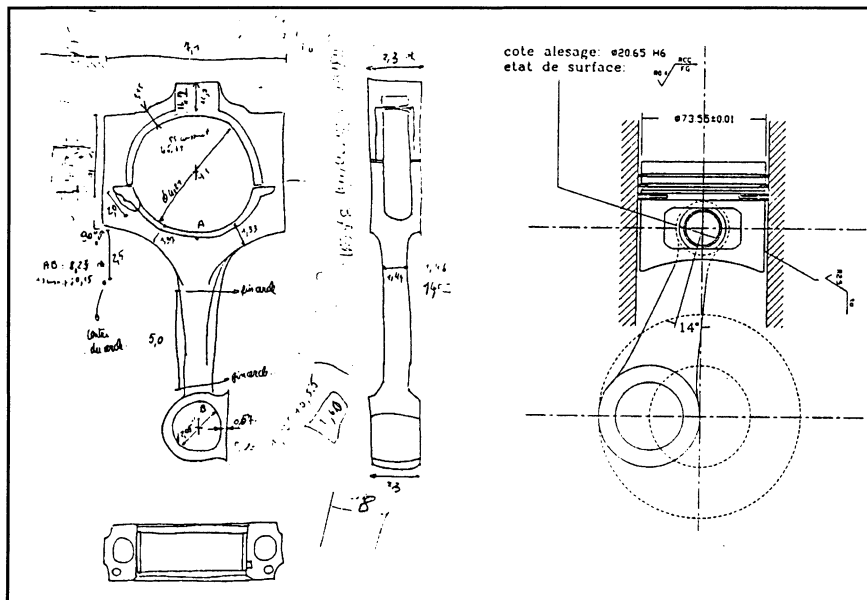


Figure 4 : Dessin et schéma fonctionnel d'une bielle

3.4. Quatrième projet : la synthèse

Ce projet se déroule durant la quatrième année et a pour objectif d'intégrer tous les acquis, tant théoriques que pratiques, lors de la résolution d'un problème concret. Les étudiants, par groupes de deux à quatre, choisissent leur sujet dans une liste proposée par les enseignants et des

industriels (exemples : conception d'une machine automatique pour le rejointoyage d'un mur en briques, conception d'une barrière automatique d'un poste de péage sur autoroute, conception d'un bras articulé pour chaise de handicapé, etc.)

Ce type de projet à caractère industriel existe dans de nombreuses universités. Notre optique est cependant de limiter le rôle des industriels en distinguant stage en entreprise et projet de conception. Les industriels proposent les sujets, fournissent les informations nécessaires et participent à l'évaluation finale. Les étudiants, quant à eux, travaillent à l'université sous la supervision des enseignants. Plusieurs essais d'intégration des étudiants en milieu industriel ont eu lieu, mais, si certaines expériences furent très profitables, le travail des étudiants, par manque de disponibilité des industriels, fut souvent limité à un seul aspect de la conception tel le dimensionnement ou le dessin d'un composant. Or ce projet se veut un réel travail de conception incluant toutes les facettes du problème. L'impact de cette dualité université-entreprise sera précisée au point 4.

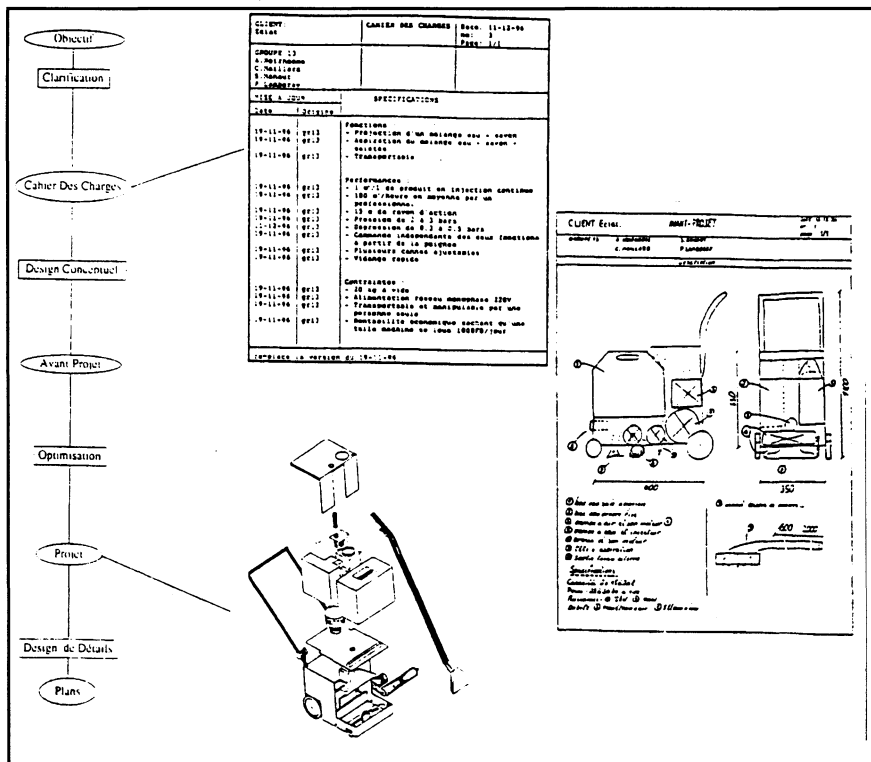


Figure 5 : Les étapes du projet : machine de nettoyage industriel (Lamboray et al., 1997)

La figure 5 présente la méthodologie suivie tout au long de ce projet de synthèse (Lamboray et al., 1997). Elle est basée sur l'approche de Pahl & Beitz (1988) et se subdivise en 4 étapes :

- 1) la clarification : rédaction du cahier des charges fonctionnelles en définissant les fonctions à remplir, les performances à atteindre et les contraintes à respecter ; aucune solution n'est envisagée à ce stade,
- 2) le «design» conceptuel : proposition de solutions pour chaque fonction prise séparément et combinaison de ces sous-solutions pour définir des solutions complètes réalistes ; comparaison des alternatives sur base des performances et contraintes spécifiées dans le cahier des charges ;
- 3) l'optimisation : sélection du concept le plus adéquat ; optimisation, dimensionnement des composants, étude des détails et réalisation de tous les documents nécessaires ;
- 4) le «design» de détails : présentation d'un plan d'ensemble permettant d'évaluer la cohérence de la solution développée (pas de plan détaillé des composants).

4. SPÉCIFICITÉS DE L'ENSEIGNEMENT PAR PROJET

L'enseignement par projet est très particulier et nécessite une approche duale parfois mal prise en compte par les enseignants et mal perçue par les étudiants.

4.1. L'interaction étudiant-enseignant : entre la coopération et la confrontation

Contrairement à ce qui se passe pour un exercice classique, l'enseignant qui encadre un projet ne connaît pas la solution au problème posé et ne peut pas garantir aux étudiants la bonne convergence du processus de conception. L'étudiant doit, de ce fait, accepter de se remettre perpétuellement en question et y est incité par une confrontation permanente et une coopération assidue avec l'enseignant. Cette remise en question continue est parfois difficile à accepter par les étudiants qui la ressentent comme porteuse d'insécurité, voire comme un manque de cohérence de la part de l'enseignant.

Il est cependant impératif de préciser ces règles du jeu. L'enseignant aide, oriente etc., mais uniquement à la demande de l'étudiant qui reste maître de son projet.

4.2. L'encadrement : entre le partage d'expériences et le transfert de compétences

L'apprentissage de la conception mécanique peut être confié soit à des professionnels de l'enseignement soit à des «praticiens» de la conception issus de l'industrie. Le second choix peut cependant s'avérer dangereux car un bon concepteur base sa démarche sur son expérience et sur un grand nombre «d'évidences» qu'il peut avoir du mal à communiquer aux étudiants. Il va droit au but, simplifie les problèmes, fait des choix sur la base de son intuition etc. Or ce sont là justement les points les plus difficiles à appréhender par l'étudiant !

Le rôle de l'enseignant de conception est de développer chez l'étudiant son esprit de synthèse et de création en l'incitant à acquérir, de manière autonome, une méthodologie de travail et des points de repère. Plus tard, sur la base de son expérience personnelle, le jeune concepteur appliquera «sa» propre démarche en se souvenant, sans doute avec amusement, des erreurs commises et de la «lourdeur» de la méthode enseignée, car «il faut pratiquer la conception pour la maîtriser».

4.3. La charge horaire : entre la frustration et la démotivation

Une autre caractéristique propre aux projets, souvent difficile à gérer, est la charge horaire des étudiants et des enseignants. Quand il s'agit de réaliser concrètement un objet, les étudiants, très enthousiastes, ont souvent tendance à dépasser le temps imparti. Le rôle de l'enseignant est alors de doser les efforts afin de ne pas frustrer l'étudiant face à un travail inachevé, tout en assurant une certaine qualité au projet. À l'opposé, s'il s'agit de réaliser des plans techniques, certains étudiants ont tendance à se décourager en fin de parcours. Le travail de l'enseignant est alors de les remotiver afin qu'ils puissent «finaliser» leur projet.

Encadrer un projet ne se limite pas à préciser l'objectif, à donner les informations nécessaires et à évaluer les résultats. Pour qu'il soit instructif, il faut assurer une guidance assidue des étudiants. La charge horaire pour l'enseignant et son équipe est de ce fait très lourde. Cet inconvénient ne remet pas en cause la faisabilité du projet pour des grands groupes d'étudiants, mais nécessite une certaine expérience dans la gestion de groupes et la possibilité de disposer d'une équipe d'assistants motivés et compétents.

4.4. La guidance : entre le quotidien et le long terme

Deux types de guidance ou d'interaction entre les étudiants et les enseignants, sont proposés :

– la guidance «rapprochée» qui consiste à aider les étudiants dans leurs problèmes quotidiens, par exemple la recherche d'une solution à un problème ponctuel, la mise à disposition d'un catalogue ou la discussion des règles de l'art lors d'un dimensionnement ;

– la guidance «stratégique» qui, par contre, a pour objet de baliser le terrain, d'évaluer les grandes options prises et de proposer de nouvelles solutions à étudier.

Les étudiants ayant tendance à se limiter au court terme ou à la réponse immédiate, il est important de différencier ces tâches et de les confier à des personnes différentes : d'une part les assistants, à l'écoute des problèmes quotidiens des étudiants, d'autre part le professeur avec lequel la discussion porte sur des problèmes de fond.

4.5. Le choix du sujet : entre l'ouverture à la créativité et la focalisation sur les objectifs

Outre la qualité de l'encadrement, le choix du sujet est fondamental pour la réussite du projet. Un thème motivant et accessible pour l'étudiant lui permet de se sentir maître de son projet. Un sujet dans le domaine des compétences de l'enseignant lui assure intuition et repères lors de l'argumentation des alternatives.

La description du sujet est également primordiale. Le choix du terme «engin» plutôt que «véhicule» et l'importance du «critère de performance» dans les projets du premier cycle ont été présentés. Il s'agissait, d'une part, d'ouvrir le problème pour favoriser la créativité et, d'autre part, de préciser les objectifs afin d'intégrer judicieusement les calculs et l'optimisation dans le processus de conception.

Enfin, lors du dernier projet les étudiants choisissent eux-mêmes leur sujet au sein d'une liste proposée par les enseignants. Il s'agit là d'une condition indispensable à la motivation des étudiants. La liste permet aux enseignants de s'assurer de la concordance du sujet avec les objectifs du projet, de la complexité adaptée aux connaissances des étudiants ou à leur propre compétence et du volume horaire raisonnable à y consacrer.

5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'introduction de projets dans le curriculum des étudiants ingénieurs depuis 1994 a porté ses fruits. Notre expérience nous a démontré qu'il est réaliste de mener à bien un projet avec plus de 300 étudiants en début de cycle.

Diverses réflexions doivent encore être approfondies afin de renforcer les projets en « candidatures » et assurer la transversalité des thèmes proposés. Notre souhait est en effet d'en élargir l'usage en « candidatures » ; d'une part, en l'introduisant dès la rentrée académique afin de s'en servir comme « moteur » de la contextualisation et d'autre part en élargissant le thème du projet de seconde candidature afin qu'il intègre toutes les matières enseignées.

En conclusion, les projets sont un travail d'équipe où tous les participants, étudiants, assistants et enseignants, sont acteurs et co-auteurs de leur formation.

BIBLIOGRAPHIE

- AGUIRRE E., RAUCENT B., SOBIESKI P. & WOUTERS P. (à paraître). L'évaluation pédagogique des enseignements en Facultés des Sciences Appliquées. *Didaskalia*.
- ASPRONIE., LÉVÉQUE D., SONON P., THOREAU A., VENDERVENNET Y. & VERCRUYSSSE L. (1994). Véhicule de secours. *Rapport étudiant du Projet FSA 1631*. Louvain-la-Neuve, UCL.
- DUTRY G., RAUCENT B. & SIMON F. (1995). Conception d'un engin roulant à propulsion électrique. *Dossier enseignant du Projet FSA 1631*. Louvain-la-Neuve, UCL.
- GOYENS A., HOFFMAN F., JANSSENS D. & SLAWECKI A. (1996). Planeur. *Rapport étudiant du Projet FSA 1015*. Louvain-la-Neuve, UCL.
- LAMBORAY P., NOIRHOMME A., MAHAUT S. & MAILLARD CH. (1997). Conception d'une machine de nettoyage. *Projet en construction mécanique II, rapport étudiant du projet MECA 2840*. Louvain-la-Neuve, UCL.
- PAHL G. & BEITZ W. (1988). *Engineering Design, A Systematic Approach*. London, Springer-Verlag.
- PRUVOT F. (1993). *Conception et calcul des machines-outils, volume 1 : Généralités, Morphologie, Plan Général*. Lausanne, Presses Polytechniques Universitaires Romandes.
- RAUCENT B. (1996). *Projet en Construction Mécanique. Notes de cours, MECA 2840*.
- RAUCENT B. & JOHNSON D. (1997). Linking Design and Simulation : A Student Project. *Journal of Engineering Design*, vol. 8, pp. 19-31.