

Formation par projet de la CAO à la réalisation en filière mécanique de l'ENSISA

Y. HIETTER, M. TOURLONIAS, A. COLLAINE, A. HOFFMANN, D. MATHIEU

École Nationale Supérieure d'Ingénieurs Sud-Alsace, Université de Haute Alsace,
11 rue Alfred Werner, 68093 MULHOUSE

Résumé :

L'objectif de ce projet est de sensibiliser les étudiants aux problématiques de la réalisation d'un système mécanique à partir d'un cahier des charges imposé : fonctionnalités attendues, encombrement et contraintes de réalisation. Chaque étudiant conçoit sa solution : cinématique, forme et dimensionnement des pièces. Il défend son projet lors d'une présentation orale. Les projets retenus sont subdivisés en parties confiées à des binômes qui doivent finir la conception, préparer la fabrication et réaliser l'ensemble des pièces. Le système final est assemblé (ex : pompe à chambre oscillante).

Abstract:

The aim of this paper is to describe an educational methodology used in the field of mechanical designing. The methodology consists in asking the students to design and fabricate a mechanical system based on functional specifications. These two steps enable to raise students' awareness on difficulties encountered while manufacturing a good and especially when transferring from one step to another. Indeed, each student designs his own solution which involves defining kinematics, shape and sizing of the different mechanical parts of the system. Then, each project is presented orally and among all projects some are retained for fabrication. For the fabrication, students are divided in groups of two which are entrusted with different parts of the system. This organisation has the advantage to make them conscious of the difficulty of teamwork. Finally, the system is assembled and tested (e.g pump with oscillating chamber).

Mots clefs : formation par projet, mécanique, conception, réalisation

1 Introduction

L'École Nationale Supérieure d'Ingénieurs Sud-Alsace (ENSISA) est issue d'une longue histoire (150 ans) de formations de haut niveau puisant son origine dans le domaine des industries textiles. Les sciences textiles s'appuient d'une part sur la chimie et d'autre part sur la mécanique (propriétés du matériau fibreux et machine de production). Depuis sept ans, une nouvelle formation spécifique en mécanique est apparue au sein de l'école. L'objectif de celle-ci est de former des ingénieurs généralistes dans le domaine de la mécanique et plus particulièrement du génie mécanique. Pour cela, les futurs ingénieurs suivent plusieurs cours dans divers domaines allant des sciences physiques aux sciences humaines. Dans le cadre des sciences industrielles (conception, CAO, FAO, usinage,...), il a été choisi d'adjoindre un module de projet permettant aux étudiants de mieux comprendre et d'expérimenter les liens existants entre toutes ces disciplines et ce par l'intermédiaire de la réalisation d'un système mécanique de A à Z. La première partie de l'article présentera le projet dans sa globalité. Puis chacune des étapes du projet sera présentée et explicitée afin de décrire au mieux le déroulement du projet. Enfin une dernière partie présentera les avantages et les limites d'une telle approche.

2 Le projet

Le projet consiste à réaliser entièrement un système mécanique. Il occupe 100 heures sur l'emploi du temps d'un étudiant, réparties sur le semestre 4 (deuxième année) du cycle ingénieur. Ce projet valide l'interaction entre plusieurs disciplines enseignées et représente ainsi un exemple concret qui relie et justifie une partie du

programme d'enseignement de la formation des ingénieurs. L'ensemble du projet est réalisé à l'aide d'un logiciel de CFAO nommé Creo Elements/Pro (anciennement Pro/ENGINEER) de la société PTC. L'utilisation d'un seul logiciel permet de traiter tous les maillons du cycle de vie d'un produit (ici un système mécanique complet) compris entre l'idée de départ et la fin de la réalisation. Le projet est découpé en quatre étapes distinctes : la pré-conception, la conception, la préparation de la fabrication et la réalisation.

La pré-conception va consister, pour chaque étudiant, à imaginer son système mécanique qui doit satisfaire un cahier des charges relativement général, afin de laisser à l'étudiant une grande liberté d'action. À la fin de cette partie, chacun défend sa solution devant le reste de la promotion et le groupe d'enseignants chargés du projet. Celui-ci choisit plusieurs projets prometteurs.

Pour la seconde partie, les étudiants sont répartis en groupe d'environ 16 personnes. Chaque groupe va travailler sur la conception d'un des projets retenus et, à la fin des séances dédiées, le système doit être complètement modélisé, les pièces dessinées et dimensionnées.

La troisième phase consiste à préparer la fabrication. Il faut donc imaginer une procédure pour obtenir les pièces qui ont été conçues. Les éléments standards seront achetés mais pour les autres, il faudra réfléchir au processus de fabrication et aller jusqu'à obtenir les programmes d'usinage pour les machines de l'école.

La dernière partie consiste à réaliser toutes les pièces nécessaires pour obtenir le mécanisme souhaité. Cette phase se termine par l'assemblage de toutes les pièces et par l'essai du mécanisme. L'année dernière le système réalisé était une pompe à chambre oscillante.

3 Pré-Conception

La première étape du projet est individuelle et consiste, pour l'étudiant, à trouver des idées afin de satisfaire un objectif qui lui est donné par l'équipe enseignante. De plus, chaque étudiant doit préparer une présentation pendant laquelle il devra défendre sa solution devant un public composé de ses camarades de classe ainsi que des enseignants responsables du projet (de la partie conception comme de la partie fabrication).

Pour accomplir cet objectif, les étudiants disposent des prérequis acquis durant leur formation d'ingénieur :

- Modélisation de pièces tridimensionnelles à l'aide du logiciel de CFAO Creo Elements/Pro. Un cours de 24 heures, durant le semestre 2 (première année), présente les différentes possibilités de modélisation de volumes et de surfaces afin d'obtenir une modélisation 3D d'une pièce mécanique. La mise en plan de cette pièce est également abordée.
- Modélisation top to down [1] d'un mécanisme et application sous Creo Elements/Pro. Durant le semestre 3, le principe d'une modélisation descendante est enseigné puis appliqué à l'aide du même logiciel Creo Elements/Pro. Durant ce cours de 28 heures, les étudiants apprennent à modéliser un mécanisme complet tout en respectant les principes de la modélisation top to down à travers deux exemples plus ou moins guidés.

Le point de départ de la première étape est un cahier des charges précisant le type de mécanisme à réaliser ainsi que divers renseignements généraux comme l'encombrement général et quelques conditions cinématiques et dynamiques. De surcroît, le système doit être totalement réalisable avec les moyens techniques dédiés à la fabrication, disponibles à l'école. À partir de ces données, chaque étudiant doit donc imaginer une solution qu'il modélise sous le logiciel Creo Elements/Pro. Cette modélisation doit, en plus de respecter le cahier des charges de départ, respecter les principes de modélisation top to down [1]. Durant cette étape, l'équipe enseignante est présente pour assister les étudiants dans l'utilisation du logiciel de modélisation mais également pour éviter les blocages dus à une mauvaise solution.

Au terme des 24 heures que comporte cette étape du projet, chaque étudiant prépare une courte présentation de cinq minutes pendant laquelle il défend sa solution. Chaque présentation est suivie par une séance de questions de 5 minutes maximum. À la fin des présentations, les enseignants choisissent les projets les plus prometteurs pour la suite en tenant également compte d'un cahier des charges affiné (affinage des dimensions, certains éléments mécaniques normalisés de type roulements, coussinets, ... sont imposés). Au vu des effectifs actuels de la filière, trois projets sont retenus. Cela permet ensuite de faire des groupes d'environ 16 élèves.

4 Conception

La seconde étape du projet consiste à poursuivre la conception pour arriver à un mécanisme complet fonctionnel pour chacun des projets sélectionnés. L'objectif est de modéliser complètement le système et de réaliser un dessin de définition pour chaque pièce. Durant cette étape, les étudiants sont répartis en binômes qui sont, chacun, responsables d'une partie du mécanisme.

Afin d'atteindre cet objectif, les étudiants utilisent tout ou partie des prérequis suivants :

- Connaissance des principes de mécanique générale. Sur toute la première année, 96 heures de la formation sont consacrées à l'étude des notions de mécanique générale (cinématique, statique, dynamique, RdM).
- Connaissance des matériaux et de leurs propriétés. Les types de matériaux, leurs principales caractéristiques et leurs traitements sont abordés pendant 128 heures de la formation (96 heures en première année et 32 heures en seconde année).
- Mise en œuvre et représentation d'une cotation fonctionnelle. Durant le second semestre de la formation, les étudiants apprennent à lire les indications de cotation fonctionnelle sur un dessin technique, puis dans un second temps la démarche pour mettre en place cette même cotation. Ce cours se déroule sur 14 heures.

Le changement principal par rapport à l'étape précédente est le passage d'un travail individuel à un travail en équipe. Ce fonctionnement en équipe s'effectue sur deux niveaux. Le premier est au niveau du binôme. Les deux membres doivent se mettre d'accord sur la manière de fonctionner ainsi que la répartition du travail. Le deuxième niveau est le groupe chargé d'un même projet. En effet, chaque projet est découpé en huit parties correspondant aux différentes classes cinématiques du système. La coordination générale est assurée par le binôme 1 qui joue le rôle de chef de projet. Celui-ci est assuré par l'étudiant à l'origine du projet choisi ; il doit s'assurer que tout le monde avance dans la même direction. Respectant cette hiérarchisation générale, tous les binômes doivent ensuite se mettre d'accord au niveau des interfaces pour garantir le fonctionnement global du système. La cohérence des interfaces est normalement garantie par une application correcte de la modélisation descendante. Au niveau logiciel, le réseau informatique permet à chaque étudiant de visualiser en lecture seule l'ensemble du projet et par conséquent le travail des autres binômes, mais chacun ne peut intervenir que sur sa propre partie.

Les étudiants disposent, comme point de départ, du modèle du projet retenu qui a été fractionné en plusieurs parties de même importance, ainsi que d'un cahier des charges plus précis sur les caractéristiques attendues pour le système. Ils vont travailler à prévoir les différentes pièces pour la partie concernée. Il faut ensuite modéliser toutes les pièces et les dimensionner afin qu'elles répondent au mieux au cahier des charges. Pour la partie dimensionnement, les étudiants sont formés durant cette étape et encouragés à utiliser le logiciel de calcul Mathcad 15 couplé au logiciel de CAO. À partir de données d'entrées qu'ils choisissent (vitesse, résistance des matériaux,...), le dimensionnement du système ou tout simplement des pièces peut être continuellement vérifié afin de respecter les caractéristiques attendues du mécanisme. Ceci est assuré par des feuilles de calculs génériques (dimensionnement d'un roulement, ...) ou spécifiques (analyse de la cinématique du système réalisé, ...) que les étudiants auront eux-mêmes rédigées en application des autres cours qu'ils ont déjà eu. Cette étape se termine au bout de 28 heures lorsque toutes les pièces ont été modélisées en 3D sous Creo Elements/Pro, chaque pièce étant accompagnée de son dessin de définition convenablement spécifié. Cette étape du projet met les talents de concepteur des étudiants à rude épreuve !

5 Préparation de la FAO

L'objectif de la troisième étape du projet consiste à préparer au mieux la réalisation de leurs pièces qui seront ensuite fabriquées durant la quatrième étape. Chaque binôme doit s'atteler à la rédaction des différents documents décrivant la fabrication ainsi que la liste du matériel dont il aura besoin.

Les prérequis pour cette étape sont les suivants :

- Choisir les moyens pour la réalisation d'une pièce mécanique. Durant 20 heures, pendant le semestre 3, la méthode pour choisir le processus de fabrication d'une pièce est enseignée. Ce choix est réalisé en fonction de ses caractéristiques (formes, état de surface,...) indiqués sur le dessin de définition et du parc machine disponible. Le processus de fabrication est formalisé par la rédaction d'un Avant-

Projet d'Étude de Fabrication (APEF) et de la rédaction partielle des contrats de phases.

- Choisir les conditions optimales pour un usinage donné. Durant le semestre 4, les enseignants présentent en 20 heures comment choisir les conditions de coupe pour un usinage. Celles-ci sont déterminées afin de garantir la plus grande productivité ou une production la plus économique. Ces données permettent de finaliser les contrats de phase obtenus durant le module précédent.
- Modéliser un processus de fabrication sous le logiciel Creo Elements/Pro. Durant un module de 12 heures pendant le semestre 4, chaque étudiant apprend à modéliser les trajectoires d'usinages nécessaires à la réalisation d'une pièce. Cette modélisation est réalisée à partir d'un APEF et de contrats de phases fournis.

Pour cette étape du projet et pour la suite, la répartition des étudiants ne change pas. Ils sont toujours par binôme et sont responsables de la fabrication des pièces qu'ils ont conçues à l'étape précédente. Leur point de départ est un ensemble de pièces modélisées en 3D avec leurs dessins de définition. Ils disposent des caractéristiques du parc machines de l'école, de la liste des outils disponibles et des catalogues des fabricants d'outil (choix les conditions de coupe). C'est ensuite à eux de choisir une méthode pour obtenir leurs pièces. L'équipe d'enseignants leur conseille de suivre la démarche vue en cours pour la mise en place d'une gamme de fabrication : mise en place d'APEF (machines, mise en position géométrique, phases, ...), rédaction des contrats de phases (outils et conditions d'utilisation, mise en position technologique, porte-pièce, ...).

Une fois les gammes de fabrication réalisées, les étudiants utilisent la partie axée sur la fabrication de Creo Elements/Pro afin de modéliser la fabrication de chacune de leurs pièces. Ils définissent l'ensemble des trajectoires que devront suivre les outils choisis mais également les paramètres nécessaires au bon déroulement de la fabrication (lubrification, conditions de coupe, brut, ...). Cette étape du projet se termine lorsque toute la fabrication a été modélisée sur informatique et que tous les documents relatifs à la fabrication (matière nécessaire, APEF et contrats de phase) ont été rédigés. Chaque étudiant dispose de 16 heures pour mener cette tâche à bien.

6 Réalisation

La dernière étape est consacrée entièrement à la réalisation des différentes pièces du mécanisme et à l'assemblage final.

Pour aboutir à ce résultat, les étudiants doivent utiliser les connaissances acquises lors de cours précédents :

- Mise en œuvre de machines outils et exécution de programmes d'usinage. Après un premier contact de 16 heures au cours desquelles ils découvrent le fonctionnement général d'un certain nombre de machines d'usinage (découpe jet d'eau, tournage, fraisage, ...) au cours du semestre 1, durant le semestre 2, les étudiants effectuent 32 heures de travaux pratiques sur machines. Ils y apprennent le fonctionnement des machines ainsi que la démarche pour préparer et réaliser la fabrication d'une pièce.
- Contrôle et mesure d'une pièce mécanique. Pendant le semestre 3, les principes de métrologie sont abordés durant 22 heures. Les étudiants découvrent et expérimentent plusieurs instruments de contrôle et de mesure allant du pied à coulisse à des moyens de mesures tridimensionnelles plus performants.

Chaque binôme est responsable de la réalisation de ses propres pièces et dispose à cet effet de 32 heures. Durant cette étape chaque groupe de 16 est subdivisé en deux afin d'éviter au maximum une surcharge de l'atelier. La capacité est limitée par la présence de seulement 4 machines d'usinage, mais c'est aussi une question de sécurité, étant donné les risques liés à la puissance des machines. Toutefois, cela ne suffit pas toujours, les étudiants doivent travailler en groupe afin d'organiser au mieux la production des pièces du mécanisme.

Durant cette étape du projet, les étudiants s'occupent de toutes les phases de la fabrication. Ils commencent par préparer la matière dont ils ont besoin (découpe de barres, ..). Ensuite ils génèrent les programmes d'usinage à partir des trajectoires prévues durant la précédente étape du projet. Enfin ils terminent par la préparation des machines (outils et jauges, prises d'origine, ...). Une fois celle-ci faite, les programmes sont exécutés, ce qui permet d'obtenir les pièces conçues (après, bien entendu, une dernière phase de simulation de trajectoire sur les machines). En théorie, cette dernière étape peut être très rapide si tout le travail précédent a été correctement exécuté, mais il arrive (comme souvent) que tout ne se passe pas comme

prévu et alors les étudiants sont obligés d'ajuster certaines pièces ou de reconcevoir une partie du mécanisme. C'est dans cette étape que les étudiants se rendent compte qu'une bonne préparation leur permet de minimiser le temps entre l'idée de départ et la fin de la réalisation d'un mécanisme en essayant de repérer au plus tôt les points délicats durant la phase de création et de conception. Cette étape du projet se termine lorsque le mécanisme est entièrement réalisé et assemblé.

7 Exemple de la pompe oscillante

Durant l'année 2009-2010, le projet consistait à réaliser une pompe à chambre oscillante. Le fonctionnement de cette pompe est basé sur le principe de fonctionnement d'une bielle sur une manivelle. La figure 1 montre la modélisation 3D de cette pompe. Le moteur électrique crée un mouvement de rotation et entraîne un train d'engrenages pour adapter la vitesse et le couple disponible. Au bout du train d'engrenages se trouve un excentrique sur lequel est fixé le piston. Celui-ci coulisse dans une chambre qui a la particularité de pouvoir osciller autour d'un axe vertical. Cette rotation, qui est induite par la rotation de l'excentrique, met en communication la chambre du piston alternativement avec l'admission et le refoulement de la pompe.

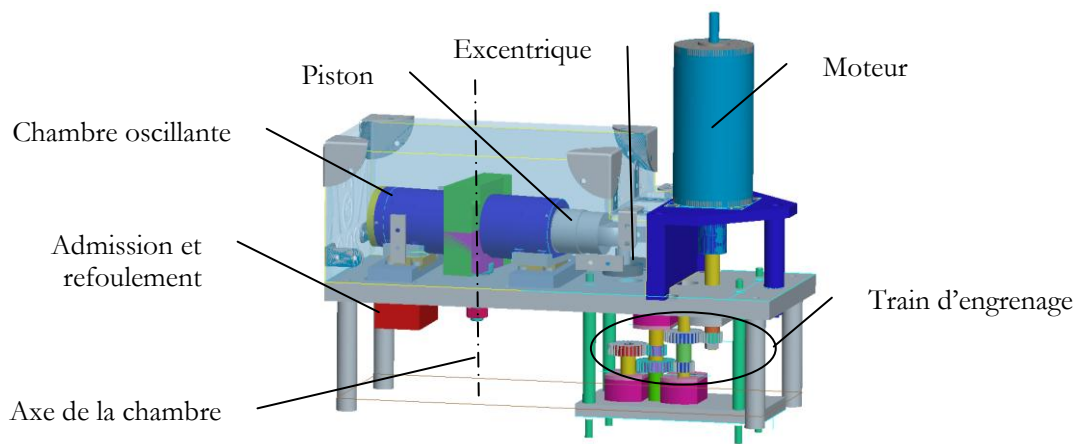


FIG. 1 – Modélisation 3D de la pompe oscillante

L'intérêt de ce projet réside dans trois parties :

- La partie « réducteur ». La pompe comporte un réducteur composé de plusieurs pignons à denture droite. Bien que ces pignons n'aient pas été réalisés au sein de l'école, il est intéressant de mettre en pratique les calculs de réduction dans un cas pratique ainsi que les précautions à prendre sur l'entraxe pour garantir le bon engrenement des roues.
- La partie étanchéité par frottement. Le contact entre la chambre oscillante et le bâti où se situent les trous d'admission et de refoulement, est un simple contact plan. Il a été intéressant d'étudier comment garantir l'étanchéité tout gardant un coefficient de frottement raisonnable. Pour cela les étudiants ont dû s'intéresser au choix des matériaux et à l'état de surface alors que la gestion de l'effort plaqueur a été réalisée par l'intermédiaire de rondelles Belleville.
- La partie ajustement piston-chambre. La liaison entre la chambre et le piston a nécessité un processus de fabrication spécifique : réaliser la chambre en premier. En effet, l'école dispose d'une rectifieuse cylindrique permettant de réaliser un arbre (comme le piston) à quelques microns près. Il est donc nécessaire de réaliser le piston en second afin de garantir l'ajustement voulu, garantissant le bon glissement du piston dans la chambre tout en maintenant une certaine étanchéité en tenant compte des dimensions effectives de la chambre.

Du fait des effectifs de l'année dernière, trois groupes d'étudiants et par conséquent trois pompes différentes ont pu être modélisées complètement pour être fabriquées. Malheureusement, une seule a pu être réalisée complètement et assemblée. La figure 2 représente la pompe réalisée.

8 Conclusion

En arrivant au terme de cet article, il apparaît que le module de projet de l'ENSISA présente trois points remarquables. Le premier est d'ordre pédagogique. Il représente une application complète d'un grand

nombre de cours qui sont dispensés lors de la formation d'un ingénieur. Cet application permet de sensibiliser les étudiants au fait que chaque discipline ne doit pas être perçue comme indépendante mais plutôt comme un outil qui leur permet de résoudre leurs problèmes et d'ainsi d'atteindre leurs objectifs en relation avec les autres.

Le second intérêt du projet réside dans le domaine des sciences humaines. À l'heure où la communication est prépondérante, le projet aborde le travail d'équipe de manière développée en créant plusieurs niveaux de groupes. En effet, excepté durant la première étape où le travail est individuel, tout le travail doit être réalisé en équipe. De plus, cette hiérarchisation se fait à deux niveaux différents. En effet, chaque étudiant doit dans un premier temps s'entendre avec son binôme. Cette relation est facilitée par le fait que les élèves choisissent eux-mêmes la répartition en binômes. Par contre, chaque binôme doit également se débrouiller avec le groupe de niveau supérieur, ce groupe global, travaillant sur un même projet et étant constitué en fonction de plusieurs contraintes extérieures.

Le troisième intérêt réside dans la finalité de la formation. Le projet donne un avant goût du métier d'un ingénieur. Bien que la notion d'ingénieur puisse être sujette à diverses interprétations, il est souvent reconnu qu'un ingénieur est quelqu'un qui dispose d'un certain savoir qui va lui permettre de résoudre un problème donné. Pour cela, il va devoir analyser le problème, chercher des solutions, choisir la meilleure et souvent présenter ses résultats. De plus, tout ceci devra en général être réalisé en respectant un calendrier imposé. Tous ces aspects sont présents au sein du projet et font même partie de l'évaluation des étudiants.



FIG. 2 – La pompe oscillante

Plusieurs limites subsistent. La première concerne le temps. En effet malgré les diverses « alarmes » de l'équipe enseignante, il est courant qu'une étape du projet se finisse au début de la suivante. Cela peut avoir comme conséquence un retard qui se reporte d'une étape à l'autre. C'est l'une des raisons qui explique que deux projets sur les trois de l'année dernière ne soient pas arrivés à leur terme. Il est d'ailleurs assez difficile pour l'équipe enseignante de choisir un thème de projet suffisamment complet pour être intéressant tout en restant assez simple et petit pour être réalisé. L'ensemble du projet étant réalisé sur un semestre, les séances se succèdent à un rythme important nuisant à la prise de recul des étudiants sur leur travail.

La seconde limite provient du travail d'équipe qui est poussé assez loin. Or il suffit qu'un des maillons de l'équipe soit un peu plus faible ou fasse preuve de mauvaise volonté pour que tout le projet prenne du retard et n'aboutisse pas. Ceci est la deuxième cause expliquant qu'un seul projet se soit terminé l'année dernière.

Malgré ces quelques limites, le projet est très apprécié par les étudiants pour le côté travail de groupe mais aussi pour la compétition entre les différents groupes. Le fonctionnement même du projet fait que les étudiants sont assez libres et peuvent gérer leur temps comme ils le souhaitent. La plupart sont motivés et s'investissent fortement pour arriver au bout. A la fin du projet, il existe une bonne ambiance de groupe et une forte complicité entre tous les membres qui ont œuvré pour aboutir à la réalisation d'un même projet.

References

[1] Mathieu D., CAO par modélisation top to down, Journées AUM/AFM, 106-106, 27-29 août 2008, Mulhouse