



UNIVERSITE SIDI MOHAMMED BEN ABDELLAH
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE FES

CENTRE D'ETUDES DOCTORALES : SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'INGENIEUR

N° d'ordre : 26/2016

**Développement d'une approche rationnelle pour le renforcement
de la capacité de conception et d'innovation technologique :
implémentation en formation d'ingénierie mécanique**

Mme Jihane Kojmane

Thèse soutenue publiquement

Le 05/10/2016

Pour l'obtention du titre de

Docteur ès Sciences et Techniques de l'Ingénieur

Devant le jury composé de :

Nom et prénom	Titre	Etablissement	
Bilal HARRAS	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Président
Pascal ALBERTI	PES	UT Compiègne France	Rapporteur
Yassine SALIH ALJ	PES	Université Al Akhawayn Ifrane	Rapporteur
Ahmed RECHIA	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Tanger	Rapporteur
Mohammed EL MAJDOUBI	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Rapporteur
Jalil ABOUCHITA	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Examineur
Ahmed ABOUTAJEDDINE	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Directeur de thèse

Laboratoire d'accueil : Génie Mécanique

Etablissement : Faculté des Sciences et Techniques de Fès



UNIVERSITE SIDI MOHAMMED BEN ABDELLAH
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE FES

CENTRE D'ETUDES DOCTORALES : SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'INGENIEUR

N° d'ordre :

**Développement d'une approche rationnelle pour le renforcement
de la capacité de conception et d'innovation technologique :
implémentation en formation d'ingénierie mécanique**

Mme Jihane Kojmane

Thèse soutenue publiquement

Le 05/10/2016

Pour l'obtention du titre de

Docteur ès Sciences et Techniques de l'Ingénieur

Devant le jury composé de :

Nom et prénom	Titre	Etablissement	
Bilal HARRAS	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Président
Pascal ALBERTI	PES	UT Compiègne France	Rapporteur
Yassine SALIH ALJ	PES	Université Al Akhawayn Ifrane	Rapporteur
Ahmed RECHIA	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Tanger	Rapporteur
Mohammed EL MAJDOUBI	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Rapporteur
Jalil ABOUCHITA	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Examineur
Ahmed ABOUTAJEDDINE	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Directeur de thèse

Laboratoire d'accueil : Génie Mécanique

Etablissement : Faculté des Sciences et Techniques de Fès

A la mémoire de mon fils *Adam*
Je t'aimerai toujours - *Maman*

DEDICACES

A ma mère, merci d'avoir toujours été là pour moi, merci de m'avoir soutenue dans les différentes décisions de ma vie, merci de m'avoir toujours accompagnée par tes prières, ton aide précieuse et ta grande foi que « *Tout ira pour le mieux Inchaallah...* », et qui m'a toujours inspirée. Que Dieu te garde et te récompense pour tes efforts fournis tout au long de ces années.

A mon père, merci de m'avoir encouragé lorsque je t'ai parlé de mon désir de faire une thèse, merci pour ton soutien, merci de m'avoir appris la valeur de l'éducation et de l'enseignement dès mon jeune âge ; cette thèse est pour une bonne éducation pour les générations futures. Que Dieu te garde et te récompense pour tes efforts fournis tout au long de ces années.

A mon très cher mari Anass, de tous les choix que j'ai faits dans ma vie, celui qui m'a le plus apporté de bonheur est de t'avoir épousé... Merci pour ton support technique, émotionnel et affectif tout au long de cette thèse, merci de m'avoir toujours encouragé et de m'avoir procuré un environnement agréable. Merci aussi pour les longues heures de discussion autour de ma thèse et autour du métier que nous aimons le plus : l'enseignement. Merci d'être présent dans ma vie, et merci d'avoir été là quand rien n'allait. Que Dieu te garde et nous réserve un avenir meilleur...

A ma très chère sœur Widade, je ne saurais oublier le soutien avec lequel tu m'as accompagnée tout au long de ma vie, et tout au long de ces quatre années de thèse. Merci pour les conseils pratiques, pour les remarques drôles, et pour l'inspiration que me procure ton courage, ta persévérance et ton acharnement. Merci aussi de m'avoir tenu la main dans les moments les plus durs de ma vie...

A ma très chère tante Khadija, on dit souvent qu'une tante est une deuxième mère, et je te remercie d'avoir joué ce rôle dès ma plus tendre enfance. Merci pour ton soutien, tes encouragements, et tes prières qui me protègent. Que Dieu te garde et te récompense pour tes efforts fournis tout au long de ces années.

A mes amours Inès et Ziyad, vous êtes ma plus grande inspiration, mon sourire et ma joie. Merci pour les moments de tendresse que vous m'avez procurés, les moments drôles, et les moments où vous ne m'avez pas laissée travailler... Cette thèse est pour vous mes enfants, pour un avenir radieux. Que Dieu vous garde. (P.S : C'est Tati !)

A mes beaux frères, Simohemmed, Abdelhak et Hicham, merci de faire partie de la famille, et merci pour les bons moments passés ensemble. Que Dieu vous réserve un avenir radieux.

A tous ceux qui ont cru en moi...

REMERCIEMENTS

Une thèse n'est jamais le fruit d'une seule personne. Pour ma part, j'ai eu la chance et l'honneur d'être très bien accompagnée tout au long de ces quatre années par des gens à qui je dois de dire merci.

Mes remerciements vont en premier lieu à mon directeur de thèse Pr. Ahmed Aboutajeddine pour la confiance qu'il m'a accordée en acceptant de m'encadrer dans ce travail doctoral, et pour toutes les heures qu'il a consacrées pour la direction de cette recherche. J'ai été particulièrement sensible à ses qualités humaines d'écoute, de compréhension et d'encouragement, qui m'ont fait avancer dans cette grande étape de ma vie, me faisant passer d'une élève tâtonneuse à une chercheuse assurée. Je lui dis merci aussi pour avoir toujours pris en considération les petites frustrations de la thèse, les moments de doute, d'angoisse et de découragement, et de m'avoir fait comprendre que dans la vie, il n'y a pas vraiment d'échec ; tout est opportunité, tout est expérience, tout est construction...

Je sais infiniment gré aux professeurs Mohammed El Majdoubi, Pascal Alberti, Yassine Salih Alj et Ahmed Rechia, d'avoir accepté la fonction de rapporteurs, et de m'avoir prodigué conseils et remarques pour l'amélioration de la rédaction de cette thèse. Merci également aux professeurs Bilal Harras et Jalil Abouchita d'avoir accepté de faire partie du jury de soutenance, vous m'en faites honneur.

Je souhaiterais aussi adresser ma gratitude à tous les professeurs du département de génie mécanique de la FST de Fès qui ont toujours accepté d'aider dans l'évaluation des projets des étudiants les jours de compétitions, merci pour l'ambiance agréable que vous avez fait régner lors de ces journées.

Mes remerciements vont également à Mr le Doyen Mr Mustapha Ijjaali pour son support pour cette thèse, l'intérêt qu'il y a porté, ainsi que toutes les ressources qu'il a déployées pour les projets et pour l'organisation des compétitions. Merci également à tout le staff administratif pour leurs efforts, leur disponibilité et leur persévérance pour rendre agréable le parcours du doctorant.

Je remercie aussi le Centre National pour la Recherche Scientifique et Technique pour avoir apporté une contribution financière à cette recherche.

Mes sincères gratitudes à toutes les doctorantes du département de génie mécanique, Mounia, Houda, Zineb, Ghita, Sanae, Hasana, Ghita, et Zoubida, pour les bons moments passés ensemble au sein du département, et pour le soutien moral que vous m'avez fourni dans les moments difficiles. Un remerciement particulier à Mounia qui n'a jamais cessé de me faire rire, pleurer et puis rire à chaque réunion de travail, à chaque coup de téléphone et à chaque rencontre. Très bonne chance à toutes !

Merci finalement à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de cette thèse, tant au niveau technique par les conseils, les remarques et les critiques, qu'au niveau affectif par leur encouragement, et leur inspiration.

RESUME

L'émergence d'une nouvelle économie de savoir et de partage a façonné un monde très changeant et concurrentiel avec de nouveaux défis et challenges. Ces changements ont apporté des opportunités insoupçonnées et ont forcé les entreprises à innover de façon continue afin de maintenir leur développement. Pour répondre à ces changements, plusieurs pays ont été contraints d'imaginer des stratégies pour améliorer leur aptitude à concevoir de nouveaux produits innovants. Par conséquent, le développement des capacités d'innovation est devenu une clé majeure dans la dynamique de croissance des nations, en particulier dans les pays en voie de développement. La pierre angulaire de cette démarche est la formation d'ingénieurs possédant des compétences approfondies en développement de nouveaux produits et solutions innovants. Pour cette raison, il devient de plus en plus pressant d'adapter la formation d'ingénieurs à cette cause et former des ingénieurs compétents en conception et innovation technologique, à travers le développement et l'implémentation d'activités de conception dans les curriculums d'ingénierie. Dans certaines universités et dans les pays en développement en général, ce défi est plus critique en raison de contraintes inhérentes relatives au manque de ressources financières et humaines.

Dans cette perspective, cette thèse vise à renforcer les habiletés en conception et innovation des étudiants en ingénierie à travers un projet de design adapté aux différentes contraintes financières et humaines. La solution a été développée en utilisant une méthodologie de design, en prenant en compte trois composantes essentielles. La première composante identifie les habiletés d'innovation que les étudiants en ingénierie doivent acquérir tout au long de leur curriculum, la seconde souligne les contraintes d'implémentation principalement relatives aux ressources, et la troisième propose des mesures pour évaluer à la fois la performance des étudiants et la pertinence de la solution proposée.

La solution a abouti à un concept intitulé « *Enjoyeering* » qui est un projet majeur de design et d'acquisition de compétences d'innovation implémenté dans le curriculum d'ingénierie mécanique de notre faculté. *Enjoyeering* comprend trois sous-projets dédiés à chaque niveau du curriculum :

Enjoyeering Freshman est un projet qui plonge les étudiants de première année dans une approche de pensée design pour créer des applications robotiques en utilisant des kits robotiques non coûteux. Le projet a pu introduire les étudiants précocement aux problèmes d'ingénierie et aux connaissances en design à travers le processus de la pensée design et leur a

permis de développer des compétences relatives au processus de design telles que la résolution créative de problèmes, la génération d'idées et de concepts, la sélection de concepts et le prototypage. Les étudiants ont aussi gagné une expérience en travail collaboratif et ont pu améliorer leurs compétences en communication orale durant les présentations de leurs projets.

Enjoyeering Junior est un projet implémenté en parallèle avec un cours de mécanique de solides, et qui immerge les étudiants de deuxième année dans le design et la construction de systèmes mécatroniques en utilisant du matériel non coûteux et des outils ouverts. L'évaluation du projet a montré que les étudiants ont amélioré leurs connaissances en processus de design, satisfaisant par conséquent les objectifs du cours de mécanique de solides et améliorant un ensemble de compétences douces telles que la communication et le travail collaboratif.

Enjoyeering Senior est un projet majeur de conception de produits qui utilise un processus de design personnalisé en combinaison avec un ensemble de matériel non coûteux, créant un environnement d'apprentissage pour les étudiants pour le développement de compétences en conception. Le projet implémenté dans notre faculté a montré durant l'évaluation que les étudiants ont amélioré d'une manière significative leur assimilation du processus de design, ainsi que les compétences qui lui sont relatives telles que le prototypage numérique, la programmation par Matlab, le raisonnement divergent et visuel...etc.

D'une manière générale, le concept *Enjoyeering* a pu répondre aux objectifs principaux de cette thèse. D'une part, il a pu contribuer au développement d'habiletés qui vont permettre aux étudiants d'être de futurs ingénieurs capables d'innover, à savoir les connaissances en design d'ingénierie, les compétences relatives au processus de design, et les compétences personnelles et interpersonnelles. D'autre part, il a pu répondre aux challenges des contraintes locales d'implémentation, du fait que le coût du matériel utilisé, la durée du projet, ainsi que les ressources humaines impliquées ont été très raisonnables, ce qui nous pousse à penser fortement que la solution *Enjoyeering* est particulièrement adaptée aux institutions à ressources limitées, spécialement celles des pays émergents ou en voie de développement.

Abstract

The emergence of a new economy of shared knowledge has shaped a highly changing and competitive world, and infused new challenges and possibilities. These changes have brought opportunities as well as pressures on firms to continuously innovate for the purpose of sustaining and improving their competitive position. To respond to these changes, nations have been compelled to introduce strategies for improving their abilities to produce innovative products. Consequently, the build-up of innovation capacities has become a major key in the growth dynamics of nations, especially in developing countries. Indeed, tomorrow's innovations need engineers who have thorough engineering design competencies for the development of new products and solutions. For that reason, there is a pressing request for adapting engineering education to this cause and graduating competent design engineers, by developing and implementing design activities in engineering curriculums. In some universities and in developing countries in general, this challenge is more critical due to inherent constraints such as scarcity of financial and skilled human resources.

In this perspective, this thesis aims to build the innovation and engineering design abilities of engineering students through tailored design project suitable for contexts of inherent constraints. The solution was developed through a design methodology, taking into account three main components. The first component identify the targeted innovation abilities that engineering students should acquire during the engineering curriculum, the second underlines the constraints of implementation in the context of resources scarcity, and the third proposes design-based measures for both students' performance and solution's evaluation.

The solution has culminated into a concept untitled *Enjoyeering* which is a major project of design and innovation skills acquisition implemented in the mechanical engineering curriculum of our faculty. *Enjoyeering* encompasses three subprojects dedicated to each level of the curriculum.

Enjoyeering Freshman is a project that plunges first year students in a design thinking approach to create robotic applications using only cost-effective robotic kits. The project has introduced students at a very early stage to engineering problems and design knowledge through the design thinking process and allowed them to develop design-related skills such as creative problem solving, ideas and concept generation, selection of concepts and prototyping. The students also gained experience in collaborative work and were able to improve their oral communication skills during presentations of their projects.

Enjoyeering Junior is a project concurrently implemented with a mechanical dynamics course, which immerses second-year students into the design and building of mechanical systems in motion using low-cost materials and open tools. Project assessment has shown that students enhanced their engineering design process knowledge, fulfilling, therefore, mechanical dynamics course's skill outcomes more deeply, and improving a set of student's soft skills, as communication and teamwork abilities.

Enjoyeering Senior is a product design project that uses a customized design process, in conjunction with cost effective hardware, as a vehicle for producing a learning environment for students to gain key design skills. The project, implemented in our faculty, was assessed through proposed design-based measures. It is shown that students enhanced significantly their understanding of the design process and its related hard and soft skills as numerical prototyping, Matlab programming, and divergent and visual thinking.

The thesis objectives have been met through the project *Enjoyeering*. Indeed, *Enjoyeering* has contributed to the development of abilities that will enable students to be competent engineers who can design innovative products and solutions, including design knowledge skills, engineering design competencies, as well as personal and interpersonal skills. On the other hand, *Enjoyeering* has met the local constraints of implementation by involving reasonable financial and human resources, as well as acceptable duration of implementation. Based on these results, we strongly believe that this solution could be suitable for institutions of limited resources, especially in emerging and developing countries.

Sommaire

Liste des figures.....	i
Liste des tables.....	iv
Liste des abréviations.....	v
Chapitre I : Introduction générale.....	1
I-1 Contexte actuel	2
I-2 Motivations de la thèse.....	3
I-3 Objectifs de la recherche.....	5
I-4 Structure de la thèse.....	5
Chapitre II : L'innovation dans les formations d'ingénierie.....	8
II-1 Définition de l'innovation et son importance en ingénierie.....	9
II-1-1 Définition de l'innovation.....	9
II-1-2 Les différents types d'innovations.....	10
II-1-3 Les différentes formes d'innovations.....	11
II-1-4 L'innovation et l'ingénierie.....	12
II-2 L'innovation et la formation des ingénieurs.....	13
II-2-1 La formation des ingénieurs.....	13
II-2-2 L'innovation dans la formation des ingénieurs.....	20
II-3 L'innovation et le design en ingénierie.....	21
II-3-1 Définition du design en ingénierie.....	21
II-3-2 Le processus du design en ingénierie.....	24
II-3-3 Le design dans les curriculums d'ingénierie.....	25
II-3-4 Les projets de design dans les curriculums d'ingénierie.....	26
II-3-5 Les initiatives visant à intégrer le design dans les curriculums d'ingénierie.....	30
II-4 Conclusions.....	48
CHAPITRE III : Processus de design et développement de produits innovants.....	50
III-1 Introduction.....	51
III-2 Découverte d'opportunités de produits.....	52
III-2-1 Identification d'opportunités.....	52
III-2-2 Planning.....	53
III-3 Définition du produit.....	54
III-3-1 Identification des besoins du client.....	55
III-3-2 Expression fonctionnelle du besoin.....	59
III-3-3 Identification des spécifications du produit.....	61
III-4 Design conceptuel.....	62
III-4-1 La génération de concepts.....	62
III-4-2 La sélection de concept.....	64
III-5 Développement de produits.....	66
III-5-1 Concrétisation du concept.....	66
III-5-2 Le design détaillé.....	67
III-5-3 Pré-production.....	67
III-6 Conclusions.....	67

CHAPITRE IV : Cadre Rationnel pour le développement des projets de développement de produits ciblant les compétences d'innovation.....	68
IV-1 Introduction.....	69
IV-2 Application de l'approche design pour la conception du cadre rationnel.....	70
IV-2-1 Analyse des besoins.....	70
IV-2-2 Analyse fonctionnelle.....	71
IV-3 Génération de concepts : <i>Le projet Enjoyeering</i>	101
IV-4 Conclusions.....	105
CHAPITRE V : Conception et implémentation du projet Enjoyeering Freshman.....	107
V-1 Introduction.....	108
V-2 L'activité Enjoyeering Freshman.....	108
V-3 Processus personnalisé basé sur le design pour l'activité Enjoyeering Freshman	109
V-4 Les outils utilisés.....	110
V-5 Implémentation de l'activité Enjoyeering Freshman.....	113
V-5-1 Organisation et formations.....	113
V-5-2 La compétition et l'évaluation.....	116
V-5-3 Exemples de projets des étudiants.....	117
V-6 Résultats.....	119
V-7 Conclusions et perspectives.....	120
CHAPITRE VI : Conception et implémentation du projet Enjoyeering Junior.....	122
VI-1 Introduction	123
VI-2 Le projet <i>Enjoyeering Junior</i>	124
VI-3 Processus personnalisé basé sur le design pour l'activité <i>Enjoyeering Junior</i>	124
VI-4 Outils utilisés.....	128
VI-4-1 Outils utilisés dans la 1 ^{ère} phase : Working Model.....	128
VI-4-2 Outils utilisés dans la 2 ^{ème} phase: Matériel usuel.....	129
VI-4-3 Outils utilisés dans la 3 ^{ème} phase: Arduino	129
VI-5 Implémentation de l'activité Enjoyeering Junior.....	130
VI-5-1 Organisation	130
VI-5-2 La compétition	132
VI-6 Evaluation et Résultats	133
VI-6-1 Evaluation sommative des étudiants	133
VI-6-2 Evaluation formative des étudiants.....	135
VI-7 Conclusions et perspectives	138
CHAPITRE VII : Conception et implémentation du projet Enjoyeering Senior.....	139
VII-1 Introduction.....	140
VII-2 Le projet <i>Enjoyeering Senior</i>	140
VII-3 Processus personnalisé basé sur le design pour l'activité <i>Enjoyeering Senior</i>	140
VII-4 Outils utilisés.....	143
VII-5 Implémentation de l'activité Enjoyeering Senior.....	144
VII-5-1 Organisation et formations	144
VII-5-2 Exemples de projets des étudiants	147
VII-6 Evaluation et résultats.....	148
VII-6-1 Evaluation de la performance des étudiants.....	148
VII-6-2 Résultats et discussion.....	151
VII-7 Conclusion et perspectives.....	153

CHAPITRE VIII : Conclusion générale et perspectives.....	155
VIII-1 Conclusion générale.....	156
VIII-2 Perspectives à court terme.....	159
VIII-3 Perspectives à long terme.....	159
 REFERENCES.....	 164
Annexe 1 : La méthode QFD.....	176
Annexe 2 : Photos du projet <i>Enjoyeering Freshman</i>	182
Annexe 3 : Etapes suivies par les étudiants lors du projet <i>Enjoyeering Junior</i>	185
Annexe 4 : Photos du projet <i>Enjoyeering Junior</i>	188
Annexe 5 : Questionnaire destiné aux étudiants pour l'évaluation de l'acquisition des compétences durant le projet <i>Enjoyeering Junior</i>	190
Annexe 6 : <i>Enjoyeering Senior</i> - Extrait du rapport de projet de conception d'une machine de nettoyage et désinfection automatique d'endoscopes McDAE.....	191

Liste des figures

Figure 1 : Structure de la thèse

Figure 2 : Définition de l'innovation basée sur la créativité et le design

Figure 3 : Organigramme représentant le processus basique de design de produit par Pahl and Beitz

Figure 4 : Organigramme représentant le processus basique de design de produit par Ulrich et Eppinger

Figure 5 : Processus adapté de design et développement de produits innovants avec quelques outils utilisés

Figure 6: Etapes clés de la phase de définition du produit (Ulrich and Eppinger 2008)

Figure 7 : Partie d'un diagramme d'affinité des attentes de clients d'une porte d'automobile (Hauser et Clausing 1988)

Figure 8 : Modèle de KANO sur les attentes de clients

Figure 9 : Traduction des attentes clients en fonctions de produit

Figure 10 : Méthodologie de l'analyse fonctionnelle

Figure 11 : Ordonnancement des fonctions selon la méthode de l'arbre fonctionnel

Figure 12 : Exemple de caractérisation de fonctions relatives à la conception d'un tournevis

Figure 13 : 1^{ère} étape de la construction de la maison de qualité; construction de la zone des Quoi

Figure 14 : 2^{ème} étape de la construction de la maison de qualité ; construction de la zone des Comment

Figure 15 : 3^{ème} étape de construction de la maison de la qualité ; construction de la zone des Comment

Figure 16 : 4^{ème} étape de construction de la maison de la qualité ; construction de la zone des Quoi vs les Comment

Figure 17 : 5^{ème} étape de construction de la maison de la qualité ; construction de la zone des interrelations entre les Comment et les Comment

Figure 18 : 6^{ème} étape de construction de la maison de qualité ; construction de la zone du sondage comparatif

Figure 19 : 7^{ème} étape de construction de la maison de la qualité ; construction de la zone de l'étude comparative

Figure 20 : Exemple d'une matrice morphologique de concepts individuels pour une bride de serrage (Ullman 2009)

Figure 21: Exemple de combinaison de concepts individuels pour la génération de concepts généraux (Ullman 2009)

Figure 22 : Préparation de la matrice de Pugh

Figure 23 : Comparaison des différents concepts avec le DATUM

Figure 24 : Dessin de produit d'un concept retenu

Figure 25 : Définition de la capacité d'innover selon notre perspective

Figure 26 : Décomposition fonctionnelle du besoin

Figure 27 : Diagramme des interacteurs et fonctions contraintes

Figure 28 : Dimensions du modèle HCD

Figure 29 : Phases du modèle HCD

Figure 30 : Processus personnalisé du design thinking utilisé par les étudiants de 1^{ère} année dans le projet *Enjoyeering Freshman*

Figure 31 : La brique NXT, les capteurs, et les pièces mécaniques

Figure 32 : Initiation des étudiants à la plateforme Mindstorms

Figure 33 : Grille d'évaluation des projets des étudiants

Figure 34 : Première prise en main avec Lego Mindstorms

Figure 35 : Les étudiants en train de travailler sur leurs projets durant l'activité *Enjoyeering Freshman*

Figure 36 : Démonstration du robot « Garbage collector »

Figure 37 : Démonstration du robot « Clean Stairs »

Figure 38 : Démonstration du robot « Green plants »

Figure 39 : Prototypes de robots réalisés dans le projet *Enjoyeering Freshman*

Figure 40: Compétition *Enjoyeering Freshman*- 3^{ème} prix du jury – The robot Waiter

Figure 41: Compétition *Enjoyeering Freshman*- 2^{ème} prix du jury – The Bracelet Maker

Figure 42: Compétition *Enjoyeering Freshman*- 1er prix du jury – Fresh Floor

Figure 43: Compétences visées par Enjoyeering Junior versus objectifs du cours de mécanique de solides

Figure 44: Phases de l'activité *Enjoyeering Junior*

Figure 45 : Exemples de mécanismes pris d'un livre de mécanique de solides

Figure 46 : Exemple de mécanisme réalisé par les étudiants sur Working Model

Figure 47 : Exemple de matériel usuel utilisé par les étudiants

Figure 48: Exemples d'utilisation de la plateforme Arduino

Figure 49 : Exemple d'un premier dessin d'un système mécanique élaboré par les étudiants

Figure 50 : Exemple de simulation avec le logiciel Working Model 2D

Figure 51 : Calculs théoriques réalisés par les étudiants pour la détermination de la vitesse de déplacement de la scie

Figure 52 : Codes de programmation sur Arduino réalisés par les étudiants pour la programmation de la scie mécanique

Figure 53 : Exemples de projets d'Enjoyeering Junior, édition 2015

Figure 54 : Exemples de projets d'Enjoyeering Junior, édition 2016

Figure 55 : Enjoyeering Junior 2016-Exemples de bras robotiques réalisés par les étudiants

Figure 56 : Enjoyeering Junior 2016-Exemples de ponts réalisés par les étudiants

Figure 57 : Autres photos de projets de l'édition 2016 d'*Enjoyeering Junior*

Figure 58 : Enjoyeering Junior 2015-Autres exemples de projets réalisés par les étudiants

Figure 59 : Enjoyeering Junior 2014-Autres exemples de projets réalisés par les étudiants

Figure 60.a: Evaluation de l'acquisition des connaissances en processus de design

Figure 60.b: Evaluation de l'acquisition des compétences en résolution de problèmes

Figure 60.c: Evaluation de l'acquisition des compétences techniques

Figure 60.d: Evaluation de l'acquisition des compétences transverses

Figure 61 : Boucle du projet de design

Figure 62 : Carte détaillée du processus de design proposé

Figure 63 : (En haut) Exemple d'un code Matlab utilisant une fonction pour la lecture d'un capteur de lumière, (En bas) Exemple d'une modélisation sur Simulink pour la programmation d'un capteur de couleur (*Running Simulink models on Lego Mindstorms NXT* <http://blogs.mathworks.com/simulink/>)

Figure 64: Prototype virtuel du robot Mindstorms dans Catia V5R19

Figure 65 : Exemples de prototypes développés par les étudiants avec Lego Mindstorms

Figure 66 : Fonctions relevées par examen d'environnement dans le projet « Porte-endoscope pour la chirurgie laparoscopique »

Figure 67 : Partie du diagramme FAST pour le projet « Porte-endoscope pour la chirurgie laparoscopique »

Figure 68 : Partie du cahier de charges pour le projet « Porte-endoscope pour la chirurgie laparoscopique »

Figure 69 : Partie de la matrice morphologique pour le projet « Porte-endoscope pour la chirurgie laparoscopique »

Figure 70: Prototypage des mécanismes sous Catia pour le projet « Porte-endoscope pour la chirurgie laparoscopique »

Figure 71 : Prototype numérique final pour le projet « Porte-endoscope pour la chirurgie laparoscopique »

Figure 72 : Partie d'un diagramme FAST du projet « Centrifugeuse et automate d'analyse du sang ».

Figure 73: Partie du cahier de charges du projet « Centrifugeuse et automate d'analyse du sang ».

Figure 74: Partie de la maison qualité du projet « Centrifugeuse et automate d'analyse du sang ».

Figure 75: Partie de la matrice morphologique du projet « Centrifugeuse et automate d'analyse du sang ».

Figure 76 : Prototypage sous Solidworks du projet « Centrifugeuse et automate d'analyse du sang ».

Figure 77 : Partie d'un programme sous Matlab du projet « Centrifugeuse et automate d'analyse du sang ».

Figure 78 : Notes obtenues par les équipes (Edition 2015) dans chaque phase du processus de design

Figure 79 : Evaluation des compétences en CAD et programmation avant et après le projet

Figure 80 : Processus de design utilisé

Figure 81 : Processus d'innovation

Figure 82: Proposition d'illustration pour le processus d'innovation

Liste des tables

Table 1 : Principales compétences requises pour les ingénieurs par les organismes d'accréditation

Table 2 : Types de projets de design et caractéristiques

Table 3 : Méthodes d'intégration du design dans les curriculums d'ingénierie ; avantages et inconvénients

Table 4 : Principales compétences requises pour les ingénieurs par des organismes d'ingénierie

Table 5 : Décomposition fonctionnelle de la fonction relative aux connaissances en découverte et planification de produit

Table 6 : Décomposition fonctionnelle de la fonction relative aux connaissances en définition de produit

Table 7 : Décomposition fonctionnelle de la fonction relative aux connaissances en design conceptuel

Table 8 : Décomposition fonctionnelle de la fonction relative aux connaissances en développement de produits

Table 9: Décomposition fonctionnelle de la fonction relative aux compétences en formulation de problème

Table 10: Décomposition fonctionnelle de la fonction relative aux compétences en résolution de problèmes

Table 11: Décomposition fonctionnelle de la fonction relative aux compétences en analyse d'ingénierie et simulation

Table 12: Décomposition fonctionnelle de la fonction relative aux compétences en fabrication

Table 13: Décomposition fonctionnelle de la fonction relative aux compétences en communication de design

Table 14: Décomposition fonctionnelle de la fonction relative aux compétences en travail collaboratif

Table 15: Décomposition fonctionnelle de la fonction relative aux compétences en communication

Table 16: Décomposition fonctionnelle de la fonction relative aux compétences en prise de décision

Table 17: Décomposition fonctionnelle de la fonction relative aux compétences personnelles

Table 18: Décomposition fonctionnelle des fonctions contraintes

Table 19: Critères d'appréciation des fonctions relatives aux connaissances en design d'ingénierie

Table 20: Critères d'appréciation des fonctions relatives aux compétences de processus de design d'ingénierie

Table 21: Critères d'appréciation des fonctions relatives aux compétences personnelles et interpersonnelles

Table 22 : Principales compétences qui doivent être acquises dans les premières années du curriculum d'ingénierie

Table 23 : Principales compétences qui doivent être acquises dans les dernières années du curriculum d'ingénierie

Table 24 : Liste de matériel utilisé par les étudiants pour la réalisation du projet de la scie mécanique

Table 25 : Besoins identifiés dans le projet « Porte-endoscope pour la chirurgie laparoscopique »

Table 26 : Fonctions relevées par recherche intuitive dans le projet « Porte-endoscope pour la chirurgie laparoscopique »

Table 27 : Mesures d'évaluation pour chaque phase du processus de design

Table 28 : Tableau récapitulatif des projets Enjoyeering, leurs compétences visées et les résultats obtenus

Liste des abréviations

- ABET : *Accreditation Board for Engineering and Technology*
- CEAB : *Canadian Engineering Accreditation Board*
- ENAEE: *European Network for Accreditation of Engineering Education*
- CDIO (Conceive-Design-Implement-Operate)
- IDEA (Institute for Design Engineering and Applications)
- PBL (*Project-based learning*)
- l'IBL (*Inquiry-based learning*)
- DBL (*Design-based learning*)
- MVP: Minimum Viable Product
- BMC: Business Model Canvas
- HCD: Human centered design

CHAPITRE I

INTRODUCTION GENERALE



I-1-Contexte actuel:

En ce début du 21ème siècle, notre environnement change profondément avec une grande vitesse et devient de plus en plus complexe et incertain. Un des moteurs essentiels de ce changement est Internet qui est en train de façonner une économie globale basée sur une profusion de technologies et de connaissances (Barfield et al.2003, Borcuch et al.2012). Ceci a eu pour conséquence d'intensifier la concurrence et d'impacter de façon fondamentale les modèles de développement des entreprises et même des nations. Dans ce nouvel environnement global et dynamique, les entreprises doivent impérativement faire preuve de différenciation concurrentielle pour survivre, et la solution passe par le développement de business model, produits, solutions et procédés innovants. Aujourd'hui, l'innovation est la seule solution tangible qu'ont les entreprises pour tirer leur épine de la dynamique de la compétitivité et surmonter les défis de l'avenir (Andrew et al. 2010, Hagel et Brown 2006, Ijoui et al. 2010). Plus que cela, l'innovation incrémentale n'est plus suffisante aujourd'hui. Une nouvelle forme d'innovation dite disruptive s'installe comme une stratégie incontournable. Clayton Christensen, qui est le grand théoricien de cette forme d'innovation et dont l'appellation lui revient (Christensen 1997), définit l'innovation disruptive comme un processus selon lequel une petite entreprise à ressources limitées est capable de défier avec succès les business leaders déjà installés sur le marché, créant ainsi un nouveau marché et un réseau de valeur. Apple, Facebook, Uber... sont les meilleurs exemples de cette nouvelle forme d'innovation. Ce sont des compagnies qui ont compris les tendances des consommateurs avant même qu'elles ne deviennent tendances, et qui ont capitalisé dessus avant que d'autres concurrents ne le font. En effet aujourd'hui, l'innovation disruptive est la nouvelle norme, où les flux de technologies et de connaissances sont exploités dans la mise au point de nouveaux produits, services et business models. Ainsi, seules les organisations possédant cette capacité d'innovation disruptive sont aptes aujourd'hui à réussir dans ce nouvel environnement économique.

Les organisations sont donc tenues à investir et à nourrir cette capacité d'innovation. Ce qui passe nécessairement par l'embauche de personnes qualifiées qui peuvent innover, en particulier les ingénieurs. En effet, l'ingénierie est le métier qui promeut le plus l'innovation, puisque la mission de l'ingénieur consiste à trouver des solutions possibles aux enjeux du monde d'aujourd'hui à travers la conception, l'étude et la réalisation de produits ou services – et pour cela l'ingénieur doit innover en permanence. De ce fait, dans les pays développés

comme dans les pays émergents, les industries sont à la recherche d'ingénieurs qui ont les compétences et les connaissances indispensables pour tirer avantage de l'avancée technologique pour concevoir des solutions innovantes pour les attentes subtiles des clients d'aujourd'hui. Ces compétences ne sont pas uniquement d'ordre technique - relatives à la science et la technologie - mais plus globales et permettant aux ingénieurs de résoudre les problèmes d'une manière créative et efficace.

Ce nouveau profil de compétences et de connaissances que l'ingénieur doit posséder aura inéluctablement des conséquences sur la formation des ingénieurs. Evidemment, former ce nouveau profil d'ingénieurs exige une nouvelle adaptation – voire réinvention – des curriculums d'ingénierie déjà existant. Pour cela, il faut premièrement commencer par se poser la question suivante : « Est-ce que les curriculums d'ingénierie qui existent actuellement dans les universités à travers le monde forment ce type d'ingénieurs capables de résoudre les problèmes locaux et de faire face aux opportunités globales ? ». La réalité est que la formation d'ingénieurs peine toujours dans son processus de réforme à suivre les exigences du marché de travail actuel (Graham 2012), et trouve toujours des difficultés à graduer des ingénieurs dotés de compétences techniques et professionnelles qui leur permettront de concevoir des produits et solutions innovantes (Nasr 2014 ; Dyrenfurth 2014). Dans les pays émergents ou en voie de développement, la situation est plus critique. Aspirant à un développement rapide, pour accélérer le progrès économique et atténuer leur dépendance technologique, les pays émergents copient et implémentent des formations d'ingénieurs des pays développés, sans tenir compte des contraintes locales d'implémentations. Malheureusement, ces contraintes handicapent fortement le succès de ces formations.

Ce présent travail s'inscrit dans ce contexte. Elle vise à développer des solutions pour renforcer la capacité d'innovation des étudiants ingénieurs des pays émergents, en vue de former des ingénieurs de demain capables de hausser le niveau de vie des citoyens grâce à l'utilisation croissante de la technologie et de la connaissance dans le développement de nouveaux produits et solutions innovants.

I-2 Motivations de la thèse

De nombreux travaux ont été effectués à travers le monde dans le domaine de la réforme de la formation d'ingénierie en vue de graduer des ingénieurs ayant les compétences nécessaires pour concevoir et développer des solutions innovantes aux problèmes sociétaux. Cependant,

peu de travaux ont été consacrés au contexte des pays émergents ou en voie de développement, et encore moins au Maroc. Dans cette vision, notre thèse est pionnière dans le domaine puisqu'elle traite pour la première fois ce sujet, original et d'une importance économique capitale, dans un contexte marocain.

Le Maroc est un pays émergent, qui tente de trouver sa place dans l'économie de demain pour pouvoir prétendre au statut de pays développé. En effet, le Maroc a développé et implémenté différentes stratégies sectorielles pour construire une économie compétitive, globale et orientée vers le marché. Du plan Emergence établi en collaboration avec McKinsey & Co en 2005 au Plan d'accélération industrielle 2014-2020, le Maroc s'est mis dans la cour des grands en promouvant de grands chantiers industriels principalement en industries automobile et aéronautique avec l'implantation de plusieurs compagnies comme Renault à Tanger en 2012 et Bombardier à Casablanca en 2013. Aujourd'hui, et pour mieux s'adapter à la mondialisation et accroître sa compétitivité, un nouveau plan d'accélération industrielle voit le jour, misant sur l'intégration industrielle à travers les écosystèmes et aspirant ainsi à renforcer la dynamique enclenchée par les deux plans précédents.

Pour toutes ces stratégies, le moteur de réussite est sans aucun doute la capacité du pays à former des compétences en ingénierie qui l'aideront à évoluer dans la chaîne de valeur ajoutée et développer un tissu de nouvelles sociétés basées sur des produits et des business model innovants. Malheureusement, le Maroc dispose actuellement de formations d'ingénieurs, qui graduent des étudiants ingénieurs qui n'ont pas toutes les qualifications nécessaires pour répondre à la demande des nouvelles industries. En réalité, il y a un énorme décalage entre les formations marocaines d'ingénieurs et les exigences du marché du travail, et les universités marocaines sont critiquées de ne pas préparer les étudiants ingénieurs à leurs futures fonctions (Benítez Molina et al. 2014). Par conséquent, il existe un besoin urgent de concevoir, développer et implémenter des pratiques pour consolider et renforcer les capacités de design et de développement de produits innovant des futurs ingénieurs.

Cette thèse s'inscrit dans ce contexte, et porte un intérêt particulier au curriculum d'ingénierie mécanique. La mission de base de cette thèse est donc de bâtir et d'implémenter une approche rationnelle pour améliorer la capacité d'innovation des étudiants ingénieurs, en particulier dans les curriculums d'ingénierie mécanique au Maroc. Les objectifs explicites de la thèse seront détaillés dans la section suivante.

I-3 Objectifs de recherche

Il va sans dire que la capacité à innover passe par la capacité à concevoir de nouveaux produits et solutions pour répondre à un besoin. Il est donc clair que nos étudiants doivent acquérir une bonne expérience en design et développement de produits. Cependant, les curriculums d'ingénierie au Maroc ne sont pas préparés à former des ingénieurs qui possèdent des compétences solides en développement de produits innovants. Cette thèse vise donc à remédier à ce problème, et ceci à travers trois objectifs.

Le premier objectif est d'identifier les compétences que doivent développer les étudiants tout au long de leur cursus d'ingénierie pour être des ingénieurs compétents capables de concevoir des produits innovants. Une fois ces compétences identifiées, le deuxième objectif est de proposer des solutions adaptées aux curriculums marocains d'ingénierie et qui peuvent :

- contribuer à introduire les étudiants au design de produits innovants,
- répondre aux contraintes du contexte marocain,
- être implémentées facilement dans n'importe quel curriculum d'ingénierie des universités à ressources limitées.

Finalement le troisième objectif de cette thèse est d'implémenter ces solutions pour la formation d'ingénieurs en génie mécanique à la Faculté des Sciences et Techniques de Fès pour pouvoir vérifier leur faisabilité, évaluer leur efficacité et les itérer pour d'éventuelles améliorations.

I-4 Structure de la thèse

Cette thèse couvre huit chapitres. Le premier chapitre est une introduction générale qui souligne l'importance de l'innovation pour la croissance des entreprises, et la nécessité d'introduire les étudiants à l'innovation à travers le design de nouveaux produits en ingénierie. Nos motivations pour traiter la question dans un contexte marocain font également partie de ce chapitre.

Le deuxième chapitre intitulé « L'innovation dans les formations d'ingénierie » est une revue de littérature qui :

- a) Définit l'innovation et son importance en ingénierie.
- b) Présente un état de l'art de l'innovation dans les curriculums d'ingénierie.

- c) Explique la relation étroite entre l'innovation et le design, et présente les différentes initiatives pour incorporer le design dans les curriculums d'ingénierie à travers le monde.

Le chapitre 3 a pour objectif de présenter aux lecteurs un processus adapté de design et développement de produits, ainsi qu'une explicitation des outils et techniques qui y sont utilisés.

Le chapitre 4 explicite l'approche établie pour concevoir des solutions pour développer les compétences d'innovation à travers le processus de design et développement de produits.

Cette approche consiste à :

- a) Comprendre et déterminer les compétences relatives à l'innovation et au design, que doivent posséder nos étudiants ingénieurs.
- b) Etablir les limites qui contraignent notre curriculum d'ingénierie marocain.
- c) Se baser sur le cadre de compétences et le cadre de contraintes pour développer des solutions pour introduire les étudiants d'ingénierie mécanique à l'innovation à travers le processus de design.
- d) Bâtir un cadre de mesures pour évaluer l'efficacité des solutions conçues et implémentées dans la formation d'ingénierie mécanique.

Les chapitres 5,6 et 7 présentent les contributions majeures de cette thèse, à savoir les solutions conçues pour les différents niveaux du curriculum d'ingénierie mécanique afin d'introduire les étudiants à l'innovation et au design. Ces chapitres discutent aussi les résultats obtenus suite à l'implémentation de ces solutions.

Le chapitre 8 présente d'une part une conclusion générale soulignant les principaux résultats obtenus à travers cette thèse, et d'autre part les travaux projetés dans le futur, dans cet axe de recherche, à court et à long terme. Ces huit chapitres sont schématisés sur la figure 1 pour aider le lecteur à visualiser l'emplacement de chaque partie de la thèse.

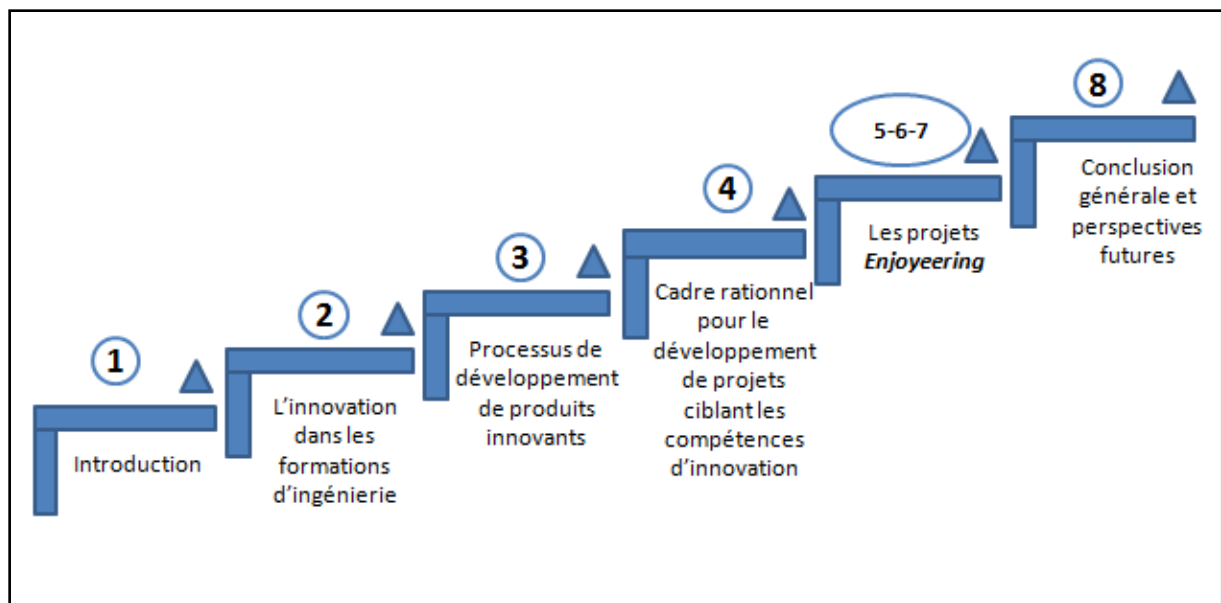


Figure 1 : Structure de la thèse

CHAPITRE II

L'innovation dans les formations d'ingénierie



II-1-Définition de l'innovation et son importance en ingénierie :

II-1-1 Définition de l'innovation :

L'innovation peut être décrite de différentes perspectives, selon de multiples facettes d'interprétation (Crossan et Apaydin 2010). Le terme « innovation » s'est vu attribuer plusieurs définitions qui ont donné naissance à des milliers d'articles, des revues de littérature et des méta-analyses spécifiques et focalisées sur le type d'innovation (produit, processus, ou business model).

Avant d'aller plus loin dans les définitions de l'innovation, il est primordial de souligner que la première confusion consiste à associer sa définition à celles de l'invention, la créativité et le design. Or ce n'est pas la même chose. La créativité est un mode de pensée qui consiste en la génération de nouvelles idées en réponse à des besoins spécifiques. L'invention est le résultat de la créativité et peut être définie comme un nouveau produit ou un nouveau processus. L'invention peut aboutir à une innovation si elle est utilisée et génère des bénéfices. La société Apple par exemple est très connue pour sa capacité à innover, quoiqu'elle n'a rien inventé ; ni le baladeur MP3 ni le smartphone et encore moins la tablette. Cependant, c'est une société qui a pu transformer des idées en des réalisations et des produits commercialisables. Ainsi comme l'affirme Lewis Duncan : « *L'innovation est la capacité à transformer les idées en factures* ». Finalement le design est défini comme le fil liant l'innovation à la créativité. Dans le « Cox Review of Creativity in Business 2005 », Sir George Cox définit le design comme: « *...le lien entre la créativité et l'innovation. Il forge les idées pour les rendre des propositions attractives et pratiques pour les clients et les utilisateurs. Le design peut être décrit comme la créativité déployée à une fin spécifique.* »

L'innovation dans son sens large vient du mot latin « *innovare* » qui signifie « faire quelque chose de nouveau » (Amidon 2003). Schumpeter en 1920 a donné la première définition de l'innovation (Hansen et Wakonen 1997) en la définissant comme suit : « L'innovation se reflète dans la production de l'originalité : un nouveau produit ou une nouvelle qualité d'un produit, une nouvelle méthode de production, un nouveau marché, une nouvelle source d'approvisionnement, ou une nouvelle structure organisationnelle. L'innovation peut être résumée dans le fait de *faire les choses différemment* ».

D'une façon globale, il y a deux manières de voir l'innovation. Zaltman et al. (1973) la considèrent comme un résultat final et la définissent comme une idée, une pratique ou un

objet matériel nouveau. Reposant sur les travaux de Zaltman et al. , Cooper (1983) la définit plutôt comme un processus qui débute par une idée. Carlson et Willmot (2006) ajoutent que l'innovation est le processus qui fait transformer cette idée en une valeur pour le client, et résulte en un profit durable pour l'entreprise. L'innovation est aussi le processus d'identifier de nouveaux besoins de clients (O'Regan et al. 2006). Wolpert (2002) décrit l'innovation comme la poursuite de nouvelles opportunités d'affaires tout en exploitant les technologies nouvelles ou disruptives et en introduisant des changements dans le concept de base d'une entreprise.

Pour donner à l'innovation une définition intégrale, on peut adopter la définition suivante sur laquelle plusieurs auteurs se sont mis d'accord : « *L'innovation est un processus dynamique qui consiste à identifier des besoins de clients et générer des idées afin d'apporter des changements radicaux ou incrémentaux et introduire de la valeur pour les clients et par conséquent pour l'organisation* » (Cooper 1998 ; Tidd, Bessant et Pavitt 2002 ; Berglund 2007 ; O'Sullivan et Dooley 2009). Ainsi, l'innovation est la transformation via le design des idées générées par la créativité, dans le but de créer de la valeur et répondre à des besoins de clients (Figure 2).

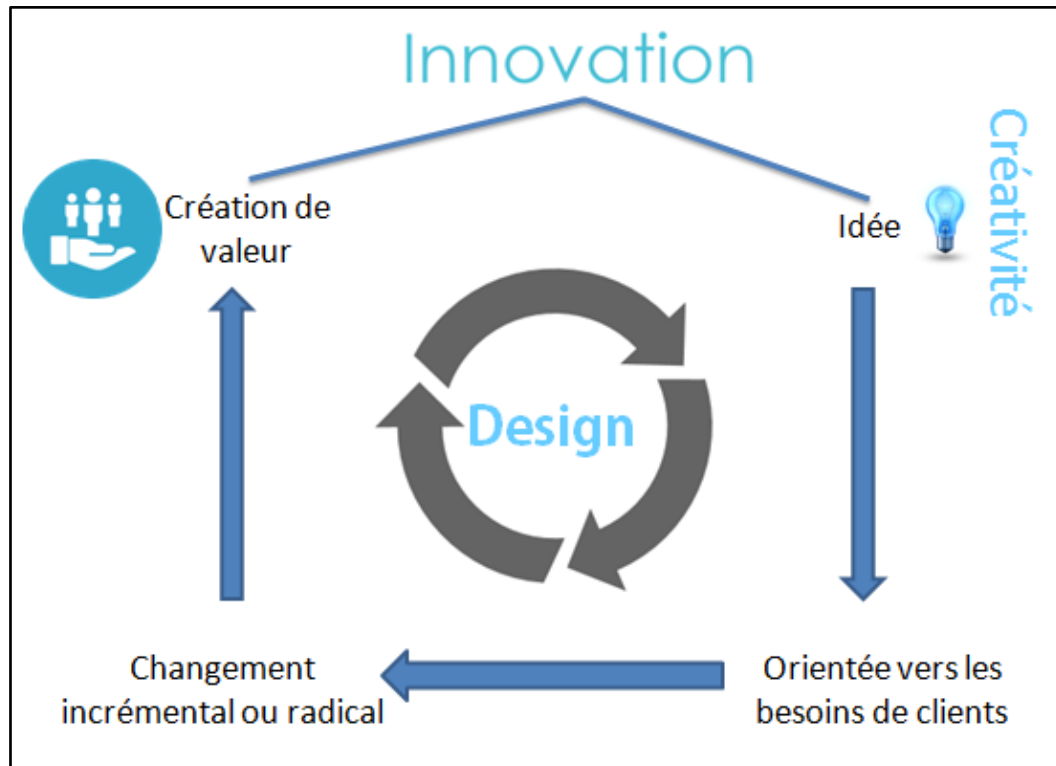


Figure 2 : Définition de l'innovation basée sur la créativité et le design [Source : Notre recherche]

II-1-2- Formes d'innovation :

Il existe différentes formes d'innovation selon le domaine d'application et selon la finalité désirée.

- L'innovation de produit correspond à la mise au point d'un produit, bien ou service nouveau, ou l'incorporation d'une nouveauté dans un produit déjà existant. Les produits que nous connaissons (industrie automobile, ordinateurs, ...) sont généralement des résultats de l'innovation de produit.

- L'innovation de procédé ou de processus, correspond à la mise au point de méthodes de production ou de distribution nouvelles, ou l'amélioration de méthodes déjà existantes. La production assistée par ordinateur (PAO) est un exemple d'innovation de processus.

- L'innovation organisationnelle consiste en un changement du mode de pensée au sein d'une organisation, et la mise au point d'une nouvelle organisation de travail. Le commerce en ligne, le self-service dans la restauration et les voitures hybrides sont les meilleurs exemples de l'innovation organisationnelle.

En ingénierie, l'intérêt est généralement porté sur l'innovation de produit et de processus. Les organisations cherchent constamment à développer leurs processus afin de réduire le coût et les délais de production et améliorer la qualité. Cependant, une grande attention est portée à l'innovation de produit pour différentes raisons. La première raison est que l'innovation de produit est plus visible pour le marché externe par rapport à l'innovation de processus. La deuxième raison est que l'innovation de produit est considérée comme le domaine des départements de design et de recherche et développement, alors que l'innovation de processus est plus l'affaire des services opérations et qualité.

II-1-3-Types d'innovation :

Schumpeter a identifié deux manières différentes pour répondre aux changements dans l'environnement du business: une réponse adaptative qui consiste en un ajustement des pratiques existantes – l'innovation incrémentale ; ou une réponse créative qui consiste en une proposition d'une nouveauté par rapport à la pratique existante – l'innovation radicale (Schumpeter 1912).

- ***L'innovation incrémentale*** est une série de petites améliorations ou mises à jour de produits, services, processus ou méthodes d'une compagnie. Les changements qui résultent de

l'innovation incrémentale portent généralement sur l'amélioration de la performance d'un produit, du prix, ou de l'expérience client. La montre connectée d'Apple par exemple résulte d'une innovation incrémentale qui a consisté en l'intégration des technologies et des systèmes qui existaient déjà. Les entreprises utilisent l'innovation incrémentale comme une tactique pour garder la position de leurs produits sur le marché.

- ***L'innovation radicale*** consiste quant à elle à explorer de nouvelles technologies dans un environnement d'extrême incertitude afin de créer de nouveaux produits, services ou processus qui ont des caractéristiques de performance sans précédent. Aujourd'hui, l'innovation radicale s'est vue désigner par d'autres termes. Elle est dite « disruptive », littéralement « innovation de rupture », ou encore « innovation 0-1 ». Clayton Christensen qui est le grand théoricien de cette forme d'innovation et dont l'appellation lui revient (Christensen 1997) a utilisé le terme « disruptive » pour décrire les innovations qui créent de nouveaux marchés en découvrant de nouvelles catégories de clients. Ces entreprises tirent leur profit des nouvelles technologies, mais aussi du développement de nouveaux business model et de l'exploitation des technologies anciennes de nouvelles manières. Les ordinateurs personnels, par exemple, ont été pendant des années des innovations de rupture, car ils ont créé un nouveau marché de masse pour les ordinateurs; précédemment, les ordinateurs centraux avaient été vendus uniquement aux grandes entreprises de recherche et aux universités.

II-1-4-L'innovation et l'ingénierie :

Durant les dernières décennies, l'innovation est considérée comme une source essentielle d'avantage concurrentiel dans un environnement de plus en plus changeant (Dess et Picken 2000 ; Tushman et O'Reilly 1997), et la capacité d'innover est même vue comme le facteur le plus important pour déterminer la performance d'une entreprise.

Si l'innovation permanente est primordiale pour maintenir une compétitivité mondiale, le fondement de base de cette innovation est l'ingénierie. Le lien étroit entre l'innovation et l'ingénierie tire ses racines de la nature des problèmes que les ingénieurs résolvent. En effet, la mission des sociétés d'ingénierie consiste à étudier des projets, concevoir et réaliser des produits ou des services, et ce à travers la résolution de problèmes et la mise en place de solutions pour l'aboutissement des projets. Et pour trouver des solutions, il faudrait non seulement générer de nouvelles idées, mais aussi les mettre en exécution, c'est-à-dire innover.

Et pour cela, les ingénieurs doivent avoir en plus de leur expertise technique et analytique, une flexibilité, une créativité, une capacité à reconnaître et saisir les opportunités et une capacité à innover (NAE 2004; Sheppard et al. 2008 ; NAS 2007). Les ingénieurs d'aujourd'hui ont besoin d'être techniquement compétents, mais doivent aussi être créatifs et capables de travailler en collaboration au sein d'équipes, communiquer efficacement, et créer des produits utiles. Les entités industrielles et les écoles d'ingénieurs doivent collaborer entre eux afin d'assurer un nombre suffisant d'ingénieurs qualifiés et capables de répondre aux besoins de la société (NAE : The Bridge 2013).

Devant ce besoin, plusieurs programmes accrédités en ingénierie à travers le monde se sont trouvés devant l'obligation de réformer les approches pédagogiques du curriculum d'ingénierie (Crawley et al. 2013; Peercy & Cramer, 2011), et le milieu universitaire s'est trouvé face au défi de fournir au monde industriel des ingénieurs qui ont cette capacité à innover (Borrego & Bernhard 2011; Crawley et al. 2013).

II-2 L'innovation et la formation d'ingénieurs:

II-2-1 – La formation d'ingénieurs :

La fin du 20^{ème} siècle a connu des discussions et des débats intenses autour de l'enseignement de l'ingénierie. Seeley (2005) souligne que « La formation d'ingénieurs a été le sujet de plusieurs études formelles et informelles, beaucoup plus que n'importe quel domaine en éducation professionnelle », et qu'elle a fait l'objet de « réformes continues ».

La pratique de l'ingénierie a connu des changements signifiants dus à plusieurs facteurs tels que les nouvelles exigences autour de la protection de l'environnement, le développement durable, la globalisation des systèmes de production et de logistique, et l'évolution exponentielle des systèmes de la technologie d'informations (Prados 1998; Schachterle and Vinther 1996), créant ainsi une énorme concurrence sur le marché de l'emploi en ingénierie.

Face à ces changements, d'importants efforts portant sur le changement des programmes et des pédagogies ont été effectués au niveau de la formation d'ingénieurs, afin de graduer des ingénieurs compétents qui peuvent faire face aux nouveaux challenges du 21^{ème} siècle (Goldberg 1994; Prados 1998; Ruprecht 2000; Sheppard 2009; Wulf 1998).

Conscients de ces nouveaux challenges, plusieurs acteurs industriels ont compris très tôt que les ingénieurs ont besoin de compétences techniques et personnelles particulières pour mieux

opérer dans le monde industriel, et différentes études ont été menées afin de déterminer quelles sont ces compétences (The Boeing 1997; Nicolai 1998). Malheureusement aujourd'hui encore, et même si l'intérêt est toujours porté sur la nécessité de doter les ingénieurs du 21^{ème} siècle de nouvelles compétences et habiletés (Grose 2006), les compagnies industrielles avancent toujours que les ingénieurs ressortant de l'université ne sont toujours pas préparés à travailler en milieu industriel suite à un manque de compétences techniques et professionnelles (Becker 2012).

Dans leur quête de changement, les formations d'ingénieurs se sont basées sur les organisations d'accréditation des programmes d'ingénierie telles que ABET aux Etats Unis, UK SPEC en Angleterre, IEAUST en Australie, EURACE en Europe, CEAB au Canada, et autres..., et les efforts ont été unifiés afin de réviser les critères d'accréditation, et améliorer la qualité d'apprentissage de l'étudiant ingénieur (Mills et Treagust 2003). Ces efforts ont abouti en des changements significatifs au niveau des curriculums d'ingénierie (Heitmann 2005; Ruprecht 2000; Seely 2005).

Dans ce qui suit, nous allons nous intéresser à quelques agences d'accréditation les plus connues à travers le monde ainsi que leurs critères, afin d'avoir une idée sur ce que les étudiants en ingénierie sont supposés acquérir comme compétences tout au long de leur cursus. Les agences d'accréditation que nous allons étudier sont les suivantes :

- ABET : *Accreditation Board for Engineering and Technology*, organisation qui a pour mission de contrôler, évaluer et certifier la qualité de l'ingénierie, la technologie et l'éducation des sciences appliquées aux Etats Unis, et qui a pu jusqu'à jour certifier plus de 2800 programmes d'ingénierie à travers le monde.
- CEAB : *Canadian Engineering Accreditation Board*
- ENAAEE: *European Network for Accreditation of Engineering Education*
- Engineers Australia.

➤ **ABET:**

Les critères d'ABET sont très cités et discutés dans les articles de la formation d'ingénieurs (Blumenthal 2008, Heitmann 2004, Moore et al. 2012). Ils soulignent les habiletés que les étudiants sont censés acquérir tout au long de leur cursus, et sont du nombre de onze, de « a » à « k ». Ces habiletés sont :

- (a) L'habileté à appliquer les connaissances en mathématiques, science et ingénierie.
- (b) L'habileté à concevoir, conduire des expériences, analyser et interpréter les données.

- (c) L'habileté à faire le design d'un système, composant ou processus pour répondre aux besoins de la société, en respectant les contraintes économiques, environnementales, sociales, politiques, éthiques, ainsi que celles de sécurité et de production.
- (d) L'habileté à travailler dans des équipes multidisciplinaires.
- (e) L'habileté à identifier, formuler, et résoudre les problèmes d'ingénierie.
- (f) Une bonne compréhension de la responsabilité professionnelle et éthique.
- (g) L'habileté à communiquer efficacement.
- (h) Une bonne compréhension de l'impact des solutions d'ingénierie dans un contexte économique, environnemental et social.
- (i) Une reconnaissance du besoin à engager dans un apprentissage continu.
- (j) Une connaissance des problèmes et challenges actuels.
- (k) Une habileté à utiliser les techniques, les compétences et les outils nécessaires pour la pratique de l'ingénierie.

➤ **CEAB :**

Tout comme ABET, l'accréditation canadienne des programmes d'ingénierie a mis au point onze attributs que les étudiants doivent acquérir tout au long de leur cursus d'ingénierie.

1- Les connaissances en génie : Les étudiants doivent acquérir des connaissances - à un niveau universitaire - en mathématiques, en sciences naturelles ainsi que des notions fondamentales de l'ingénierie, et une spécialisation en génie propre au programme.

2 – L'analyse des problèmes: Les étudiants doivent acquérir une capacité à utiliser les connaissances et les principes appropriés pour identifier, formuler, analyser et résoudre des problèmes d'ingénierie complexes et en arriver à des conclusions étayées.

3- L'investigation : Les étudiants doivent être capables d'étudier des problèmes complexes au moyen de méthodes mettant en jeu la réalisation d'expériences, l'analyse et l'interprétation des données et la synthèse de l'information afin de formuler des conclusions valides.

4- La conception : Les étudiants doivent être capables de concevoir des solutions à des problèmes d'ingénierie complexes et évolutifs et de concevoir des systèmes, des composants ou des processus qui répondent aux besoins spécifiés, tout en tenant compte des risques pour la santé et la sécurité publiques, des aspects législatifs et réglementaires, ainsi que des incidences économiques, environnementales, culturelles et sociales.

5- L'utilisation d'outils d'ingénierie : Les étudiants doivent avoir la capacité de créer et de sélectionner des techniques, des ressources et des outils d'ingénierie modernes et de les

appliquer, de les adapter et de les étendre à un éventail d'activités simples ou complexes, tout en comprenant les contraintes connexes.

6- Le travail individuel et en équipe : Les étudiants doivent être capables de fonctionner efficacement en tant que membres ou chefs d'équipes, de préférence dans un contexte de travail multidisciplinaire.

7- La communication : Les étudiants doivent avoir l'habileté à communiquer efficacement des concepts d'ingénierie complexes, au sein de la profession et au public en général, notamment lire, rédiger, parler et écouter, comprendre et rédiger de façon efficace des rapports et de la documentation pour la conception, ainsi qu'énoncer des directives claires et y donner suite.

8- Le professionnalisme : Les étudiants doivent maîtriser les rôles et les responsabilités de l'ingénieur dans la société, y compris le rôle essentiel de protection du public et l'intérêt public.

9- L'impact du génie sur la société et l'environnement : Les étudiants doivent avoir la capacité à analyser les aspects sociaux et environnementaux des activités liées au génie, notamment comprendre les interactions du génie avec les aspects économiques et sociaux, la santé, la sécurité, les lois et la culture de la société; les incertitudes liées à la prévision de telles interactions; et les concepts de développement durable et de bonne gestion de l'environnement.

10- La déontologie et l'équité : Les étudiants doivent savoir appliquer les principes d'éthique, de responsabilité professionnelle et d'équité.

11- L'économie et la gestion de projets : Les étudiants doivent savoir comment intégrer de façon appropriée les pratiques d'économie et d'affaires, comme la gestion de projets, des risques et du changement, dans l'exercice du génie, et de bien tenir compte des contraintes associées à ces pratiques.

12- L'apprentissage continu : Les étudiants doivent avoir la capacité à cerner et à combler ses propres besoins de formation dans un monde en constante évolution, et ce, de façon à maintenir sa compétence et à contribuer à l'avancement des connaissances

➤ **ENAAE :**

De sa part, l'accréditation européenne des programmes d'ingénierie a mis en place huit attributs que les étudiants doivent acquérir tout au long de leur cursus d'ingénierie.

1) Connaissance et compréhension: Cela inclut la connaissance et la compréhension des mathématiques, des sciences basiques et des disciplines de l'ingénierie fondamentales à leur spécialisation en génie. Cet attribut sous entend aussi une sensibilisation de l'étudiant à un contexte multidisciplinaire de l'ingénierie.

2) L'analyse en ingénierie : Les étudiants doivent avoir la possibilité d'analyser les produits d'ingénierie complexes, des processus et des systèmes dans leur domaine d'études; sélectionner et appliquer des méthodes pertinentes afin d'interpréter correctement les résultats de ces analyses. Les étudiants doivent aussi avoir la capacité d'identifier, formuler et résoudre des problèmes d'ingénierie dans leur domaine d'études, tout en comprenant l'importance des contraintes non techniques telles que les contraintes économiques, industrielles, de sécurité ou d'environnement.

3) Le design en ingénierie : Les étudiants doivent avoir la possibilité dans leur cursus d'ingénierie de développer et concevoir des produits complexes (dispositifs, objets, etc.), des processus et des systèmes dans leur domaine d'études pour répondre aux exigences établies, tout en ayant une prise de conscience des contraintes non techniques telles que les contraintes économiques, industrielles, de sécurité ou d'environnement.

4) Les investigations : Les étudiants doivent avoir la possibilité d'effectuer des recherches dans la littérature, de consulter et d'utiliser de façon critique les bases de données scientifiques et d'autres sources d'information appropriées, afin d'analyser des problèmes techniques dans leur domaine d'études. Les étudiants doivent aussi avoir la capacité de concevoir et mener des enquêtes expérimentales dans leur domaine d'études, interpréter les données et en tirer des conclusions.

5) La pratique de l'ingénierie : Les étudiants doivent avoir :

- une bonne compréhension des techniques et méthodes d'analyse, de conception et d'enquête dans leur domaine d'études.
- des compétences pratiques pour résoudre des problèmes complexes, réaliser des études techniques complexes et mener des enquêtes dans leur domaine d'études.
- une bonne compréhension des matériaux et leur application, et une bonne connaissance des équipements, outils, technologies et processus, ainsi que leurs limites dans leur domaine d'études.
- une capacité à appliquer les normes de pratique de l'ingénierie dans leur domaine d'études.
- une sensibilisation autour des implications économiques, industrielles, environnementales et sécuritaires dans la pratique de l'ingénierie.

- une sensibilisation autour des implications des questions économiques, organisationnelles et de gestion (telles que la gestion de projet, la gestion des risques et la gestion du changement) dans le contexte industriel et commercial.

6) La prise de décision : Les étudiants doivent avoir la possibilité de recueillir des données relatives à un problème d'ingénierie, les interpréter, en faire des réflexions, avant de prendre des décisions relatives à leur résolution.

7) La communication et le travail collaboratif : Les étudiants doivent avoir une habileté à communiquer efficacement pour partager les idées, problèmes et les solutions dans une communauté d'ingénierie ou dans la société en général. Ils doivent aussi être capables de fonctionner efficacement dans un contexte national et international ; comme individus ou comme membres d'une équipe, et coopérer efficacement avec les ingénieurs et les non-ingénieurs.

8) L'apprentissage continu: Les étudiants doivent reconnaître la nécessité de s'engager dans un apprentissage continu afin de suivre les développements en science et technologie.

➤ **Engineers Australia :**

L'organisation « Engineers Australia » a mis au point des compétences qui représentent l'expression de la profession d'ingénierie, incluant les connaissances et compétences de base, les compétences professionnelles, ainsi que les valeurs et attitudes qui doivent être démontrées au moment d'entrée à la pratique de la profession. « Engineers Australia » a classifié ces compétences en 3 grandes catégories :

1) Les connaissances et compétences de base : Cette première catégorie comprend :

- Une compréhension des sciences physiques et des fondements de base de l'ingénierie.
- Une compréhension conceptuelle des mathématiques, analyse numérique, statistiques et informatique sur lesquelles s'appuie l'ingénierie.
- Une connaissance de la pratique du design en ingénierie, ainsi que les facteurs qui l'impactent.
- Une compréhension de la portée, principes, normes, responsabilités et limites de la pratique de l'ingénierie.

2) L'application de l'ingénierie : Cette 2^{ème} catégorie comprend :

- L'application des méthodes et techniques d'ingénierie pour la résolution des problèmes complexes d'ingénierie.
- L'application des processus du design en ingénierie.

- L'application des différentes approches pour la conduite et le management des projets d'ingénierie.

3) Les attributs personnels et professionnels : Cette dernière catégorie comprend :

- La bonne conduite éthique et la responsabilité professionnelle.
- La bonne communication orale et écrite dans le domaine professionnel de l'ingénierie.
- L'attitude créative, innovante et proactive.
- L'utilisation et la gestion professionnelle de l'information.
- L'esprit effectif du travail d'équipe et de leadership.

Dans la table ci-dessous, nous présentons une synthèse des principales recommandations des différentes organisations d'accréditation pour les étudiants ingénieurs, incluant les connaissances, compétences et attitudes (Table 1).

Table 1 : Principales compétences requises pour les ingénieurs par les organismes d'accréditation

ABET	ENAAE	CEAB	Engineers of Australia
- L'application des connaissances en mathématiques, science et ingénierie. - La conception et la conduite des expériences. - Le design de systèmes - Le travail collaboratif - La résolution des problèmes d'ingénierie. - La compréhension de la responsabilité professionnelle et éthique. - La communication efficace	- La connaissance et compréhension - L'analyse en ingénierie - Le design en ingénierie - Les investigations - La pratique de l'ingénierie - La prise de décision - La communication et le travail collaboratif - L'apprentissage continu	- Les connaissances en génie - L'analyse des problèmes - L'investigation - La conception - L'utilisation des outils d'ingénierie - Le travail individuel et en équipe - La communication - Le professionnalisme - La déontologie et l'équité - L'économie et la gestion de projets	- Les connaissances et compétences de base (mathématiques, sciences physiques, ingénierie, design) - L'application de l'ingénierie (résolution de problèmes, application du processus d'ingénierie) - Les attributs personnels et professionnels (communication, travail d'équipe, attitude créative et critique, leadership)

- L'apprentissage continu - La connaissance des problèmes et challenges actuels. -L'utilisation des outils nécessaires pour la pratique de l'ingénierie.		- L'apprentissage continu	
--	--	---	--

II-2-2-L'innovation dans la formation d'ingénieurs :

L'innovation a été classifiée dans la littérature comme un thème contemporain qui vient juste d'émerger dans la formation d'ingénieurs (Crawley et al. 2007). Dans la section précédente, nous avons compris que les jeunes ingénieurs doivent posséder la capacité d'innovation, ainsi que toutes les compétences qui lui sont relatives, à savoir les compétences personnelles, interpersonnelles et professionnelles qui vont permettre à ces ingénieurs de fonctionner au sein des équipes d'ingénierie, afin de concevoir des produits innovants et répondre aux besoins sociétaux.

En effet, les enjeux complexes de la société exigent des personnes qui ont un large éventail de capacités, qui ont une expertise profonde de la technologie et qui sont capables de travailler ensemble au sein d'équipes multidisciplinaires. Il est donc nécessaire de ne pas voir l'innovation comme une activité extracurriculaire ou une option, mais plutôt comme une nécessité incontournable. Les étudiants ingénieurs ont besoin qu'on leur enseigne les principes de l'innovation et spécifiquement l'innovation radicale. Toutefois, l'innovation ne peut pas être acquise d'un livre ; l'innovation a besoin d'être pratiquée et expérimentée. L'éducation de l'innovation en ingénierie doit être basée sur des techniques d'apprentissage expérientielles où les étudiants ingénieurs auront la possibilité d'acquérir une expérience pratique en travaillant sur des projets réels inspirés des besoins industriels ou sociétaux. Des workshops pratiques d'innovation par exemple doivent faire partie intégrale du curriculum d'ingénierie.

Dans cette logique, et afin de donner aux étudiants ingénieurs la possibilité d'innover et d'acquérir les différentes compétences qui sont relatives à l'innovation, différentes approches pédagogiques ont été initiées et implémentées au sein de différentes universités à travers le

monde (Skates 2003, Woods et al. 2000, Ringwood et al. 2005, Badran2007), et qui ont même culminé en des pratiques innovantes et des cadres éducatifs innovants. L'initiative CDIO (Conceive-Design-Implement-Operate) (Crawley et al. 2007 - 2011) ou les pratiques s'inspirant du Design Thinking (Kelley 2001; Dym et al. 2005; Dunne & Martin 2006) en sont les meilleurs exemples.

II-3 L'innovation et le design d'ingénierie:

II-3-1-Définition du design d'ingénierie:

Si nous prenons le temps d'observer l'environnement qui nous entoure, nous verrons sans aucun doute plusieurs exemples de la créativité technologique. Téléphones, automobiles, dispositifs électroniques,... tous sont des exemples concrets de l'application créative de la technologie. D'une idée abstraite à une représentation physique d'un produit ou d'un système, ces inventions passent par un processus créatif d'ingénierie. Et quand ce processus créatif débouche sur des produits qui répondent à des besoins humains, le processus est appelé « design » (Khandani 2005).

La mission majeure des ingénieurs est d'appliquer leurs connaissances scientifiques pour résoudre des problèmes techniques, et optimiser les solutions en tenant compte des exigences et contraintes matérielles, technologiques, économiques, légales, environnementales et humaines. Les problèmes se concrétisent lorsque l'ingénieur - seul ou au sein d'une équipe multidisciplinaire - les clarifient, et leur donne la forme et la définition de produits techniques ou services qui doivent être créés. Cette création abstraite ou concrète n'est autre que la tâche du design de produit qui est effectuée par les ingénieurs designers (Pahl et Beitz 2007).

Le « Design » littéralement « conception » est un terme en vogue utilisé avec une grande variété de préfixes. En effet, on parle de design de mode, de design d'intérieur, de design de mobilier, ou de design de produits. En ingénierie, on parle de design d'ingénierie (en anglais : engineering design) ou de conception technologique, qui est un processus par lequel une idée ou un besoin du marché est concrétisé par la réalisation d'un produit ou système technique.

Les ingénieurs sont connus pour leur capacité à faire du design. En effet, pour Sheppard (2003), les ingénieurs « *définissent, génèrent, évaluent et réalisent des idées* ». Cette caractérisation se concentre sur la façon dont les ingénieurs pensent, et met en valeur le cœur

du processus du design en mettant en évidence la création (i.e définition et génération), l'évaluation et la sélection (i.e évaluation), et la réalisation des idées.

Le design d'ingénierie se réfère au processus d'élaborer quelque chose. C'est un processus créatif, itératif et ouvert qui caractérise la résolution de problèmes et qui consiste à concevoir et développer des composants, systèmes et processus (Friesen et al.2005).

Une revue de littérature indique clairement qu'il n'existe pas une définition unique du design qui est acceptée universellement. Différentes définitions ont été données au terme « design » (Dym 1994). En 2005, Dym et al. formulent la définition suivante : « *Le design d'ingénierie est un processus systématique et intelligent à travers lequel les concepteurs génèrent, évaluent et spécifient les concepts pour les dispositifs, les systèmes ou les processus dont la forme et la fonction est de réaliser les objectifs des clients ou les besoins des utilisateurs, tout en satisfaisant un ensemble spécifié de contraintes* ».

Dym et al. (1994) ajoutent que cette définition implique que :

- Le processus du design en ingénierie est un processus cognitif qui peut être modélisé et compris.
- Il y a plusieurs représentations du processus de design en ingénierie selon la forme et la fonction du processus.
- Les objectifs du problème de conception ainsi que les contraintes peuvent être déterminées à partir de cette représentation.
- Les alternatives du design peuvent être générées en utilisant les techniques de résolution de problème.
- Les spécifications de fabrication du produit peuvent être déterminées à partir des conceptions.
- Les conceptions peuvent être évaluées et mesurées à différentes étapes du processus du design.

D'un autre côté ABET définit la conception technologique comme un processus de prise de décision (souvent itératif) dans lequel les sciences fondamentales, les mathématiques et les sciences de l'ingénieur sont appliquées afin de convertir d'une façon optimale les ressources pour répondre à un objectif bien défini.

Quelque soit la définition, il est clair maintenant que le design est une activité principale de l'ingénierie où l'ingénieur designer est un professionnel de la conception et du développement de produits et solutions. Et par conséquent, les sociétés d'ingénierie se préoccupent de plus

en plus quant à la quantité et la qualité des ingénieurs designers gradués par les formations d'ingénieurs. Pour toutes les universités, le design d'ingénierie est en fait un objectif d'apprentissage fondamental pour les étudiants en ingénierie (Bailey et al. 2004). Ainsi, l'organisation canadienne d'accréditation des programmes d'ingénierie (CEAB) affirme qu'un programme d'ingénierie doit normalement culminer en une expérience signifiante en matière de design. En réponse à ce besoin, plusieurs cours de design ont été intégrés dans les différents niveaux des curriculums d'ingénierie.

Nous notons que dans cette thèse, les termes « design », « design d'ingénierie » ou « conception technologique » signifient littéralement la même chose.

II-3-2-Le processus de design et développement de produits :

Résoudre un problème de design n'est pas chose évidente, et trouver la bonne solution exige une méthodologie ou un processus. Il existe plusieurs versions du processus de design d'ingénierie pour le développement de produits, mais ils ont tous en commun cet aspect de recherche, de synthèse, de création et de réflexion (Zimmerman et al. 2004). Dans ce qui suit, nous allons présenter les étapes clés du processus de design et développement de produits, communes à la majorité des versions.

Les 3 phases essentielles dans le processus de design (Dym et al.1994) comprennent une phase :

- Analytique : qui comprend l'identification du besoin, l'identification du problème et la collecte d'informations.
- Créative : qui comprend la génération de concepts et la prise de décisions.
- Exécutive : qui comprend les détails d'ingénierie ainsi que l'implémentation.

Dans leur livre « *Engineering design : A systematic approach* », Pahl et Beitz (2007) proposent une décomposition du processus de design de produits en 4 phases (Figure 3). La première phase du processus consiste à planifier et clarifier la situation du marché de l'entreprise en trouvant des idées de produits et en élaborant une liste de besoins et en mettant le tout dans un cahier de charges. Dans la deuxième phase, l'essence des problèmes à traiter est identifiée et il ne reste plus qu'à générer des concepts de solutions, et les analyser en fonction de critères techniques et économiques. Un seul concept sera ensuite choisi durant la troisième phase, et sera traduit en une maquette ou un prototype concret qui sera affiné

progressivement. Enfin, la quatrième phase comprend l'élaboration et le détail des spécifications des composants.

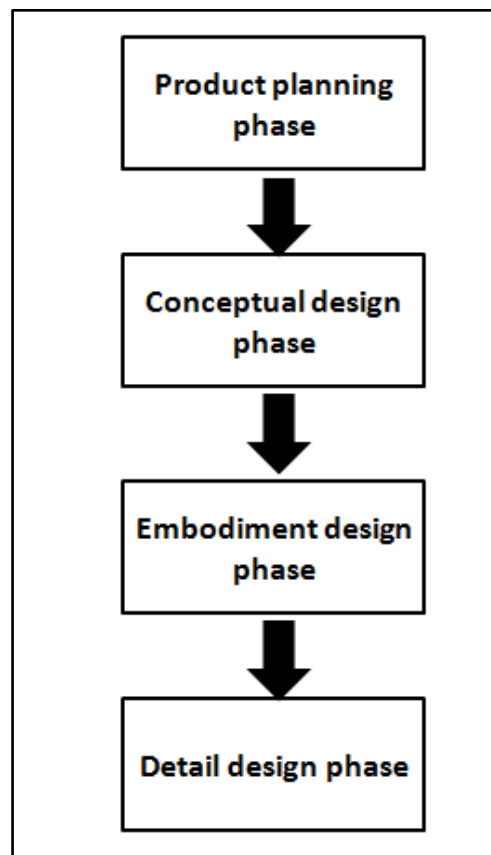


Figure 3 : Organigramme représentant le processus basique de design de produit par Pahl and Beitz

D'autres variantes du processus de design comprennent 5 phases (Khandani 2005) ou encore 6 phases (Ulrich et Eppinger 2008) (Figure 4).

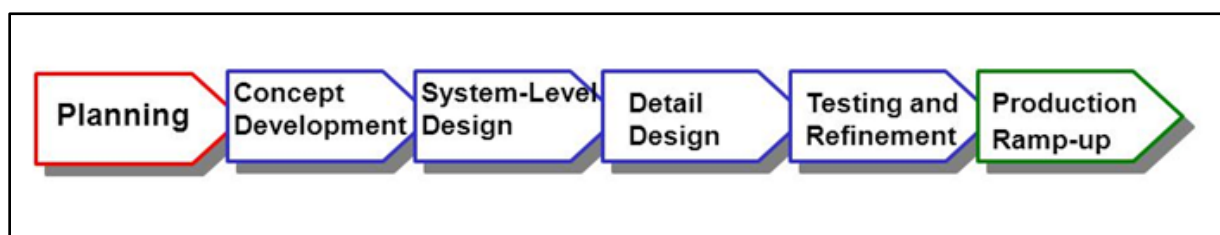


Figure 4 : Organigramme représentant le processus basique de design de produit par Ulrich et Eppinger

En général, le processus de design de produits débute avec une définition du problème. Une bonne définition d'un problème en design implique une bonne énumération des exigences relatives à la fois aux clients et au produit à concevoir. Dans l'étape suivante, les informations relatives au design de produit comme les spécifications fonctionnelles et techniques sont

collectées. Une étude concernant les produits concurrents sur le marché doit être effectuée à cette étape. Une fois que les détails du design sont identifiés, vient l'étape de la génération de concepts de solutions qui répondent aux exigences du design. Les concepts les plus prometteurs sont sélectionnés sur la base de critères de sélection tels que le coût, la sécurité, etc. L'étape d'analyse permet de détailler le design en faisant une étude complète de solutions. Elle résulte en une identification du design final qui correspond le mieux aux exigences du produit. Après cette étape s'ensuit la construction d'un prototype du design qui va être testé et vérifié afin de savoir si d'éventuelles modifications sont nécessaires. Il est finalement fondamental de souligner que le processus de design est itératif, et ce à chaque étape. En effet, il est possible de revenir à une étape précédente si des ajustements sont jugés nécessaires.

II-3-3-Rôle du design et développement de produits dans les curriculums d'ingénierie:

Le débat a toujours porté sur la manière dont l'ingénierie se doit d'être enseignée afin de préparer les futurs ingénieurs à la pratique professionnelle de l'ingénierie (The Design Council 1991). Cela est dû à l'ambiguïté qui a toujours existé autour de l'essence même de l'ingénierie, et qui a laissé une confusion autour de la relation entre l'ingénierie, la science et le design (Seeley 2005).

Malgré cette ambiguïté, il a toujours été clair que l'apprentissage pratique à travers le design est le moyen le plus efficace dans la formation des ingénieurs. Toutefois, l'élément pratique n'a pas toujours été le point fort dans les curriculums d'ingénierie. En effet, le monde a connu vers les années 50 (fins de la seconde guerre mondiale) un développement technologique important dans différents domaines tels que les communications, le numérique, l'énergie atomique, etc. qui a exigé un curriculum en ingénierie fondé sur une formation purement académique (Prados 1998). Par conséquent, les curriculums d'ingénierie ont pivoté d'un système d'enseignement basé sur la pratique de l'ingénierie vers un système qui est focalisé sur l'enseignement excessif de matières scientifiques telles que les mathématiques, la physique, etc. au grand détriment de l'utilisation du design dans les curriculums d'ingénierie (Seeley 2005, Sheppard 1997).

Ainsi, les années des prémices de la révolution technologique ont connu des curriculums d'ingénierie où les étudiants appliquent « *théoriquement* » les principes scientifiques aux problèmes technologiques, principalement lors des deux premières années du curriculum

d'ingénierie qui dure 5 années (Dym et al.2005). Tout au long de cette période, un manque de compréhension du design causé par le modèle scientifique de l'ingénierie a été remarqué par les enseignants dans divers curriculums à travers le monde. Les études menées par ces enseignants ont reconnu le rôle central et intégral du design et ont souligné que l'ingénierie doit être enseignée dans le contexte du design.

Le Design Council en UK, a publié une série de documents (Finniston Report 1980) où il est mentionné :

« L'ingénierie doit être enseignée dans le contexte du design, de sorte que le design soit un fil continu tout au long du cursus. Les cours devront exposer l'étudiant à une fusion d'analyse, de synthèse, de design conceptuel et de problèmes plus larges ».

D'autre part, l'académie royale d'ingénierie en UK a aussi énuméré en 1991 les problèmes relatifs à l'enseignement du design en ingénierie, citant le nombre insuffisant d'enseignants qualifiés en design, la lourde charge d'enseignement, ainsi que l'étendue variable de l'inclusion du design (Black 1994).

Suite à ces déclarations, diverses universités - notamment celles en USA et UK - ont connu un mouvement attestant la nécessité d'incorporer le design dans les curriculums d'ingénierie, et particulièrement en premières années du curriculum d'ingénierie (Sheppard 1997, Dym 2005). De leur côté, plusieurs organisations d'accréditation ont commencé à prendre en considération l'importance du design dans les curriculums d'ingénierie, et des initiatives ont commencé à voir le jour. Dutson et al. (1997) et Dym et al. (2005) soulignent que le « *capstone project* » par exemple qui est très connu dans les universités américaines n'est au fait qu'une tentative pour répondre à la nécessité et l'urgence d'incorporer le design dans les curriculums d'ingénierie.

II-3-4-Les projets de design et développement de produits dans le curriculum d'ingénierie :

Le design est le cœur de l'ingénierie (Dym et al. 2005). Plus que cela, le design est une composante majeure pour les étudiants dans les curriculums d'ingénierie, comme cela a été signalé dans les sections précédentes. Cependant, la question qui se pose est comment apprendre le design, enseigner le design et acquérir les compétences qui lui sont relatives (Grose 2006).

Dym et al. (2005) soulignent que le design est difficile à apprendre et à enseigner à cause de la complexité de son processus, et de sa pensée. Littéralement, ce processus requiert des compétences spécifiques, à la fois techniques et non-techniques, plus connues sous les noms respectifs de compétences solides et compétences douces. Pour un certain nombre d'auteurs (Dym et al. 2005 ; De Graaf et Ravesteijn 2001), un bon designer en ingénierie est un ingénieur qui peut :

- Définir un problème, et collecter les informations nécessaires.
- Considérer l'esprit de la conception comme un processus de divergence-convergence.
- Fonctionner en équipes multidisciplinaires (Hirsh et McKenna 2008).
- Bien communiquer les résultats.
- Prendre des décisions sous contraintes.
- Tolérer l'ambiguïté (Hatchuel et al. 2011).

D'autre part, la nature des problèmes de design est telle que le problème n'a pas de solution unique, mais accepte généralement plusieurs solutions. Et donc cette absence d'unicité rend le design difficile à enseigner puisque les étudiants ont l'habitude de résoudre les problèmes en cherchant une solution unique et individualiste basée sur une utilisation rationnelle des connaissances, alors qu'ils devraient plutôt tenter d'explorer d'autres solutions d'une manière plus subjective.

Dans cette logique, on peut dire que le processus d'apprentissage dans le cas des problèmes de design est un processus non linéaire, qui a un caractère itératif inhérent et imprévu. Selon (Roberts 2004), un projet de design n'est pas un processus de résolution de problèmes puisque le problème identifié peut ne pas être résolu définitivement, ou rester ouvert et incertain. Dans ce cas, un projet de design a pour but de faire des propositions de solutions, les tester, les itérer et les raffiner.

Dans la plupart des universités à travers le monde, les étudiants ne sont exposés au design qu'en fin de leur cursus d'ingénierie lors d'un projet connu sous le nom du « *capstone project* ». Plusieurs efforts ont été faits pour tenter d'incorporer le design en chaque année du curriculum d'ingénierie. Ces efforts ont culminé en deux initiatives notoires à savoir l'initiative CDIO (Conceive-Design-Implement-Operate) implémentée dans diverses universités à travers le monde et l'initiative IDEA (Institute for Design Engineering and Applications) implémentée à l'université Northwestern aux Etats-Unis. Ces deux initiatives ont prouvé leur efficacité dans plusieurs curriculums ; cependant elles nécessitent une restructuration draconienne du curriculum, chose qui n'est pas possible pour toutes les

institutions. Par conséquent, plusieurs autres méthodes pratiques pour intégrer le design ont trouvé place dans divers curriculums. Il existe plusieurs méthodes pratiques dans les curriculums d'ingénierie et chaque université a sa propre façon d'enseigner le design aux étudiants à travers les projets. Ces méthodes incluent le PBL (*Project-based learning*), littéralement « L'apprentissage basé sur les projets », l'IBL (*Inquiry-based learning*), littéralement « L'apprentissage basé sur l'exploration », les compétitions de design, les études de cas, la rétro-ingénierie (ou *Reverse engineering*), ou enfin le DBL (*Design-based learning*), littéralement « L'apprentissage basé sur le design ». Ces méthodes seront toutes explicitées en détail dans la section suivante.

Les projets de design peuvent être uni-disciplinaires ou multidisciplinaires, peuvent être travaillés individuellement ou en groupe, sont généralement étalés sur un semestre ou deux, et peuvent être réalisés en classe ou en dehors de la classe. Dans les curriculums d'ingénierie, les deux premières années sont dédiées aux projets de design simulés où les étudiants utilisent les connaissances de base des matières enseignées ainsi que les bases du processus de design, tandis que les deux dernières années sont dédiées au design de projets réels où les étudiants utilisent leurs compétences analytiques avancées et leur expertise en processus de design et développement de produits. Pour la problématique du projet de design, elle peut être soit exprimée par une entreprise industrielle qui collabore avec l'université, soit exprimée par l'université, soit faisant l'objet d'un thème de compétition de design, ou identifiée par les étudiants eux-mêmes afin de répondre à un besoin sociétal ou personnel.

Dans un cas général, on peut classifier les projets de design dans les curriculums d'ingénierie en deux grandes catégories : les projets de design à grande échelle, et les projets de design à petite échelle.

- Les projets à grande échelle sont des projets majeurs de design qui durent généralement tout au long d'un semestre. Il est préférable pour ce genre de projets de travailler dans un studio ou laboratoire de design puisque les étudiants travaillent en groupes de deux ou plus. Un semestre est assez suffisant pour que les étudiants comprennent les bases du processus de design et éventuellement l'implémenter dans leurs designs. Un enseignant est généralement affecté à chaque groupe afin de jouer le rôle d'un facilitateur. Le projet de design peut être soit donné à toutes les équipes ou être différent d'une équipe à une autre, et peut être proposé soit de la part d'une entité industrielle, soit de la part de l'institution ou faire l'objet d'un projet personnel de la part des étudiants. Les projets à grande échelle se clôturent par des livrables tels qu'un design détaillé, un prototype ou une preuve du concept.

- Les projets de design à petite échelle sont des projets qui durent approximativement six semaines. Le but de ce genre de projets est d'introduire les étudiants au design en se concentrant uniquement sur quelques phases du processus de design ; la courte durée du projet ne permettant pas de se focaliser sur l'intégralité du processus.

Tout comme dans les projets de design à grande échelle, les étudiants travaillent en groupes de deux ou plus dans un environnement dédié au design comme un laboratoire ou un studio. Généralement, le même projet est assigné par l'enseignant à tous les groupes permettant ainsi une évaluation de la performance de chaque équipe par rapport aux autres équipes. Les livrables de projets de design à petite échelle sont sous forme d'un design conceptuel ou d'une preuve de concept, accompagnés d'un mini-rapport et d'une présentation orale.

L'avantage de ce genre de projets de design réside dans le fait qu'ils ne prennent pas beaucoup de temps, et par conséquent les étudiants peuvent avoir l'occasion de travailler sur une multitude de projets et expérimenter différentes disciplines. Cependant, le revers de la médaille est que le fait de travailler sur un certain nombre de projets s'avère plus exigeant en termes de ressources (matérielles, humaines, ou autres), des fois même un peu plus que les projets de design à grande échelle. Le deuxième aspect négatif de ce genre de projets est qu'ils ne permettent pas aux étudiants d'expérimenter le processus de design et développement de produits dans son intégralité, et encore moins les étapes du processus où ils devraient avoir contact avec le client.

La table ci-dessous classifie les différents types de projets de design selon les différents critères cités précédemment (Table 2).

Table 2 : Types de projets de design et caractéristiques

Type de projet	Projets de design à grande échelle	Projets de design à petite échelle
Durée du projet	Approximativement un semestre	Approximativement 6 semaines
Source de la problématique du projet	- Entité industrielle - Institution - Projet personnel	- Enseignant
Individuel ou en groupe	En groupe	En groupe
Espace dédié au projet	Studio ou laboratoire de design	Studio ou laboratoire de design
Livrables	- Design détaillé - Prototype	- Design conceptuel - Preuve de concept

	- Preuve de concept	
Avantages	- Compréhension des bases du processus de design et développement de produits - Implémentation du processus de design	- Opportunité de travailler sur une multitude de projets
Inconvénients	- Exigeant en termes de ressources matérielles, humaines, et de temps	- Exigeant en termes de ressources matérielles, humaines - Impossibilité d'expérimenter le processus de design et développement de produits dans son intégralité

III-3-5 Initiatives visant à intégrer le design dans le curriculum d'ingénierie :

II-3-5-1 Pour les premières années du curriculum :

Durant les deux dernières décennies, le curriculum d'ingénierie a connu d'importants changements au niveau des premières années (Al-Holou et al. 1999 ; Froyd et Ohland 2005).

Le curriculum des premières années d'ingénierie a souvent fait l'objet de plusieurs critiques ; jugé trop traditionnel, déconnecté de l'ingénierie, et ne participant pas dans la préparation des étudiants à faire face aux challenges de la société (Hunter 2004). Par conséquent, dès la fin des années 1980, un besoin urgent d'intégrer le design dans les premières années du curriculum d'ingénierie s'est fait sentir (Knight et al.2007). Cela est particulièrement dû d'un côté aux nouvelles exigences des organisations d'accréditation comme ABET, et d'un autre côté au fait que le design n'est pas une compétence qui peut être enseignée en un cours, mais qui est plutôt une expérience qui doit évoluer avec l'étudiant tout au long de son cursus.

Dans cette perspective, des réformes sous forme de cours ou de projets ont été introduites dans les curriculums de diverses universités, particulièrement dans les universités américaines, anglaises ou canadiennes.

L'université de Florida par exemple a choisi d'infuser le design précocement dans le curriculum d'ingénierie en convertissant un cours intitulé « Introduction à l'ingénierie » qui était uniquement basé sur des lectures théoriques, en un projet de design réalisé dans un laboratoire (Hoit et Ohland 1998). La faculté d'ingénierie à l'université de Rowan aux Etats-Unis a utilisé le cadre du design pour faire acquérir aux étudiants de première année les compétences de base en ingénierie telles que la résolution de problèmes (Jahan et al.2002). A

l'université East Carolina, la réforme du curriculum des premières années s'est focalisée sur l'initiation des étudiants au processus de design à travers un projet de design qui dure tout au long d'un semestre (Bean et al.2012). D'autres universités ont par ailleurs proposé des séries d'exercices et projets pratiques afin d'introduire les étudiants au design (Demel et al.1994). D'autres institutions ont choisi de restructurer complètement leur curriculum d'ingénierie afin d'incorporer le design dès les premières années. La Chalmer's University par exemple a implémenté pendant plus de 10 ans l'initiative CDIO (*Conceive-Design-Implement-Operate*) dans son curriculum de génie mécanique. La Northwestern University quant à elle offre un programme totalement dédié au design intitulé IDEA (*Institute for Design Engineering and Applications*), où les étudiants sont certifiés après avoir complété une série de cours de design, et réalisé une multitude de projets de design (McKenna et al.2007).

Dans ce qui suit, nous allons présenter d'une part les méthodes pratiques d'intégration du design dans les curriculums existants, et d'autre part deux exemples d'initiatives à savoir CDIO et IDEA pour la restructuration complète du curriculum d'ingénierie en vue d'incorporer le design dès les premières années.

A/ Les méthodes pratiques d'intégration du design :

Nous avons pu noter à travers la littérature qu'il existe différentes pratiques qui servent de méthodes pédagogiques pour l'enseignement du design aux étudiants de premières années. Ces méthodes sont reliées et complémentaires de telle façon qu'une méthode peut être associée à une autre dans un programme de design. Dans ce qui suit, nous allons définir chacune de ces méthodes, et donner des exemples de leur implémentation.

- L'apprentissage basé sur le projet (*Project-based learning PjBL*)

Durant la dernière décennie, l'apprentissage basé sur le projet (PjBL) a été de plus en plus testé et adopté dans différents curriculums d'ingénierie (Lehmann et al. 2008, Kolmos 2009). Dans la littérature, le PjBL est considéré comme une approche à travers laquelle « *les étudiants recherchent des solutions à des problèmes non-triviaux, posent des questions, débattent des idées, font des prédictions et le design de plans et d'expériences, proposent des conclusions, communiquent leurs idées et résultats aux autres, demandent de nouvelles questions, et créent des choses* » (Blumenfeld et al. 1991).

Le PjBL est centré sur le principe que l'apprentissage est plus efficace lorsque les étudiants mettent en pratique les théories qu'ils apprennent, un principe prôné par le pédagogue américain John Dewey (Morgan 1983). En apprentissage basé sur le projet, le rôle de l'étudiant n'est plus « apprendre en écoutant », mais devient plutôt « apprendre en faisant » (Stauffacher et al. 2006) et on passe donc d'un apprentissage passif à un apprentissage actif, (Barron et al. 1998; Van Kotze & Cooper 2000; Danford 2006; Nation 2008).

Les idées de projets dans le PBL sont inspirées généralement des besoins de la vie réelle (de Graaf & Kolmos 2007; Thomas 2000; Bell 2010; Hanney & Savin-Baden 2013). Cette connexion entre le curriculum d'ingénierie et les besoins sociétaux a pour objectif de renforcer l'intérêt et la motivation des étudiants pour ce genre de projets (Bell 2010).

Les avantages du PBL sont divers et incluent : la familiarité avec le processus de design en ingénierie, le développement de compétences relatives à la pratique professionnelle, l'amélioration de la performance académique, et le développement de qualités non tangibles comme la motivation et l'autodiscipline. Les étudiants développent aussi un grand intérêt pour l'ingénierie et une assimilation plus grande des concepts techniques. De même, le PBL favorise l'interdisciplinarité (Danford 2006; Lehmann 2008; de Graaf & Kolmos 2009; Otake et al. 2009; Hanney & Savin-Baden 2013) car les projets de design sont conçus de telle manière à permettre aux étudiants de développer une pensée holistique qui dépasse toutes les frontières disciplinaires. L'un des points forts aussi du PBL c'est qu'il favorise le travail d'équipe (Van Kotze & Cooper, 2000), puisque le processus du travail collaboratif ainsi que les compétences et qualités qui lui sont relatifs, forment une part intégrale des objectifs d'apprentissage (Danford 2006). Par ailleurs, l'un des points négatifs de cette méthode est le temps alloué aux projets, qui est généralement long, et qui se fait aux dépens du contenu des cours (Libii 2002 ; Miri et Fu 1993).

L'évaluation de la performance des étudiants dans les projets du PBL se fait généralement en se basant sur les rapports des étudiants ainsi que les présentations finales (individuelles ou en groupe) (Nation 2006 ; Lehmann et al. 2008). D'autres méthodes d'évaluation incluent l'utilisation des e-portfolios qui contiennent des rapports écrits, des présentations multimédia ainsi que des études et des analyses (Gülbahar and Tinmaz 2006), ou une présence de clients externes lors du processus d'évaluation (Danford 2006; Hanney & Savin-Baden 2013; Lockrey & Bissett Johnson 2013). Avant de considérer l'implémentation d'un PBL pour enseigner le design d'ingénierie, il est recommandé de bien analyser le projet de design avant de le proposer aux étudiants, pour s'assurer que le projet de design est adéquat au cours, que les étudiants peuvent compléter le projet dans le délai voulu, que le projet de design peut être

prototypé et testé, et que finalement toutes les ressources matérielles sont accessibles aux étudiants (Miri et Fu 1993).

Différents exemples d'intégration du design à travers l'apprentissage basé sur le projet sont présents dans la littérature. Par exemple, Yoder a utilisé le PBL dans un cours de génie électrique pour introduire les étudiants de 2^{ème} année au design (Yoder 1993). Hadim et Esche ont implémenté la méthode PBL dans un cours de mécanique de solides dédié aux étudiants de 1^{ère} année, et un cours de dynamique pour les étudiants de 2^{ème} année (Hadim et Esche 2002). Abu-Mulaweh et Al-Arfaj ont introduit le design aux étudiants dans un cours de thermodynamique à travers le design d'un système réfrigérant (Abu-Mulaweh et Al-Arfaj 2012). Finalement, Newcomer (1998) enseigne un cours de contrôle automatique pour les étudiants de 2^{ème} année et de dernière année à travers un projet de design qui dure tout au long d'un semestre.

- Reverse engineering

A travers cet exercice pratique, les étudiants apprennent le processus de design en observant son application directement sur un produit. Dans cette méthode, un produit est « observé, désassemblé, analysé, testé, expérimenté et documenté en termes de ses fonctionnalités, ses principes physiques, son assemblage et sa production » (Wood et al. 2001).

La durée de ces projets varie selon la complexité du produit à étudier et des livrables demandés, mais généralement cette durée n'excède pas quelques semaines. Le projet peut être mené individuellement ou en groupes, et nécessite également un laboratoire ou atelier de design.

A la fin du projet, les étudiants doivent fournir une documentation détaillée du design effectué, incluant des dessins, une liste des composants du produit, ainsi qu'une explication détaillée des processus utilisés lors du design du produit. Les étudiants doivent aussi inclure dans leur rapport les instructions nécessaires pour le réassemblage du produit, ainsi que des propositions d'amélioration.

Contrairement aux méthodes traditionnelles d'enseignement du processus de design, la méthode du « reverse engineering » révèle le processus de design dans un nouvel aspect qui demande de la réflexion et de l'observation, ce qui permet aux étudiants de mieux assimiler le processus de design en ingénierie à travers le désassemblage et le re-design du produit (Wood et al. 2001). Cette approche permet aussi de développer la pensée design chez les étudiants, et leur permet de renforcer leurs connaissances des principes d'ingénierie. Il a aussi été

remarqué que cette méthode permet d'augmenter le taux de rétention des étudiants en ingénierie.

La méthode du « reverse engineering » est intéressante par son originalité pour l'enseignement pratique du design en ingénierie et s'avère relativement moins coûteuse. Néanmoins, les points faibles de cette méthode résident dans le fait qu'elle ne prend pas en considération les phases préliminaires du processus de design qui encouragent la créativité.

Plusieurs institutions ont recours à cette méthode dans leur curriculum de 1^{ère} année en ingénierie, à savoir les universités Manitoba, Fairbanks Alaska, North Carolina State, Northwestern, Rutgers, Iowa State, et l'université Tuskegee ainsi que l'institut technologique de Massachusetts et l'institut polytechnique Rensselaer.

L'université Tuskegee ont développé un cours intégral de la méthode « reverse engineering » (Aglan et Ali 1996). Le cours est dédié aux étudiants de 1^{ère} et 2^{ème} année, et a pour objectif de « *fournir des expériences pratiques qui permettent aux étudiants de développer une attention particulière du processus de design et introduisent les étudiants au vocabulaire des systèmes mécaniques* » (Aglan et Ali 1996).

Dans ce cours, les étudiants désassemblent une variété de produits qui incluent une balance, un engin à essence et une pompe centrifuge. Ce qui est aussi intéressant dans ce cours, c'est qu'à travers l'étude des différents produits, les étudiants peuvent comprendre différents concepts d'autres cours. Par exemple, le désassemblage de la balance a permis aux étudiants de mieux comprendre les concepts de l'équilibre des forces et des moments, enseignés dans un cours de statique. D'autre part, le désassemblage de la pompe centrifuge peut être intégré dans un cours de mécanique de fluides afin de familiariser les étudiants avec le design de turbines et de leur faire comprendre comment la pompe augmente la pression du fluide à travers la force centrifuge.

- Les études de cas (*Case Study analysis*)

L'analyse des études de cas est une autre méthode pour introduire les étudiants au design. Cette méthode consiste en l'étude des designs déjà existants. En analysant les processus de design utilisés par les ingénieurs dans des applications réelles, les étudiants assimilent mieux les étapes du processus. Une autre variante de ce genre de méthodes est d'analyser les designs existants qui ont échoué. En examinant ce qui se passe quand les ingénieurs de design échouent dans leurs designs, les étudiants saisissent la valeur du design et son importance pour leur carrière future.

Les études de cas sont généralement présentées en classe, et les étudiants sont tenus de présenter oralement et par écrit un cas de design déjà existant et d'analyser son processus.

Les institutions qui utilisent ce genre de méthodes incluent les universités British Columbia, Queen, Toronto, Colorado, Virginia et San Jose, ainsi que l'institut de technologie de Massachusetts et l'institut polytechnique de Virginia.

L'université de Virginia utilise les études de cas comme une part d'un cours de design (Gorman et al. 1995). L'un des cas étudiés concerne l'invention du téléphone. Les étudiants sont exposés aux designs de Graham Bell, Elisha Gray et Thomas Edison, et sont impliqués dans une comparaison des différents designs. A travers le processus de cette étude de cas, les étudiants acquièrent une expérience en communication écrite et orale, et développent leur expérience pratique à travers le processus de prototypage qui leur permet de concrétiser leurs idées. Il est à noter aussi que ces études de cas peuvent être intégrées dans différents cours pour enseigner les concepts à la fois de design et des sciences d'ingénierie. Par exemple, le cas de l'invention du téléphone peut être implémenté dans un cours d'électricité pour renforcer les concepts techniques appris en cours.

La méthode des études de cas est une méthode avantageuse pour intégrer le design dans les curriculums d'ingénierie. Cette méthode encourage la pensée critique chez les étudiants et leur permet d'être des praticiens professionnels en ingénierie en leur donnant la possibilité d'évaluer et critiquer les décisions d'autres designers.

- L'apprentissage basé sur l'exploration (*Inquiry-based learning*)

L'apprentissage basé sur l'exploration pousse les étudiants à créer la connaissance au lieu de recevoir la connaissance de leurs professeurs. Cette approche non-traditionnelle d'enseignement exige que les étudiants cherchent un problème particulier et collectent toutes les données qui lui sont relatives (Frank et al. 2003). La pratique de l'IBL peut se faire par exemple de la manière suivante : l'enseignant montre aux étudiants une vidéo qui détaille le processus de design d'un produit connu, et leur demande d'écrire leurs observations concernant la vidéo et les partager avec le reste de la classe. Puisqu'aucune réponse n'est jugée fausse, toutes les observations plausibles sont respectées. Cependant, les étudiants sont encouragés à critiquer les observations de leurs collègues et proposer des alternatives de solutions en se basant sur la discussion de la classe. Les étudiants sont les seuls contributeurs à leur apprentissage, et l'enseignant ne fait que les guider dans la discussion. Quand des questions plus avancées sont posées, l'enseignant peut entamer des explications plus

détaillées. Cette approche permet d'entamer une discussion qui clarifie les concepts utilisés dans un processus de design, et peut même conduire l'étudiant à inventer de nouveaux concepts.

L'un des avantages majeurs de la méthode IBL est sa capacité à pousser les étudiants à découvrir et créer de la connaissance à travers l'observation, plutôt que de la recevoir facilement de la part des enseignants. Cette méthode aide les étudiants à développer un esprit critique et indépendant. Cependant, cette méthode n'est pas suffisante à elle seule pour donner aux étudiants une forte expérience en design, et il est préférable de l'utiliser en combinaison avec les méthodes PBL ou DBL.

- Les compétitions de design (*Design competitions*)

Les compétitions de design sont similaires à la méthode l'apprentissage par projet car les étudiants sont tenus de réaliser un projet de design. Cependant, les compétitions de design permettent aux étudiants d'expérimenter l'aspect compétitif de l'ingénierie, ce qui augmente de loin leur motivation pour le projet et leur intérêt pour l'apprentissage. Gregson et Little (1999) ont eu recours à la compétition pour incorporer le design dans un cours d'électronique analogique pour les étudiants de 2^{ème} année de l'université Dalhousie. Les étudiants sont appelés à faire le design et la construction d'un circuit électronique pour le contrôle d'un véhicule robotique. Le matériel utilisé a servi aux étudiants pour faire le design, l'implémentation et les tests de circuits pour contrôler la direction et la vitesse du moteur, ainsi que les capteurs de lumière, de métal, et d'obstacles. Cette compétition a exposé les étudiants au processus de design à travers l'identification du concept, l'acquisition de la connaissance, et l'exercice de la prise de décision. Gregson et Little soulignent que l'un des points forts de cette méthode est l'aspect attractif. En effet, les étudiants sont impressionnés par l'aspect « spectacle » qu'offre la compétition, ce qui augmente leur motivation, et attire de futurs étudiants au curriculum d'ingénierie. Dans l'expérience qu'ont conduit Gregson et Little, les étudiants ont affirmé que la compétition de design a développé leur intérêt pour l'ingénierie électrique, qu'elle leur a fourni une bonne expérience en ingénierie, et qu'elle a été un moyen efficace pour l'apprentissage par rapport aux lectures conventionnelles dont ils avaient l'habitude.

D'une autre part, les compétitions de design "*impromptu*" (littéralement « improvisées ») sont aussi utilisées pour assurer une intégration du design dans les cours existants en donnant aux étudiants un problème, du matériel et un délai court bien défini (Clayton et al.2010). Ces

compétitions dites impromptu sont intéressantes car elles n'exigent pas une durée importante, contrairement aux autres méthodes d'intégration de design qui durent tout le long d'un semestre. Cette méthode se focalise sur l'application sur l'un ou deux des concepts d'ingénierie, alors que les compétitions de tout un semestre exigent l'application d'un certain nombre de concepts enseignés dans le cours (Clayton 2012). Le temps alloué à ce genre de compétitions est utilisé par les étudiants pour la réflexion autour du problème et l'explicitation du processus de résolution de ce problème. Les étudiants partagent leurs concepts de solutions et les étapes du processus de design avec le reste de la classe, et cet exercice de réflexion permet aux étudiants de se familiariser avec le processus de design en ingénierie (Clayton 2012), et de développer des compétences au niveau de la pensée créative et critique, la résolution des problèmes et le travail d'équipe (Reidsema et al. 2014).

Les compétitions de design « impromptu » ont été implémentées dans différents cours, comme un cours d'introduction au design pour les étudiants de 1^{ère} année, un cours de mécatronique pour les étudiants du génie mécanique, un cours de mécanique pour les étudiants en génie civil, et un cours de biomatériaux pour les étudiants de génie chimique (Clayton et al. 2010).

- L'apprentissage basé sur le design (*Design-based learning*)

Les méthodes d'intégration du design se basent généralement sur les sciences d'ingénierie comme fondement pour intégrer et enseigner le processus de design. Dans la méthode du DBL (*Design-based learning*), littéralement « L'apprentissage basé sur le design », les rôles sont inversés : Le design est utilisé pour enseigner les sciences d'ingénierie.

Il existe plusieurs exemples de la méthode DBL dans la littérature (Kolodner 2002 ; Akins et Burghardt 2006 ; Etkina et Heuvelen 2007 ; Cantrelle et al. 2006 ; Apedoe et al. 2008 ; Oliver et Kane 2011). Par exemple, à l'institut Georgia de technologie, l'apprentissage basé sur le design est une approche qui fournit une « raison pour l'apprentissage de la science » (Kolodner 2002). Les étudiants comprennent mieux les concepts scientifiques lorsqu'ils testent leurs designs, et arrivent à des conclusions scientifiques à travers le travail collaboratif et la communication qu'offre le processus de design. Il a aussi été remarqué qu'à travers la méthode de l'apprentissage basé sur le design, les étudiants apprennent vite, et par conséquent permettent à leurs enseignants d'avancer rapidement dans le cours (Apedoe et al. 2008 ; Oliver et Kane 2011). Malgré les nombreux avantages qu'offre cette méthode, l'apprentissage basé

sur le design ou le DBL est très peu utilisé dans les curriculums d'ingénierie (Puente et al.2013).

- Discussion sur l'utilisation de ces méthodes :

Le choix d'une méthode appropriée pour intégrer le design dans un curriculum d'ingénierie dépend de plusieurs paramètres. Il n'existe pas de bonne ou mauvaise méthode ; chaque méthode a ses propres avantages et ses propres inconvénients, d'autant plus que toutes les méthodes sont interconnectées entre elles d'une manière ou d'une autre (Morris et McAdams 2015). La seule façon donc de se décider de la méthode à implémenter est de bien connaître les objectifs d'apprentissage désirés. Il est aussi recommandé de ne pas appliquer ces méthodes séparément, mais d'en faire des combinaisons pour plus d'efficacité (Morris et McAdams 2015).

Par exemple, la méthode d'apprentissage basé sur le design (IBL) peut être implémentée avec les méthodes d'apprentissage basé sur le projet (PjBL), les études de cas et le reverse engineering. Les études de cas peuvent être utilisées en combinaison avec les méthodes du PBL et DBL pour renforcer l'aspect réflexion dans la pratique du processus de design. Il est à noter aussi que la méthode du reverse engineering vérifie la mission de la méthode DBL, puisque le désassemblage et le re-design d'un produit permettent aussi d'apprendre et mieux comprendre les principes des sciences d'ingénierie. Finalement, les compétitions de design peuvent être utilisées à la fin de chaque méthode pour faire bénéficier les étudiants de tous les avantages qu'offre l'aspect compétitif en ingénierie.

Dans la table ci-dessous, on résume les différentes méthodes d'intégration du design dans les curriculums d'ingénierie, leurs descriptions, ainsi que les avantages et les inconvénients de leur implémentation (Table 3).

Table 3 : Méthodes d'intégration du design dans les curriculums d'ingénierie ; avantages et inconvénients

Méthode d'intégration du design	Description	Avantages	Inconvénients
L'apprentissage basé sur le projet <i>PjBL</i>	Méthode d'apprentissage actif, qui consiste à réaliser un projet de design	-Permet de se familiariser avec le processus de design d'ingénierie -Permet de développer de compétences relatives à la pratique professionnelle -Permet de développer des qualités non tangibles comme la	- Est très exigeante en temps et ressources humaines - Est difficile à évaluer - Nécessite un choix judicieux d'un projet adéquat au cours

		motivation et l'autodiscipline -Favorise l'interdisciplinarité -Favorise le travail d'équipe	
L'apprentissage basé sur l'exploration <i>IBL</i>	Méthode qui consiste à créer de la connaissance autour du design à travers l'observation et l'exploration	-Permet de pousser les étudiants à découvrir et créer de la connaissance à travers l'observation - Aide les étudiants à développer un esprit critique et indépendant	N'est pas suffisante à elle seule pour donner aux étudiants une forte expérience en design
L'ingénierie inverse <i>Reverse engineering</i>	Méthode qui permet d'apprendre le processus de design en observant son application directement sur un produit	-Révèle le processus de design dans un nouvel aspect qui demande de la réflexion et de l'observation - Permet aussi de développer la pensée design chez les étudiants ingénieurs - Permet de renforcer leurs connaissances des principes d'ingénierie	Ne prend pas en considération les phases préliminaires du processus de design qui encouragent la créativité.
Les études de cas	Méthode qui consiste en l'étude des designs déjà existants ou ceux qui ont échoué	- Encourage la pensée critique chez les étudiants - Leur permet d'être des praticiens professionnels en ingénierie - Leur donne la possibilité d'évaluer et critiquer les décisions d'autres designers.	Ne peut être utilisée à elle seule pour introduire le design
L'apprentissage basé sur le design <i>DBL</i>	Méthode où le design est utilisé pour enseigner les sciences d'ingénierie	- Permet de mieux comprendre les concepts scientifiques à travers le design - Permet aux enseignants d'avancer rapidement dans le cours - Permet d'arriver à des conclusions scientifiques	Nécessite une réadaptation du curriculum d'ingénierie
Les compétitions de design	Méthode d'apprentissage actif, qui consiste à réaliser un projet de design tout en intégrant l'aspect compétitif	-Augmente la motivation des étudiants, et attire de futurs étudiants au curriculum d'ingénierie -Permet aux étudiants	

		de se familiariser avec le processus de design en ingénierie - Permet de développer des compétences au niveau de la pensée créative et critique, la résolution des problèmes et le travail d'équipe	Nécessite un temps important
--	--	--	------------------------------

B/ Les initiatives pour la restructuration complète du curriculum d'ingénierie en vue d'incorporer le design

➤ **CDIO** (*Conceive-Design-Implement-Operate*)

CDIO est un cadre éducatif innovant qui a été initié par le *Massachusetts Institute of Technology* en 1990 avec la collaboration de plus de 70 universités à travers le monde. Sa mission repose sur la production de la génération future d'ingénieurs, à travers l'immersion des étudiants dans la conception, le design, l'implémentation et l'opération de produits réels. Cette initiative procure un bon cadre pour les standards de l'éducation en ingénierie ainsi que le curriculum d'ingénierie et son évaluation, le tout présenté dans un syllabus. L'innovation est l'ingrédient de base pour la conception du cadre CDIO. Crawley et al. (2007) déclarent que les compétences relatives à l'innovation sont présentes dans au moins 12 sections du syllabus CDIO. En effet, le syllabus de CDIO présente l'innovation comme une part intégrale de l'environnement d'apprentissage.

Dans ce qui suit, nous allons expliciter les différentes sections du syllabus.

Les 12 standards de CDIO comprennent la philosophie du programme (Standard 1), le développement du curriculum (Standards 2, 3 et 4), les expériences relatives au design et développement de produits innovants ainsi que les espaces de travail qui leur sont dédiés (Standards 5 et 6), les nouvelles méthodes d'enseignement et d'apprentissage (Standards 7 et 8), le développement de l'institution (Standards 9 et 10), ainsi que les mesures d'évaluation (Standards 11 et 12).

Standard 1 : CDIO comme contexte

Ce premier standard consiste à adopter le principe que le développement et le déploiement d'un produit ou système – « *Conceiving, Designing, Implementing and Operating* » sont le contexte même de la formation d'ingénieurs.

Conceiving--Designing--Implementing—Operating est un modèle pour le cycle de vie entier d'un produit. Le stage « *conceive* » (littéralement concevoir) inclut une définition des besoins des clients, une considération de la technologie et de la stratégie de l'entreprise, ainsi qu'un développement conceptuel, technique et économique de plans. Le second stage « *Design* » se focalise sur la création de design incluant les plans, dessins et algorithmes qui décrivent ce qui va être implémenté. Le stage « *Implementing* » se réfère à la transformation du design en produit, y compris la fabrication, le codage, les tests et la validation. Le stage final « *Operate* » utilise le produit implémenté pour délivrer la valeur prévue, y compris le maintien, l'évolution et le retrait du système.

CDIO est considéré comme le contexte de la formation d'ingénieurs du fait qu'elle représente le cadre culturel ou environnemental, dans lequel les connaissances techniques et autres compétences sont enseignées, pratiquées et apprises. Le principe de CDIO est dit « adopté » par un programme quand il y a accord explicite de l'institution à initier CDIO, un plan pour la transition vers un programme CDIO, et le soutien des responsables de programmes pour soutenir de telles initiatives de réforme.

Les ingénieurs débutants doivent être capables de *Conceive--Design--Implement—Operate* des produits et systèmes d'ingénierie qui ont de la valeur ajoutée dans un environnement moderne basé sur le travail collaboratif. Ils doivent être capables de participer à des processus d'ingénierie, contribuer au développement des produits d'ingénierie, et faire la même chose lorsqu'ils travailleront dans des entreprises d'ingénierie. Ceci est l'essence même de la profession d'ingénierie.

Standard 2 : Les objectifs du syllabus CDIO

Le standard N°2 détaille les objectifs d'apprentissage qui comprennent les compétences personnelles, interpersonnelles ainsi que les compétences relatives au développement et réalisation des produits et systèmes.

Ces objectifs d'apprentissage explicitent ce que les étudiants sont censés connaître et faire en fin de leur cursus d'ingénierie. Les objectifs d'apprentissage personnels se focalisent sur le développement affectif et cognitif des étudiants, comme la résolution des problèmes, l'expérimentation et la découverte de la connaissance, la pensée créative et critique et

l'éthique professionnelle. Les objectifs d'apprentissage interpersonnels se focalisent sur les interactions individuelles et en groupe comme le travail d'équipe, le leadership et la communication. Les compétences relatives au développement de produits comprennent la conception, le design, l'implémentation et l'opération des systèmes dans le contexte de l'entreprise, des business, et de la société.

Ces objectifs d'apprentissage sont généralement inspirés des attributs clés identifiés par les organisations professionnelles d'ingénierie et les représentants industriels, et le fait de mettre en place ces objectifs d'apprentissage dans un curriculum d'ingénierie aide à s'assurer que les étudiants ont acquis les fondements appropriés pour leur carrière future.

Standard 3: Le curriculum intégré:

Il s'agit d'un programme conçu avec des sujets disciplinaires qui se soutiennent mutuellement, avec un plan explicite visant à intégrer les compétences personnelles, interpersonnelles et les compétences relatives au développement de produits.

Les différentes disciplines se soutiennent mutuellement lorsque des connections sont établies entre le contenu des matières enseignées et les objectifs d'apprentissage.

L'enseignement des compétences personnelles, interpersonnelles ainsi que les compétences relatives au développement de produits n'est pas considéré comme un plus à un curriculum, mais plutôt comme une part intégrale du curriculum d'ingénierie. Pour atteindre les objectifs d'apprentissages relatifs aux disciplines enseignées, ainsi que les compétences personnelles, interpersonnelles et de développement de produits, le curriculum et les expériences d'apprentissage doivent faire une double utilisation du temps disponible. L'institution joue un rôle actif dans la conception du curriculum intégré en adressant les objectifs d'apprentissage de CDIO dans ses domaines d'enseignement respectifs.

Standard 4 : Introduction à l'ingénierie

Le standard N°4 souligne l'importance d'un cours introductif dans le curriculum d'ingénierie. Le cours introductif à l'ingénierie est généralement l'un des cours nécessaires dans le programme puisqu'il assure un cadre pour la pratique de l'ingénierie. Ce cadre souligne les tâches et responsabilités d'un ingénieur ainsi que les connaissances nécessaires pour l'exécution de ces tâches. Les étudiants s'engagent dans la pratique de l'ingénierie à travers la résolution de problèmes et en effectuant de simples exercices de design, individuellement ou en groupes. Le cours inclut aussi les connaissances, compétences et attitudes personnelles et

interpersonnelles essentielles au début du curriculum pour préparer les étudiants à des expériences plus avancées en développement de produits.

Les cours introductifs ont pour objectif de stimuler l'intérêt des étudiants et renforcer leur motivation pour le domaine de l'ingénierie. Les étudiants choisissent généralement les curriculums d'ingénierie parce qu'ils veulent réaliser et construire des choses, et les cours introductifs peuvent capitaliser sur cet intérêt. En plus de cela, les cours introductifs assurent un début précoce au développement des compétences décrites dans le syllabus de CDIO.

Standard 5: Les activités de design et développement de produits

Ce standard préconise un curriculum qui inclut au moins deux expériences de design et de développement de produits, l'une à un niveau précoce et une autre à un niveau avancé.

A travers ces expériences intégrées dans le curriculum, les étudiants développent des compétences relatives au développement de produits, ainsi que la capacité à appliquer les sciences d'ingénierie. Ces expériences sont considérées basiques ou avancées dépendamment de leur cadre, complexité et séquence dans le curriculum. Par exemple, le design de produits simples est inclus très précocement dans le programme, alors que les projets plus complexes de design et développement de produits apparaissent dans des cours avancés, permettant ainsi aux étudiants d'intégrer les connaissances et les compétences acquises dans des cours et activités précédents.

Les activités de design et développement de produits sont structurées de telle manière à promouvoir un succès précoce en pratique de l'ingénierie. L'itération qui est nécessaire dans ce genre d'activités ainsi que l'augmentation de la complexité des processus de design, renforcent la compréhension des étudiants des processus de développement de produits. Ces activités assurent aussi un fondement solide pour la compréhension conceptuelle des disciplines enseignées. Finalement, ces activités servent aux étudiants comme opportunités pour faire des connections entre ce qu'ils apprennent dans les différents cours et les carrières professionnelles d'ingénierie.

Standard 6 : Les espaces de travail de CDIO

Le standard N°6 souligne la nécessité d'avoir des laboratoires et espaces de travail qui supportent et encouragent l'apprentissage actif relatif au développement de produits et aux différentes disciplines.

Les laboratoires et espaces de travail mettent l'accent sur l'apprentissage pratique dans lequel les étudiants sont directement engagés dans leur propre apprentissage, et offrent des

possibilités d'apprentissage social, qui permet aux étudiants d'apprendre les uns des autres et d'interagir avec plusieurs groupes. La création de nouveaux espaces de travail et la rénovation des laboratoires existants, va varier selon la taille du curriculum d'ingénierie et les ressources de l'institution.

Les environnements d'apprentissage qui supportent l'apprentissage actif sont des ressources fondamentales pour l'apprentissage du processus de conception, développement et évaluation des produits et systèmes. Les étudiants qui ont accès à des outils d'ingénierie modernes dans des laboratoires ont l'opportunité de développer les connaissances, compétences et attitudes qui soutiennent le développement de produits. Ces compétences sont mieux développées dans des espaces de travail qui sont centrés sur l'étudiant, accessibles et interactifs.

Standard 7: Les activités d'apprentissage intégrantes

Il s'agit d'activités d'apprentissage qui conduisent à l'acquisition des connaissances des différentes disciplines, ainsi que les compétences personnelles, interpersonnelles et les compétences relatives à la conception et développement de produits.

Les activités d'apprentissage intégrantes sont des approches pédagogiques qui intègrent les problèmes professionnelles d'ingénierie dans des contextes où ils coexistent avec des questions théoriques des différentes disciplines.

Avec ce genre d'activités, la faculté peut aider les étudiants à appliquer les connaissances disciplinaires dans la pratique d'ingénierie et par conséquent mieux les préparer à répondre aux exigences de la profession d'ingénieur.

Standard 8: L'apprentissage actif

Le standard 8 consiste à utiliser des méthodes expérientielles d'apprentissage actif dans l'enseignement d'ingénierie.

Les méthodes d'apprentissage actif engagent les étudiants directement dans des activités de résolution de problèmes. L'intérêt est porté sur l'engagement des étudiants dans la manipulation, l'application, l'analyse et l'évaluation des idées. L'apprentissage actif dans les cours en classe peut inclure différentes méthodes comme des discussions en groupe, des démonstrations, des débats, des questions conceptuelles, ainsi que le feedback des étudiants concernant ce qu'ils apprennent en classe. L'apprentissage actif est considéré comme « expérientiel » lorsque les étudiants s'engagent dans des activités pratiques d'ingénierie telles que les projets de conception, les simulations et les études de cas.

Les étudiants se souviennent moins du quart de ce qu'ils entendent et seulement de la moitié de ce qu'ils voient et entendent. En engageant les étudiants dans des activités où ils doivent faire des réflexions sur des concepts, et proposer de nouvelles idées, les élèves apprennent non seulement plus, mais reconnaissent eux-mêmes ce qu'ils apprennent et comment ils l'apprennent. Ce processus de métacognition contribue à augmenter la motivation des élèves pour atteindre les objectifs d'apprentissage du programme. Avec des méthodes d'apprentissage actif, les instructeurs peuvent aider les élèves à faire des liens entre les concepts clés et faciliter l'application de ces connaissances.

Standards 9 et 10 : Amélioration des compétences de l'institution

Cela inclut les actions nécessaires pour améliorer les compétences de l'institution, incluant les compétences personnelles, interpersonnelles, les compétences relatives au développement de produits, ainsi que les compétences nécessaires pour pouvoir proposer des activités intégrées dans le curriculum et évaluer l'apprentissage des étudiants.

Si l'institution veut s'engager dans l'enseignement d'un curriculum d'ingénierie où l'étudiant acquiert des compétences personnelles, interpersonnelles et des compétences relatives au développement de produits comme décrites dans les standards 3,4,5 et 7, elle doit elle-même posséder ces compétences. L'institution et tout son staff doivent améliorer leurs connaissances et leurs compétences en ingénierie pour donner l'exemple aux étudiants et leur servir de modèle d'ingénieur contemporain.

De même, si les membres de l'institution décident d'enseigner et évaluer à travers les méthodes décrites dans les standards 7,8 et 11, ils doivent améliorer leurs compétences en mettant en place les ressources nécessaires pour le développement de l'institution dans les domaines d'enseignement et d'évaluation.

Standard 11 : L'évaluation des compétences CDIO

Le standard 11 souligne l'importance de l'évaluation des compétences personnelles et interpersonnelles des étudiants, ainsi que les compétences relatives au développement de produit et les connaissances disciplinaires.

L'évaluation de l'apprentissage de l'étudiant consiste à mesurer à quel point l'étudiant a atteint les objectifs d'apprentissage. Une évaluation efficace utilise une variété de méthodes adaptées de manière appropriée aux objectifs d'apprentissage décrits dans le standard 2, à savoir les connaissances disciplinaires, les compétences personnelles, interpersonnelles ainsi que les compétences relatives au développement de produits. Ces méthodes peuvent inclure

des tests écrits ou oraux, des observations de la performance de l'étudiant, des échelles d'évaluation, des réflexions d'étudiants, ainsi que l'auto-évaluation ou l'évaluation par les pairs.

Il n'est pas suffisant de définir les objectifs d'apprentissage, et de concevoir un curriculum basé sur ces objectifs, mais il est impératif d'avoir un processus d'évaluation effectif pour mesurer la réalisation de ces objectifs. Les méthodes d'évaluation diffèrent selon les objectifs d'apprentissage. Par exemple, les connaissances disciplinaires peuvent être évaluées par des tests écrits ou oraux, alors que les compétences relatives au développement de produits sont mieux mesurées à travers des observations.

Standard 12 : Evaluation du programme CDIO

Le dernier standard consiste à mettre en place un système qui évalue les curriculums d'ingénierie en tenant compte des 11 normes définies précédemment, et qui fournit un feedback aux étudiants, à la faculté, et aux autres parties prenantes, afin d'assurer une amélioration continue.

Un programme CDIO doit être évalué relativement à ses différents standards. Le feedback peut être obtenu à travers l'évaluation des cours, les réflexions des enseignants, les rapports des évaluateurs externes, ainsi que le suivi des étudiants après leur graduation. Ce feedback représente la base des décisions à prendre concernant le programme et son éventuelle amélioration.

Le but majeur de l'évaluation d'un programme est de déterminer son efficacité à atteindre les objectifs désirés. Le feedback obtenu après l'évaluation sert de base pour l'amélioration continue du programme. Par exemple, si après l'évaluation il s'est avéré que la majorité des étudiants n'ont pas acquis l'une des compétences, un plan peut être initié pour identifier les causes et mettre en place les changements adéquats.

➤ IDEA : (*Institute for Design Engineering and Applications*)

La Northwestern University a créé en 2006 le programme IDEA (Institut pour le design en ingénierie et ses applications) en collaboration avec la McCormick School of Engineering. A travers IDEA, les étudiants peuvent obtenir un certificat en design d'ingénierie en plus de leur diplôme d'ingénieurs. IDEA a été créé dans le but d'intégrer le design dans le curriculum d'ingénierie, et créer ainsi une communauté de design pour encourager l'innovation.

Ce programme engage les étudiants à faire du design innovant dans un cadre basé sur le travail d'équipe et la multidisciplinarité. Le design innovant implique l'identification et la résolution de problèmes attestés par des clients.

Pour obtenir un certificat en design d'ingénierie, les étudiants doivent compléter six cours de design, et créer tout un portfolio de design pour montrer leurs compétences en :

- Processus de design : à travers l'efficacité de la planification et la réalisation complète du projet de design.
- Analyse du design : à travers la bonne utilisation des méthodes analytiques pour la prise de décision et l'optimisation des paramètres.
- Prototypage et implémentation : à travers l'évidence que l'étudiant a construit des prototypes performants.
- Logiciels modernes : à travers l'évidence que l'étudiant sait manipuler un logiciel ou plus.
- Communication : à travers la présentation orale des concepts techniques.

Pour compléter leurs projets de design, et acquérir les compétences citées auparavant, les étudiants collaborent avec les étudiants qui ont déjà gradué, les chercheurs en post-doc, leurs enseignants, ainsi que les professionnels industriels.

II-3-5-2 Pour les dernières années du curriculum :

Comme il été signalé auparavant, les organisations d'accréditation des programmes d'ingénierie à travers le monde soulignent l'importance de l'incorporation du design dans les dernières années du curriculum. ABET par exemple affirme que « *les étudiants doivent être préparés à la pratique de l'ingénierie à travers un curriculum qui culmine en une expérience majeure de design, en se basant sur les connaissances et les compétences acquises tout au long du cursus* » (ABET 2015). Ces recommandations ont été prises en compte dans la plupart des programmes accrédités à travers l'implémentation des projets de design en dernière année du cursus, plus connus sous le nom des « *capstone design projects* » (Howe et Wilbarger 2006).

Les *capstone design projects* diffèrent d'une institution à une autre par les différents éléments qui caractérisent ce genre de projets, à savoir la portée du projet, le degré de liberté accordé aux étudiants, les sources des idées de projets, l'allocation du projet, les livrables du projet, et le type d'instruction donné.

La portée d'un projet de design se définit par l'ampleur que va prendre le processus de design dans le projet. Par exemple, l'université de Toronto offre un projet capstone qui dure tout au long d'une année, et qui inclut toutes les phases du processus de design. Les étudiants commencent par discuter avec le client le problème à résoudre, identifient le problème et font une recherche approfondie de l'existant. Ils passent par la suite à un brainstorming où ils génèrent de multiples concepts, évaluent ces concepts, et en choisissent un seul pour le prototypage et l'implémentation.

L'idée du projet de design peut tirer son origine soit des compagnies industrielles, des recherches effectuées au sein de l'institution, des enseignants ou des étudiants eux-mêmes.

Une fois que l'idée est validée, le projet de design peut être affecté de différentes manières aux étudiants. Il s'agit de l'allocation. Dans l'allocation unique, plusieurs équipes travaillent indépendamment sur un seul projet, généralement d'une manière compétitive. Dans l'allocation multiple, les équipes travaillent sur des projets indépendants et distincts. Finalement, l'allocation multiple-unifiée consiste à décomposer un problème complexe en des sous-projets indépendants et chaque équipe travaille sur un seul sous-projet. Il est possible aussi de combiner tous les types d'allocation, comme c'est le cas du projet capstone en génie mécanique à l'université Concordia (Hong et al.2005).

Les livrables du projet capstone consistent généralement en des rapports, des prototypes, des présentations ou des posters. Dans l'un des projets capstone de l'université Waterloo, les étudiants travaillent tout au long d'un semestre sur leur projet, et doivent fournir un rapport où ils décrivent le projet et ses spécifications, ainsi qu'une présentation effectuée devant un jury.

La dernière caractéristique du projet capstone est le type d'instruction donné aux étudiants. Cela peut inclure des cours de design, ainsi que des discussions autour du processus et méthodologies de design. L'université Alberta par exemple offre un projet capstone en génie mécanique qui dure tout au long d'un semestre, et où le design est enseigné en parties tout au long du projet. Le cours inclut la définition du problème, les spécifications client, le design conceptuel, et le design détaillé, avec un aperçu sur la gestion du projet, la production, l'estimation des coûts et la manière de réaliser un poster et une présentation.

II-4 Conclusions :

Ce chapitre a eu comme mission de souligner le lien étroit qui existe entre l'innovation et l'ingénierie. En effet, les ingénieurs sont tenus d'être techniquement compétents, mais doivent

aussi avoir d'autres compétences qui leur permettront de résoudre d'une manière créative et innovante les problèmes complexes. Les exigences de plusieurs organisations d'accréditation des programmes d'ingénierie identifient les compétences clés que les étudiants en ingénierie sont supposés acquérir comme compétences tout au long de leur cursus. Parmi ces compétences figure une solide connaissance du processus de design d'ingénierie, ainsi qu'une capacité à l'appliquer. En effet, l'apprentissage pratique à travers le design est le moyen le plus efficace dans l'enseignement de l'ingénierie, et diverses universités - notamment celles en USA, Canada et UK - ont essayé de faire un changement dans leur curriculum d'ingénierie afin d'incorporer le design.

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes initiatives visant à intégrer le design dans les curriculums d'ingénierie, incluant les méthodes pratiques d'intégration du design ainsi que les initiatives pour la restructuration complète du curriculum.

Les méthodes pratiques d'intégration du design sont intéressantes dans la mesure où elles assurent une première introduction des étudiants au design. Cependant les insuffisances de ces méthodes résident dans le fait que :

- le choix d'une telle ou telle méthode reste aléatoire et n'est pas basé sur une approche rationnelle.
- le choix d'une méthode peut ne pas être judicieux dans un contexte donné.
- l'utilisation d'une seule méthode peut ne pas être suffisante pour couvrir tous les aspects du processus de design, d'où la nécessité de faire des combinaisons de méthodes, ce qui peut s'avérer très demandant en termes de ressources financières et humaines.

D'autre part, les initiatives comme CDIO ou IDEA ont prouvé leur efficacité dans plusieurs curriculums, cependant les points négatifs de ces initiatives résident dans le fait que ces initiatives :

- nécessitent une restructure draconienne du curriculum.
- peuvent ne pas être adéquates dans certains curriculums à ressources limitées.

CHAPITRE III

PROCESSUS DE DEVELOPPEMENT DE PRODUITS

INNOVANTS

III-1 Introduction

La capacité à innover est intimement liée à la capacité de développer de nouveaux produits à succès commercial. Toutefois, plusieurs compagnies se focalisent uniquement sur l'amélioration de produits existants, et ceci pour plusieurs raisons. La première, est que la complexité de développer un nouveau produit est plus élevée que l'amélioration d'un produit déjà existant, et d'autre part les compagnies ne possèdent toujours pas la technologie et la connaissance nécessaires pour le développement de nouveaux produits innovants. Cependant, vu l'environnement dynamique d'aujourd'hui, chaque compagnie doit avoir la capacité d'innover et de proposer de nouveaux produits pour assurer sa survie et son développement économique. La clé de cette capacité est de reconnaître les vraies opportunités. Une opportunité peut émerger d'une nouvelle orientation du marché, d'une réduction de coûts, d'un nouveau processus de fabrication ou d'une nouvelle tendance. Par conséquent, le processus de design classique n'est plus complètement approprié, et la phase d'identification d'opportunités doit être prise en compte.

Dans ce chapitre, nous présentons une approche de développement de produits innovants adaptée basée sur un processus de design intégré allant de la découverte d'opportunité jusqu'au développement d'un produit tangible. Les objectifs derrière l'élaboration de ce chapitre se résument en 3 objectifs qui sont les suivants :

- Le 1^{er} objectif de ce chapitre est de permettre au lecteur de bien comprendre le processus de design et développement de produits.
- Le 2^{ème} objectif de ce chapitre est de présenter au lecteur un processus adapté de design et développement de produits en ingénierie mécanique, qui intègre les techniques et outils les plus efficaces, qui encourage l'innovation et qui est plus proche du processus comme il a lieu en pratique.
- Le 3^{ème} objectif est de permettre au lecteur une bonne appréhension de la pratique du processus de design pour bien assimiler la nécessité d'intégrer le design dans le curriculum d'ingénierie afin de graduer des ingénieurs ayant les compétences nécessaires pour développer des produits nouveaux et innovants.

Nous présentons sur la figure 5 un processus adapté de design et développement de produits. Les différentes phases de ce processus ainsi que les techniques utilisées dans chaque phase seront explicitées dans ce qui suit.

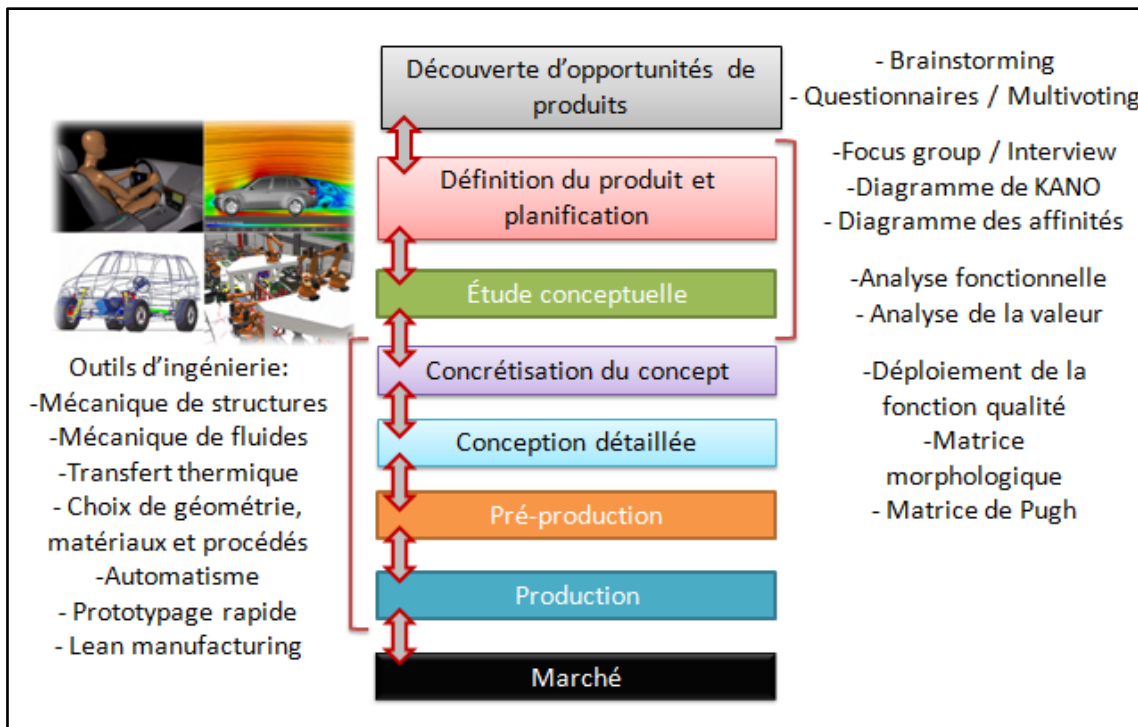


Figure 5 : Processus adapté de design et développement de produits innovants avec quelques outils utilisés

[Source : Notre recherche]

III-2 Découverte d'opportunités de produits :

III-2- 1 Identification d'opportunités :

Avant de commencer le design d'un produit, le besoin réel doit être établi. Dans le contexte de développement de produits, une opportunité est une idée d'un nouveau produit. Une opportunité est une description du produit sous une forme embryonnaire, une nouvelle découverte d'une technologie, ou un lien étroit entre un besoin et une solution possible. Pour une compagnie de produits de consommation comme Procter & Gamble, une opportunité peut être un nouveau type de détergent suggéré par un client. Pour une compagnie de matériaux comme 3M, l'opportunité peut être un nouveau polymère avec des propriétés particulières.

Une opportunité d'un nouveau produit est souvent articulée sur une page d'informations contenant un titre descriptif, une explication de l'idée, ainsi qu'un schéma d'un concept possible de produit.

Le processus d'identification d'opportunité est présenté dans 6 étapes clés (Terwiesch et Ulrich 2009) :

- **Etape 1:** Etablir une charte. Cette charte contient les objectifs à atteindre, ainsi que les conditions qui limitent la réalisation de ces objectifs.

➤ **Etape 2:** Générer plusieurs idées

La majorité des gens trouvent des difficultés à générer des opportunités prometteuses. Le problème est souvent jugé trop abstrait, non structuré, et a souvent plusieurs paramètres. Il existe cependant des techniques d'identification d'opportunités. On peut par exemple commencer par suivre une passion personnelle, lister les frustrations, étudier les clients, considérer les nouvelles technologies et les nouvelles tendances, et imiter et améliorer.

➤ **Etape 3:** Dépister les opportunités

Deux méthodes sont efficaces pour le dépistage : les questionnaires sur internet, et les workshops de « multivoting ».

➤ **Etape 4 :** Développer des opportunités prometteuses

➤ **Etape 5 :** Sélectionner les opportunités exceptionnelles

➤ **Etape 6 :** Valider l'opportunité de produit

III-2-2 Planning

Le planning de produit est un processus qui considère le portfolio des projets de développement de produits à exécuter.

Les questions à poser sont :

- Quelles nouvelles technologies doivent être incorporées dans un nouveau produit ?
- Quels sont les objectifs et les contraintes de fabrication du produit ?
- Quelles sont les objectifs financiers de ce projet ?
- Quel est le budget et la durée du projet ?

Pour développer un plan de produit et la mission de projet, un processus de 5 étapes est proposé :

- Identifier les opportunités.
- Evaluer et prioriser les projets (à travers une segmentation du marché)
- Allouer les ressources et définir la durée du plan.
- Compléter un planning de pré-projet (incluant la mission du projet, les hypothèses et les contraintes, les activités,...)
- Faire des réflexions sur les résultats.

Une fois que le planning est établi, l'équipe de design peut commencer réellement le développement de son produit en se basant sur le processus de design d'ingénierie composé

de 3 phases clés : la définition du produit, le design conceptuel et le développement du produit.

III-3 Définition du produit

La phase de définition du produit est une étape cruciale dans le processus de design d'ingénierie. Elle permet de capturer les besoins du client, et de traduire la « voix du client » en objectifs techniques du produit. Les éléments clés de cette phase sont : (Figure 6)

- L'identification des besoins de clients.
- L'expression des besoins de clients en fonctionnalités du produit.
- L'évaluation de la compétition.
- La génération des spécifications du produit.
- L'identification des spécifications cibles du produit.

Ces étapes seront explicitées dans ce qui suit.

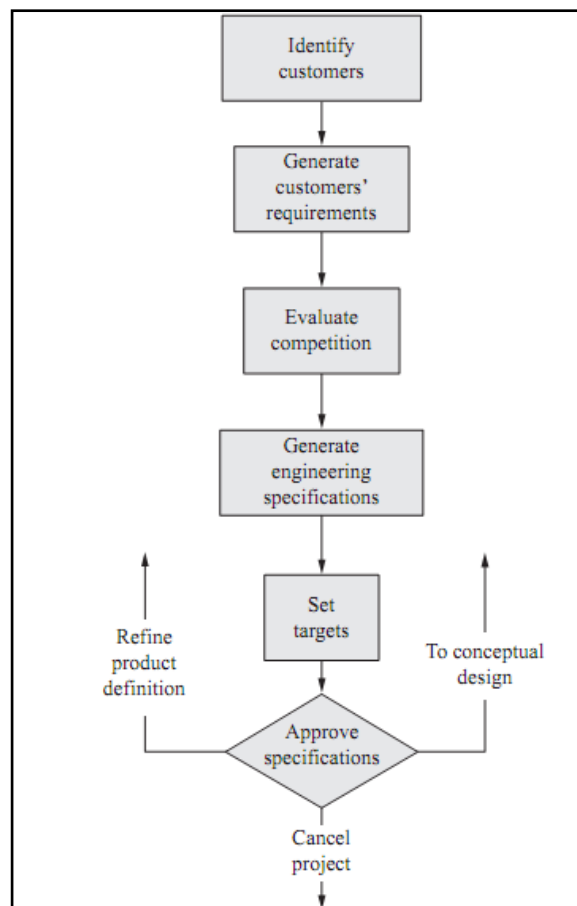


Figure 6: Etapes clés de la phase de définition du produit (Ulrich and Eppinger 2008)

III-3 -1 Identification des besoins du client:

La compréhension d'un problème de design est le fondement essentiel pour le design d'un produit de qualité. La « compréhension d'un problème de design » signifie la traduction des exigences des clients en une description technique des besoins auxquels on doit répondre.

Le fait d'identifier le vrai besoin du client est une tâche qui n'est pas évidente. Les études ont montré qu'une définition floue du produit est un facteur qui explique 80% des échecs des produits dans le marché. De ce fait, trouver le « bon » problème à résoudre peut paraître à priori comme une tâche facile, alors que ce n'est pas du tout le cas.

Les besoins sont généralement indépendants du produit à développer; ils ne sont pas spécifiques au concept qui peut être éventuellement développé. Une équipe doit être capable d'identifier les besoins des clients sans savoir comment répondre à ces besoins. D'autre part, les spécifications dépendent du concept à sélectionner. Les spécifications du produit qu'on choisit finalement de développer dépendront de la faisabilité technique et économique, de l'offre des compétiteurs sur le marché, ainsi que des besoins des clients.

L'identification des besoins des clients est en elle même un processus' généralement constitué de 5 étapes:

- **Etape 1 :** Collecter les données brutes des clients: La collecte des données implique le contact avec les clients et l'expérience avec l'environnement d'utilisation du produit. Trois méthodes peuvent être utilisées:

- *L'interview* est possiblement la méthode la plus utilisée lorsqu'il s'agit d'identifier les désirs des clients. L'interview se conduit en demandant aux personnes de décrire des produits existants, de décrire de quelle façon elles les utilisent et de préciser quels sont les besoins qui ne sont pas rencontrés dans de tels produits. L'interviewer essaie d'approfondir et de disséquer les points qui demandent clarification, ou encore questionne les besoins qui ne sont pas verbalisés.
- Le focus groupe rassemble habituellement 6 à 8 personnes à qui on demande de parler de leurs besoins relatifs à un produit donné. L'entrevue de groupe a ses avantages particuliers. Les commentaires exprimés par une personne risquent d'entraîner d'autres commentaires de la part des autres personnes présentes; c'est l'effet de synergie de groupe.

- L'observation d'un produit en utilisation: Observer des clients en train d'utiliser un produit existant ou en train de réaliser une tâche pour laquelle le produit est conçu peut révéler d'importants détails à propos des besoins de clients. Procter & Gamble par exemple observe des milliers de clients chaque année dans leurs maisons ou lieux de travail pour comprendre mieux leurs besoins.

- **Etape 2 :** Interpréter les données brutes en termes de besoins de clients: Les besoins de clients sont exprimés comme des déclarations écrites, et sont le résultat de l'interprétation du besoin à partir des données brutes collectées des clients. Chaque déclaration ou observation peut être traduite en un certain nombre de besoins de clients.

- **Etape 3 :** Organiser les besoins et les hiérarchiser (primaires, secondaires et tertiaires), et ce par:

- **Par le diagramme des affinités:**

Chaque idée est inscrite sur une fiche. Les fiches sont mélangées et affichées sur un mur, un tableau, etc., et l'objectif est de regrouper les fiches par affinité. La figure 7 montre une partie d'un diagramme d'affinité des attentes clients d'une porte d'automobile.

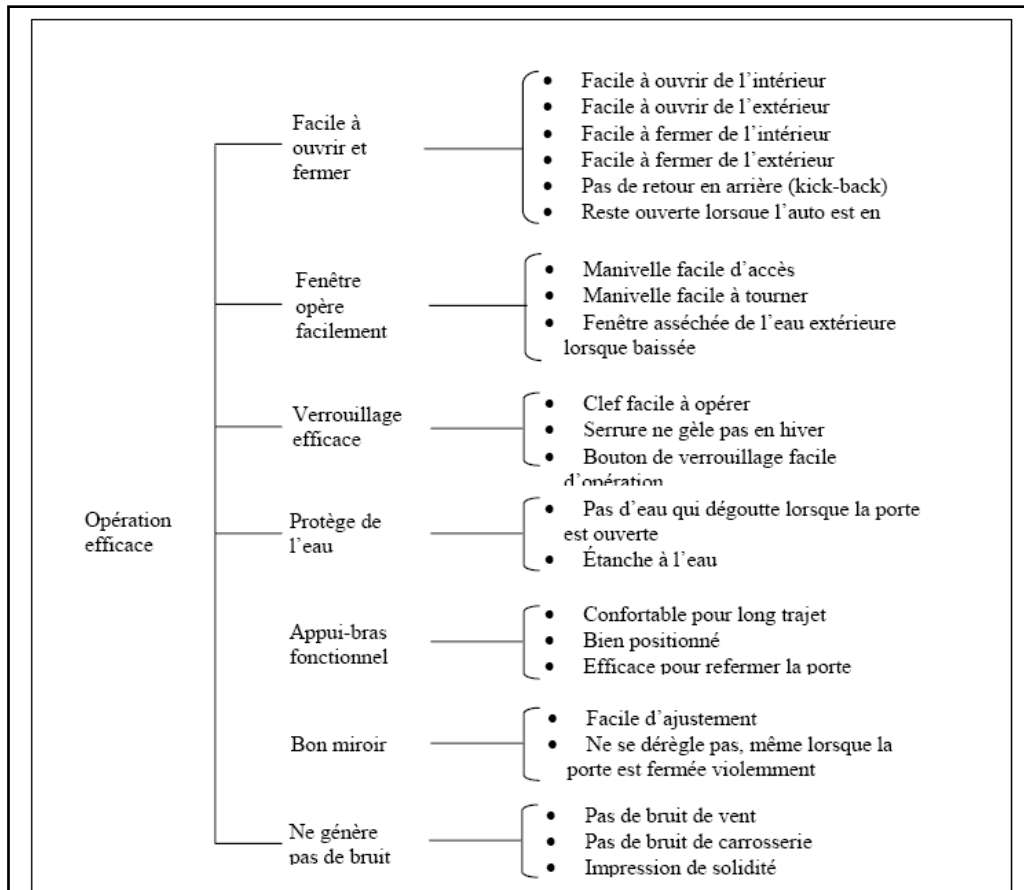


Figure 7 : Partie d'un diagramme d'affinité des attentes de clients d'une porte d'automobile (Hauser et Clausing 1988)

➤ Par le modèle de KANO :

Le professeur Kano, un japonais, a établi un modèle sur les attentes de clients (Figure 8).

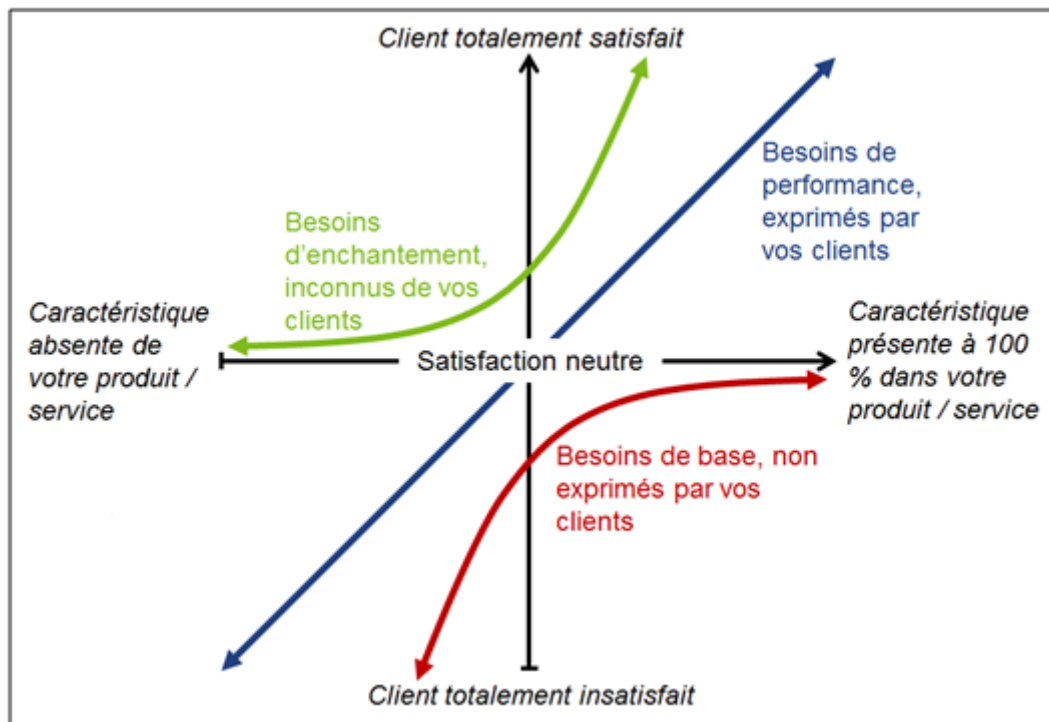


Figure 8 : Modèle de KANO sur les attentes de clients

- Au bas du diagramme, nous avons les attentes non exprimées (attentes de base). Ce sont des attentes qui ne seront habituellement pas validées par les personnes qui sont questionnées pour la simple raison que ces personnes présumant que ces attentes sont normales et doivent nécessairement être intégrées dans le produit. Par exemple, les personnes vont rarement mentionner la question de sécurité d'une automobile comme attente parce qu'elles présumant qu'une automobile doit nécessairement être sécuritaire.
- Les attentes représentées par la ligne droite en diagonale qui passe par le centre du diagramme sont des attentes de performance, et sont habituellement exprimées. Ces attentes sont aussi qualifiées d'unidimensionnelles parce qu'elles représentent ce que les clients vont spontanément verbaliser lorsqu'ils remplissent des questionnaires ou participent à des entrevues de groupe en développement de produits.
- Le haut du diagramme représente les attentes d'excitation d'un produit (excitement quality) dont les éléments peuvent être introduits dans un produit lors de la conception. Ces éléments d'excitation ne sont pas verbalisés par les clients parce qu'ils ne les connaissent pas.

III-3-2 Expression fonctionnelle du besoin :

Il est possible d'exprimer chacun des besoins d'un utilisateur sous forme de fonctions que devra réaliser ou respecter un produit (Figure 9). Cette façon de faire permet de mieux comprendre le besoin réel et, ensuite, de trouver une solution optimale répondant à ce besoin. Ceci évite de choisir la première solution se présentant à l'esprit et ainsi, favorise la recherche systématique de solutions originales et mieux adaptées.

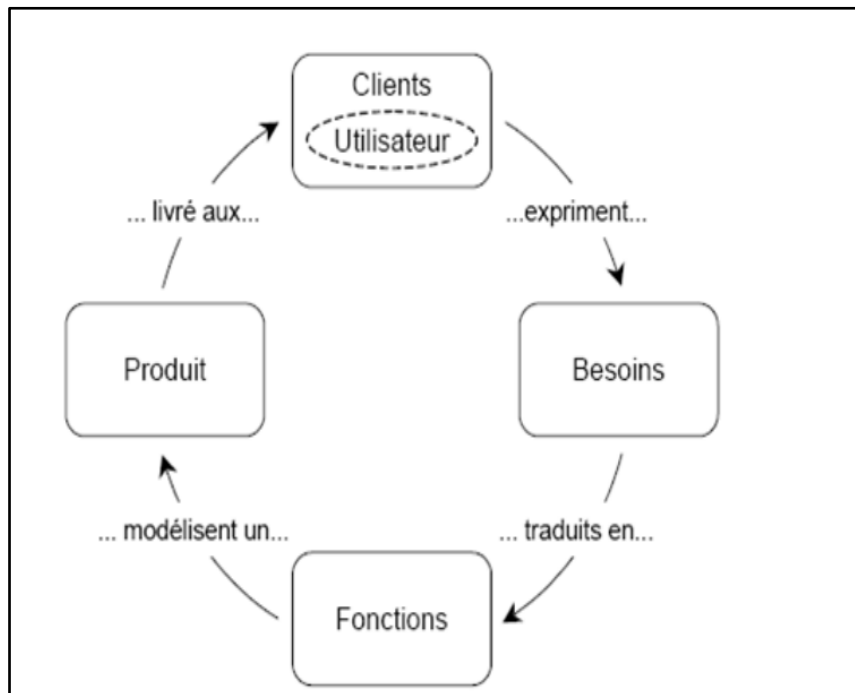


Figure 9 : Traduction des attentes clients en fonctions de produit

Pour réaliser une recherche exhaustive de toutes les fonctions, on peut compléter les fonctions déjà trouvées par l'utilisation d'autres méthodes comme la méthode RESEAU qui est une collection de plusieurs méthodes telles que la recherche intuitive, l'examen de l'environnement, la méthode SAFE (*Sequential Analysis Functional Element*), l'examen des efforts, l'analyse d'un produit de référence ou encore l'utilisation des normes et des règlements.

Par la suite, on peut ordonner les fonctions pour leur donner une structure logique qui nous permettra de décomposer le produit en sous systèmes et sous sous-systèmes. D'autre part, pour mieux appréhender « la voix du client » dans la suite du design, on peut hiérarchiser les fonctions qui caractérisent cette « voix du client ».

- Ordonner les fonctions :

La méthode de l'arbre fonctionnel est une approche simple et plutôt intuitive. Essentiellement, elle consiste à regrouper les fonctions par famille ou par système en vue de leur donner une structure logique. Selon cette méthode, il faut partir de la fonction la plus générale du produit pour aller vers les fonctions les plus spécifiques.

Une façon pratique de construire un arbre fonctionnel consiste à écrire sur des petits papiers toutes les fonctions résultant de l'étape précédente et à les disposer sur une table, à la vue des membres de l'équipe impliqués. Ensuite, il faut rechercher la fonction première du produit, sa raison d'être. Celle-ci sera placée le plus à gauche possible du support visuel utilisé. Enfin, en se posant la question *comment*, les fonctions de niveau immédiatement inférieur peuvent être repérées pour être ensuite placées à la droite de la fonction première. Le processus se poursuit ainsi jusqu'à ce que toutes les fonctions soient ordonnées (Figure 11).

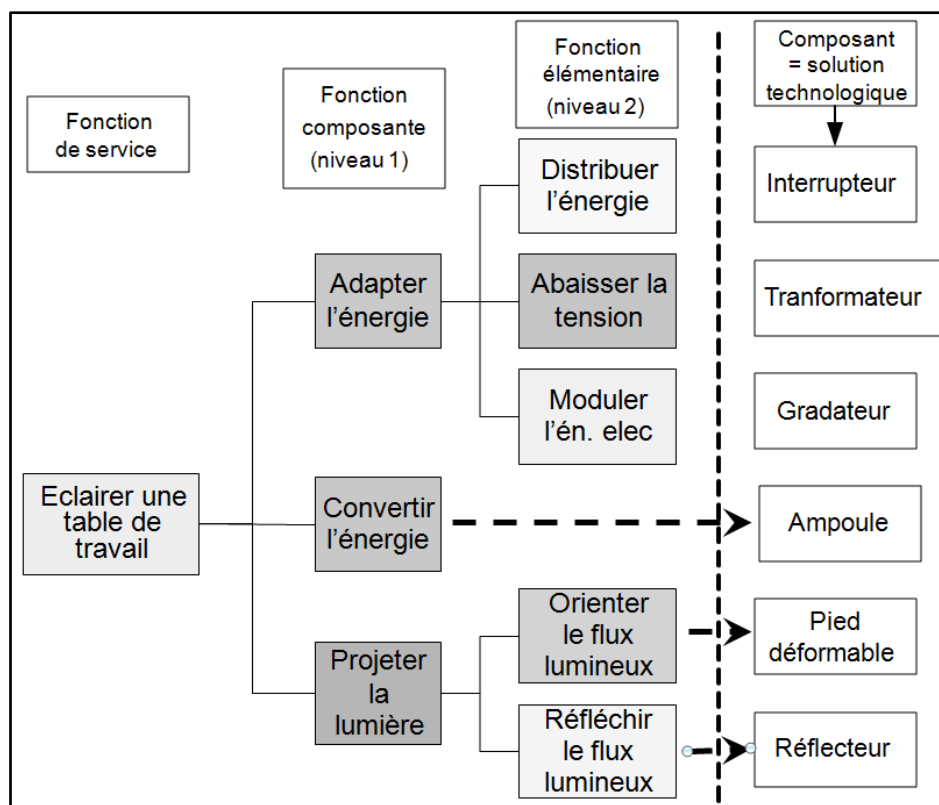


Figure 11 : Ordonnancement des fonctions selon la méthode de l'arbre fonctionnel

- Hiérarchiser les fonctions :

Dans une approche client, la hiérarchisation des fonctions est faite selon l'importance qu'accorde le client aux différentes fonctions. Il est alors souvent question de *pondération* des fonctions. Les fonctions de performance et les fonctions d'excitation sont pondérées

généralement avec une échelle entre 1 et 5, tandis que les fonctions de base et les fonctions contraintes ont une pondération 0.

III-3-3 Identification des spécifications du produit:

Les besoins de clients sont généralement exprimés en "langage du client". Cependant, si ces expressions aident à développer un sens clair des intérêts des clients, ils fournissent peu d'informations sur comment concevoir le produit. En effet ils laissent une large marge pour une interprétation subjective. Pour cette raison, les équipes de design et développement établissent souvent des spécifications qui détaillent ce que le produit est censé faire d'une manière précise et mesurable. Les spécifications de produit ne renseignent pas l'équipe sur comment répondre aux besoins des clients, mais représentent un compromis sur ce que l'équipe va tenter de réaliser pour satisfaire les besoins de clients.

Le terme "spécifications de produit" signifie une description précise de ce que le produit est censé faire. Quelques compagnies utilisent aussi les termes "exigences de produit" ou "caractéristiques d'ingénierie", d'autres utilisent les termes "spécifications" ou "spécifications techniques" pour se référer aux variables de design. Pour un système de suspension par exemple, ces variables peuvent être la viscosité de l'huile ou la raideur du ressort. Une spécification consiste en un critère et une valeur. Par exemple, "le temps moyen d'assemblage" est un critère, tandis que "moins de 75 secondes" est la valeur de ce critère. Les valeurs sont généralement caractérisées par des unités appropriées (secondes, kilogrammes, joules...).

La capacité à écrire les bonnes spécifications d'ingénierie est la preuve que l'équipe de design a bien compris le problème. Il existe plusieurs techniques pour générer les spécifications d'ingénierie et surtout pour identifier ceux qui sont critiques pour la réussite de la conception. La meilleure technique et la plus populaire pour générer les spécifications critiques reste la technique de Déploiement de la fonction qualité (Quality Function Deployment) ou QFD.

Le QFD (Annexe 1) est une méthode permettant de traduire de façon appropriée les attentes du consommateur en spécifications internes à l'entreprise tout au long du développement d'un produit, et permet de :

- Ecouter la voix du client.
- Développer les spécifications ou objectifs du produit.
- Identifier comment ces spécifications mesurent les désirs des clients.

- Déterminer à quel point les concurrents répondent aux désirs des clients.
- Développer des objectifs quantifiables sur lesquels il faudrait travailler.

III-4 Le design conceptuel

III-4-1 La génération de concepts

Un concept de produit est une description approximative de la technologie, de la forme ou du principe de fonctionnement d'un produit. C'est une description concise de la manière dont le produit va satisfaire les besoins des clients. Un concept est généralement exprimé sous la forme d'un schéma ou d'un modèle en 3D et est généralement accompagné d'une brève description textuelle.

Le processus de génération de concepts commence par une liste de besoins et une liste des spécifications cibles, et résulte en une liste de concepts de produits pour laquelle l'équipe de design fera une sélection finale. La technique utilisée à cette fin est la technique de la matrice morphologique. C'est une méthode puissante qui utilise les fonctions identifiées pour accélérer le processus de génération de concepts. Cette technique se réalise en 3 étapes :

- La 1^{ère} étape consiste à lister les fonctions qui doivent être satisfaites par le produit.
- La 2^{ème} étape consiste à trouver le maximum de concepts possibles qui peuvent être générées par chaque fonction identifiée dans la décomposition. La figure ci-dessous présente les différents concepts générés pour chaque fonction d'une bride de serrage. Par exemple, deux concepts sont proposés pour la fonction « Récupérer la force de préhension et le mouvement de l'utilisateur » ; le 1^{er} concept consiste à utiliser un seul déclencheur tandis que le 2^{ème} concept consiste à utiliser 2 déclencheurs afin d'utiliser la force et sa réaction pour permettre le serrage (Figure 20).

Morphology				
Product: One-handed bar clamp			Organization Name: Irwin Tools	
Subfunctions	Concept 1	Concept 2	Concept 3	Concept 4
Collect grip force and motion from user	One trigger 	Two triggers 		
Transform grip force and motion to bar	Jam plate 	Ratchet 	Rack and pinion 	Linkage
Move bar	Free sliding 	2 speed system 	> 2 speed system ?	
Amplify force	Short stroke 	Long stroke 		
Team Member: D/P		Team Member:		Prepared by: D/P
Team Member: A/Q		Team Member:		Checked by: A/Q
				Approved by:
The Mechanical Design Process Copyright 2008, McGraw-Hill			Designed by Professor David G. Ullman Form #15.0	

Figure 20 : Exemple d'une matrice morphologique de concepts individuels pour une bride de serrage (Ullman 2009)

- La 3^{ème} étape consiste à combiner les concepts individuels en concepts généraux qui répondront à toutes les exigences fonctionnelles. Il s'agit de sélectionner un seul concept pour chaque fonction et de combiner par la suite tous les concepts sélectionnés en un seul design. Toujours en considérant l'exemple précédent, on peut considérer la combinaison d'un seul déclencheur avec un cliquet dans le cadre d'un système de glissement libre avec une course courte (Figure 21).

Morphology				
Product: One-handed bar clamp			Organization Name: Irwin Tools	
Subfunctions	Concept 1	Concept 2	Concept 3	Concept 4
Collect grip force and motion from user	One trigger 	Two triggers 		
Transform grip force and motion to bar	Jam plate 	Ratchet 	Rack and pinion 	Linkage
Move bar	Free sliding 	2 speed system 	> 2 speed system ?	
Amplify force	Short stroke 	Long stroke 		
Team Member: D/P		Team Member:		Prepared by: D/P
Team Member: A/Q		Team Member:		Checked by: A/Q
				Approved by:
The Mechanical Design Process Copyright 2008, McGraw-Hill			Designed by Professor David G. Ullman Form #15.0	

Figure 21: Exemple de combinaison de concepts individuels pour la génération de concepts généraux (Ullman 2009)

III-4-2 La sélection de concept

Généralement, chaque compagnie a sa propre culture de développement de produits, et il n'y a pas de nombre "correct" de concepts à sélectionner. Après avoir généré des concepts, la phase suivante à accomplir est de les évaluer. Cela consiste à comparer les alternatives de concepts entre eux en se basant sur les critères d'appréciation auxquels ils doivent répondre.

Les techniques utilisées aident à choisir, parmi tous les concepts globaux trouvés, celui qui sera mis de l'avant en priorité.

La méthode de la matrice de décision ou la méthode de Pugh, est une méthode simple qui a prouvé son efficacité pour comparer les alternatives de concepts. De plus, la méthode fournit une moyenne de points pour chaque concept relative aux autres concepts par sa capacité à satisfaire un certain critère. La comparaison des moyennes de points permet de cette manière d'avoir un aperçu des meilleures alternatives et des informations importantes pour la prise de décision.

On commence par préparer la matrice de Pugh en illustrant d'une part les critères importants tirés de la méthode QFD et les concepts générés par la méthode de la matrice morphologique d'autre part (Figure 22).

Critères	Concepts								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Coûts	■	■	+	◆	▽	▱	●	▲	●
Solidité									
Masse									
Facilité de fabrication									
Facilité d'assemblage									

Figure 22 : Préparation de la matrice de Pugh

L'étape suivante consiste à choisir un concept de référence appelé le DATUM ; un concept existant et le plus prometteur et à remplir la matrice d'évaluation en comparant les différents concepts avec le DATUM (Figure 23).

Concepts	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Critères									
Coût	+	-	+	+	-	+	DATUM	=	+
Solidité	+	=	+	=	+	=		+	+
Masse	-	+	=	+	+	-		-	=
Facilité de fabrication	-	+	+	+	=	-		+	-
Facilité d'assemblage	+	-	+	-	=	+		-	+

Le concept 1 est meilleur que la référence

Le concept 5 est plus coûteux que la référence

Le concept 8 a un coût semblable à la référence

Figure 23 : Comparaison des différents concepts avec le DATUM

La démarche à suivre consiste à :

- examiner les concepts et identifier leurs forces et faiblesses.
- identifier les concepts forts et tenter de les améliorer (Peut-on améliorer le concept ? Si oui, qu'arrivera-t-il ? Est-ce un nouveau concept ?)
- identifier les concepts faibles et tenter de les améliorer ou s'en inspirer.
- éliminer de la matrice les concepts faibles

À la fin de cette 1^{ère} phase, on aura : identifié les concepts les plus forts et tenté d'améliorer ces derniers, donc créer de nouveaux concepts. Le processus est répété, par une série de convergence et divergence, jusqu'à l'obtention du concept ayant le plus grand potentiel.

III-5 Développement de produit :

III-5-1 Concrétisation du concept (embodiment design)

A ce niveau du processus de design, l'équipe de design commence la concrétisation du concept en présentant des informations à travers la schématisation du concept. Ces schémas sont par la suite transformées en dessins de produit (Figure 24). Cette phase consiste à :

- Identifier toutes les données spatiales (faire un dessin d'ensemble)
- Pour chacun des systèmes, identifier les composantes et valider le choix
- Identifier et préciser les interfaces
- Identifier les matériaux et les procédés
- Faire des dessins de détails et d'assemblage
- Valider le dimensionnement par analyse (simulations d'ingénierie)
 - structure, fluide, transfert thermique
 - choix de géométrie, matériaux et procédés

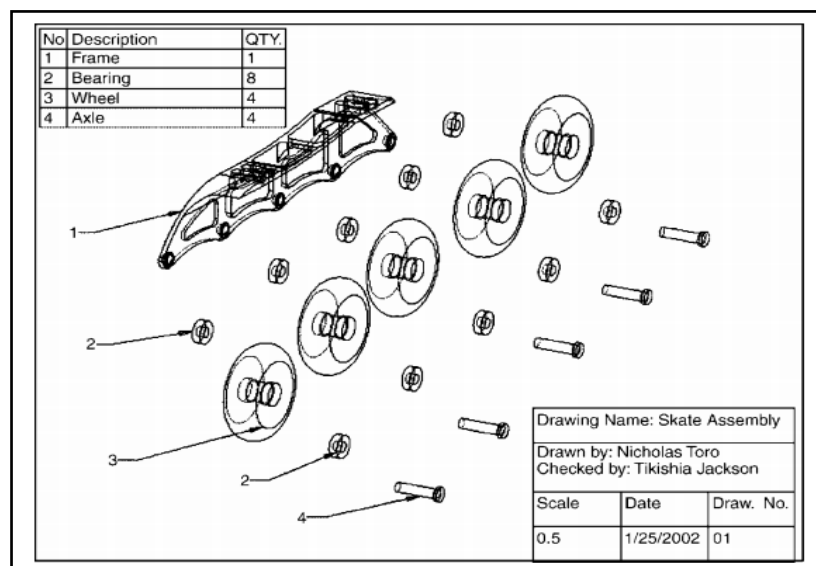


Figure 24 : Dessin de produit d'un concept retenu

III-5-2 Le design détaillé

Cette phase est une phase d'analyse et de simulation, où le designer sélectionne les matériaux appropriés pour chaque élément du produit et calcule les dimensions et les tolérances du

produit. Ce processus peut inclure si nécessaire un calcul de certains paramètres, comme les forces, les charges, la température, la pression, la dynamique du fluide, le courant électrique, les résistances, les réactions chimiques, etc. Le designer peut aussi appliquer un facteur de sécurité approprié au design pour s'assurer que les exigences minimales de la non défaillance du produit sont incluses dans les limites du design.

Le processus du design détaillé consiste à :

- Valider le dimensionnement (analyse et tests)
- finaliser le dessin
- Construire un prototype complet (valider la robustesse de la conception et les performances)
- Documenter la conception
- Finaliser le plan de fabrication

III-5-3 Pré-production

Dans cette dernière phase, l'équipe de design fait appel aux méthodologies de gestion de production pour établir les paramètres de production et lancer une première présérie pour tester la chaîne de production.

III-6 Conclusions:

Ce chapitre aspire à donner au lecteur une vue globale autour du processus de développement de produits innovants, en particulier en ingénierie mécanique. Devant une grande variété de processus de développement de produits existants dans la littérature, nous avons pensé à proposer un processus rationnel qui est plus proche du processus utilisé en pratique dans les industries.

Le processus de développement de produits est mieux appliqué lorsque des méthodes structurées sont utilisées. Dans le processus proposé, une variété de méthodes rationnelles et bien structurées est proposée. Ces méthodes peuvent être appliquées pour une variété de produits allant d'équipements industriels à des produits de consommation. Finalement, nous tenons à souligner que le cadre de ce processus proposé va être utilisé dans les différents travaux de cette thèse.

CHAPITRE IV

**CADRE RATIONNEL POUR LE DEVELOPPEMENT
DES PROJETS DE DEVELOPPEMENT DE PRODUITS
CIBLANT LES COMPETENCES D'INNOVATION**

IV-1 Introduction

Les problèmes peuvent être très difficiles à résoudre lorsque la problématique est la seule à être connue et que les étapes de résolution du problème ne sont pas connues. En effet, graduer des ingénieurs compétents capables d'innover dans un contexte de pays émergents ou en voie de développement est un problème complexe dont la résolution n'est pas aussi évidente. Il faudrait commencer par éclaircir le problème, définir ses différents paramètres, ses contraintes et ses critères avant de commencer sa résolution. Dans ce cas, un processus adéquat de résolution de problèmes s'impose, un processus qui ne doit être ni aléatoire ni arbitraire. De même, l'approche qui doit être utilisée doit être créative puisqu'elle implique le développement de quelque chose de nouveau.

Nos acquis du processus de design présentés dans les deux chapitres précédents, nous ont permis d'entrevoir que l'utilisation d'un processus de design pour la résolution de notre problème est la meilleure stratégie. En effet, le processus de design est une approche systématique de résolution de problèmes qui prend en compte des critères et des contraintes, et qui est utilisée pour développer plusieurs solutions possibles pour satisfaire un besoin ou résoudre un problème complexe. Ainsi, le processus de design est le plus pratique à utiliser dans notre cas, puisque le problème et le besoin sont perceptibles, que la solution n'est pas prédéterminée, et que finalement plusieurs solutions viables peuvent être plausibles.

D'autre part, si nous voulons graduer des ingénieurs compétents qui maîtrisent le processus de design et qui l'utilisent pour concevoir des produits innovants, il faut que nous-mêmes utilisons nos connaissances en processus de design et développement de produits pour résoudre ce problème complexe et développer par conséquent une solution innovante.

Ainsi, l'objectif de ce chapitre est de développer une solution innovante pour résoudre la problématique soulevée dans le 1^{er} chapitre, et qui va permettre d'améliorer la capacité d'innover des étudiants en ingénierie et par conséquent graduer des ingénieurs compétents capables d'innover. Dans ce qui suit, nous présentons une application du processus de design pour la conception d'un cadre rationnel pour l'amélioration des compétences d'innovation des étudiants en ingénierie mécanique.

IV-2 Application de l'approche design pour la conception du cadre rationnel

IV-2-1 Analyse des besoins

Comme nous l'avons présenté sur le chapitre II, les organisations comme ABET, ENAEE, EngC ainsi que l'initiative CDIO ; ont établi différents critères qui aspirent à faire acquérir aux étudiants ingénieurs les compétences nécessaires pour être innovants. Ces critères donnent un aperçu sur ce que les étudiants sont censés connaître et être capables de faire à la fin de leur cursus d'ingénierie. En examinant les critères de ces organisations, on peut voir que pour être de futurs ingénieurs compétents, les étudiants doivent acquérir tout au long de leur cursus d'ingénierie trois grands types de compétences : des connaissances, des habiletés, et des attitudes.

Afin de bien définir le besoin, nous nous sommes inspirés de ces critères pour définir les objectifs. Nous sommes partis du besoin principal qui est celui de graduer des ingénieurs compétents capables d'innover, et nous nous sommes intéressés aux objectifs à réaliser pour répondre à ce besoin. Des deux chapitres précédents, nous avons pu souligner le lien étroit qui existe entre l'innovation et le design d'ingénierie ; un ingénieur compétent capable d'innover est un ingénieur capable de développer des produits innovants, donc d'utiliser efficacement le processus de design et de développement de produits. Il doit donc connaître efficacement le processus de design et développement de produits, il doit être capable de l'appliquer et par conséquent doit avoir les compétences nécessaires relatives à la pratique du design, et finalement il doit posséder des attitudes au niveau personnel pour se comporter efficacement tout au long de ce processus.

Par analogie avec les trois grands types de compétences définis par les critères des différentes organisations, nous définissons la capacité d'innover d'un ingénieur comme l'intersection de 3 grandes classes : les connaissances en design et développement de produits, les compétences relatives à la pratique du processus de design et développement de produit, ainsi que les compétences personnelles et interpersonnelles (Figure 25). Ainsi, le besoin sera satisfait si des solutions pour développer chacune des trois classes de compétences sont proposées.

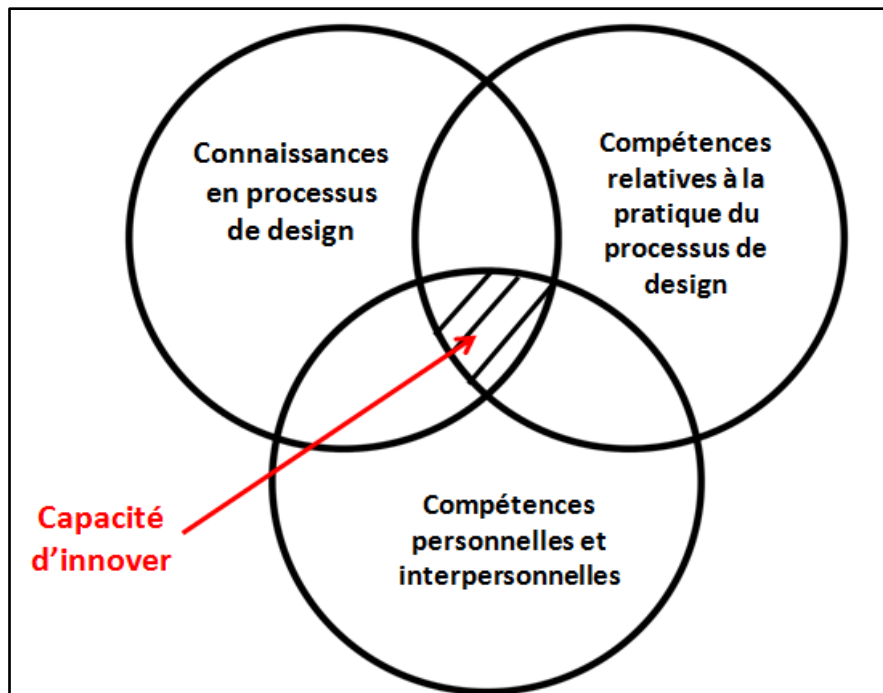


Figure 25 : Définition de la capacité d'innover selon notre perspective [Source : Notre recherche]

IV-2-2 Analyse fonctionnelle

IV-2-2-1 Recherche de fonctions (Exigences)

Après avoir identifié les besoins dans la partie précédente, il est temps maintenant d'utiliser une démarche qui permet de définir les caractéristiques de la solution qui va répondre et satisfaire ces besoins.

Ces caractéristiques sont les fonctions, et la démarche à utiliser est l'analyse fonctionnelle. Cette démarche va nous permettre d'effectuer un recensement des principales caractéristiques de la solution. On détermine donc, les fonctions principales, et puis les fonctions contraintes de la solution.

Les fonctions principales déterminent les actions attendues de la solution pour répondre à un élément du besoin, et peuvent être réparties en fonctions élémentaires, à savoir les fonctions secondaires, tertiaires et quaternaires.

Les fonctions contraintes représentent les conditions qui doivent être impérativement vérifiées par la solution sans qu'elles ne soient sa raison particulière d'être.

La figure 26 montre une première traduction du besoin en fonction principale et fonction contrainte, de même qu'une première décomposition de la fonction principale en des sous éléments.

Pour graduer des ingénieurs compétents capables d'innover, il faut développer chez les étudiants les compétences relatives à l'innovation. Or, comme nous l'avons défini sur la Figure 25, la capacité d'innover est développée suite au développement des compétences relatives au design et développement de produits, ainsi qu'au développement de compétences personnelles et interpersonnelles. Une 2^{ème} décomposition de la fonction « Former de futurs designers » permet de relever deux autres fonctions secondaires, à savoir une fonction relative au développement des connaissances en design d'ingénierie, et une fonction liée au développement de compétences relatives à la pratique du processus de design. Ces deux fonctions seront par la suite décortiquées pour détailler ces connaissances et compétences.

Cependant, ce besoin ne pourra être résolu que si la solution satisfait les contraintes d'implémentation dans le contexte local de nos universités au Maroc. Cela nous mène à une première fonction contrainte que l'on va décortiquer aussi dans ce qui suit en utilisant la méthode des interacteurs (Figure 26).

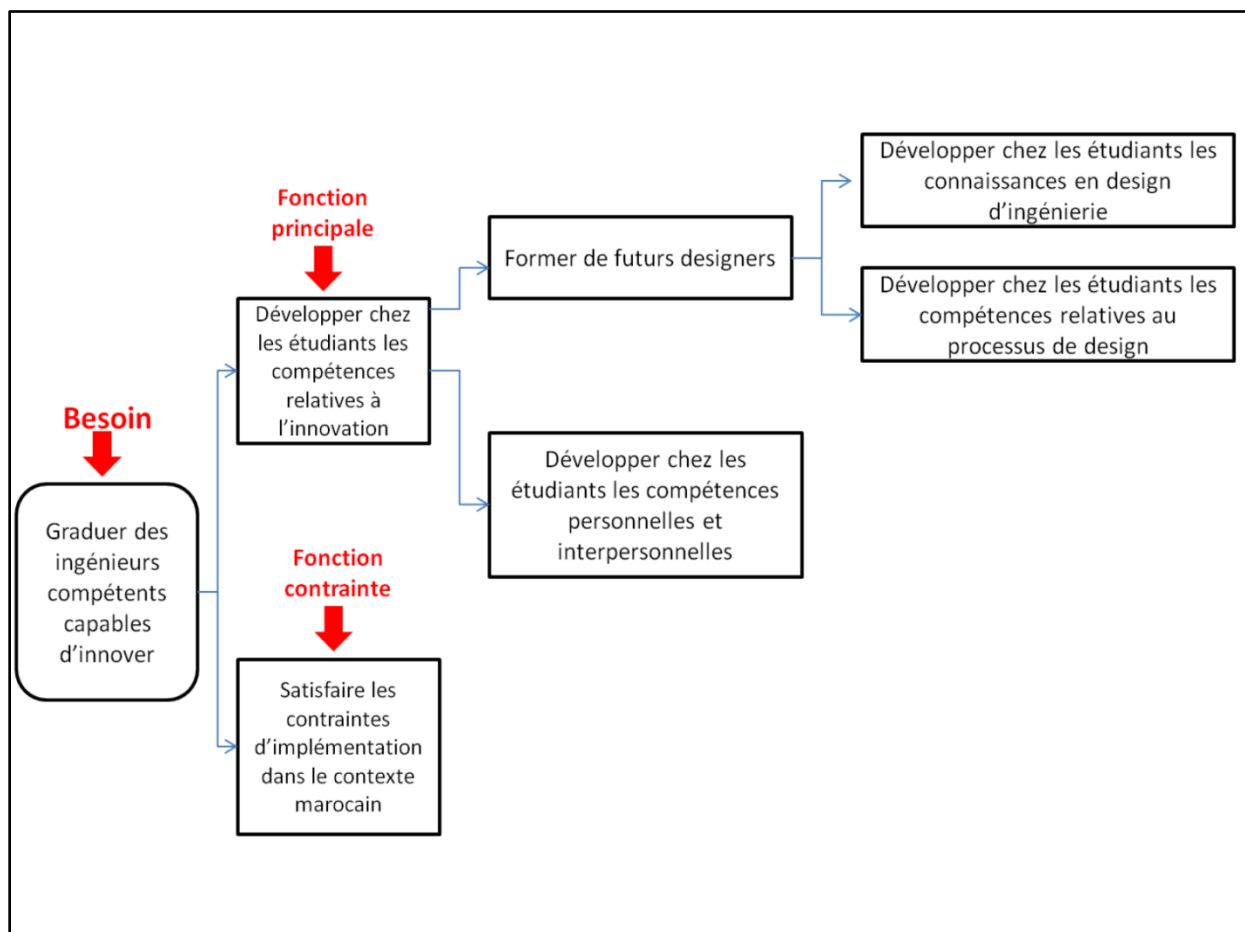


Figure 26 : Décomposition fonctionnelle du besoin [Source : Notre recherche]

➤ Fonctions principales :

Les exigences des organisations d'accréditation ont été notre point de départ pour rechercher les fonctions principales de notre solution.

Une présentation de ces compétences requises pour les ingénieurs a déjà été faite dans le chapitre II (Section II-2-1). La table 1 présentée dans cette section liste les principales compétences incluant connaissances, habiletés et attitudes requises pour les ingénieurs selon ABET, ENAEE, CEAB, et Engineers of Australia.

Pour que notre recherche de fonctions soit plus exhaustive, nous sommes allés voir du côté de l'alliance internationale d'ingénierie (*International engineering alliance*), de l'académie nationale d'ingénierie (*National Academy of Engineering NAE*), ainsi que des exigences de compagnies comme Boeing (Table 4).

Une analyse de chaque liste de compétences requises révèle qu'il existe un grand nombre d'entités communes entre elles. Cela inclut le design, la communication, le travail collaboratif, la compréhension et l'application des connaissances, l'apprentissage continu, l'éthique, la compréhension du contexte de la pratique d'ingénierie, la flexibilité, ainsi que la pensée créative et critique.

Table 4 : Principales compétences requises pour les ingénieurs par des organismes d'ingénierie

L'alliance internationale d'ingénierie	L'académie nationale d'ingénierie	Boeing
- Compréhension et application des connaissances	- Compétences analytiques	- Compréhension des fondamentaux des sciences d'ingénieur
- Analyse des problèmes	- Ingéniosité pratique	- Compréhension du processus de design et fabrication
- Design et développement de solutions	- Créativité	- Compréhension du contexte de la pratique d'ingénierie
- Gestion des activités d'ingénierie	- Communication	- Communication efficace
	- Compétences en business et management	
	- Leadership	

- Communication - Ethique et responsabilité - Apprentissage continu	- Professionnalisme - Dynamisme, agilité, résilience et flexibilité - Apprentissage continu	- Connaissance des normes éthiques - Pensée créative, critique et indépendante - Flexibilité et adaptation au changement - Curiosité et motivation pour un apprentissage continu - Travail collaboratif efficace
---	---	--

➤ Fonctions contraintes :

Lors de la conception d'un produit ou d'une solution, il est important de reconnaître et clarifier les contraintes qui peuvent entraver son implémentation. Par conséquent, le succès de la conception d'une solution ne dépend pas uniquement de la définition des besoins ou objectifs, mais dépend aussi de la clarification des contraintes.

Si la solution à concevoir doit répondre au besoin principal qui est celui de graduer des ingénieurs compétents capables d'innover, elle doit aussi être adaptée au contexte des pays émergents, et en particulier le Maroc. En effet, comme cela a été déjà signalé dans l'introduction, il existe plusieurs initiatives dans différentes universités à travers le monde et différentes approches qui aspirent à répondre à ce besoin en donnant les compétences nécessaires aux étudiants. Ce genre de pratiques pédagogiques a plusieurs avantages et peut fournir des résultats satisfaisants, cependant il ne peut être rigoureusement implémenté dans n'importe quel curriculum.

Pour cela, et dans le cadre de l'analyse fonctionnelle, nous avons fait appel au diagramme des interacteurs pour analyser l'environnement et les différents interacteurs qui conditionnent le développement et l'implémentation de la solution.

Nous présentons sur la figure 27 cinq types d'interacteurs, à savoir le curriculum, les ressources matérielles, les ressources humaines, les ressources financières, le temps et l'évaluation.

- **Le curriculum :**

La réforme d'un curriculum en entier est très lourde à réaliser ; elle prend beaucoup de temps, coûte très cher, a du mal à prendre effet à cause de l'inertie du système éducatif et de la résistance au changement, et ne garantit pas toujours de résultats meilleurs. C'est pour cela que la solution à implémenter ne doit pas avoir comme objectif de réformer et bousculer le curriculum, mais plutôt d'apporter un changement positif tout en gardant le même curriculum existant.

- **Les ressources financières :**

L'une des contraintes majeures dont il faut tenir compte est le coût de la solution. En effet, les universités des pays émergents ou en voie de développement ont des ressources financières très limitées. Par conséquent, la solution à développer ne doit pas être implémentée aux dépens des ressources financières de l'institution, ou du moins ne pas être très exigeante en termes de coûts.

- **Les ressources humaines :**

L'objectif de graduer des ingénieurs compétents capables d'innover a plusieurs parties prenantes. D'une part, le staff de l'institution doit être motivé et impliqué pour répondre à ce besoin, d'autre part les enseignants doivent avoir la possibilité d'implémenter la solution facilement sans pré-requis nécessaires. La 3^{ème} partie prenante de ce besoin sont les étudiants ; ils doivent avoir la possibilité de bénéficier des points forts de la solution dans un environnement motivant et agréable.

- **Le temps :**

La solution à implémenter doit être efficiente ; efficace en termes d'objectifs atteints, mais dans un minimum de temps possible.

- **L'évaluation**

La solution doit être conçue et implémentée de manière à rendre possible et facile son évaluation. L'évaluation systématique doit permettre d'avoir un feedback concernant son efficacité, et de vérifier si les étudiants ont effectivement développé la capacité d'innover.

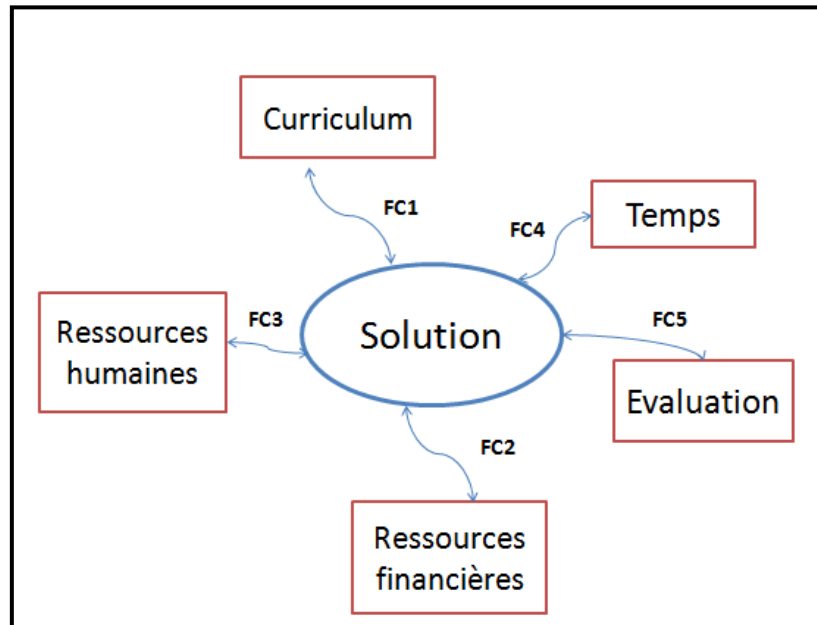


Figure 27 : Diagramme des interacteurs et fonctions contraintes [Source : Notre recherche]

De ce qui précède, nous relevons 5 fonctions contraintes, qu'il faudrait prendre en compte lors du développement de la solution, à savoir :

FC1 : Eviter l'inertie du système éducatif en étant implémentée comme une activité additionnelle à un curriculum existant.

FC2 : Etre économique.

FC3 : - Ne pas exiger des ressources humaines importantes

- Etre facile à implémenter par n'importe quel professeur, école d'ingénierie ou université.

- Etre implémentée dans un environnement agréable et motivant pour les étudiants.

FC4 : Etre implémentée dans un temps acceptable.

FC5 : Etre facile à évaluer et à améliorer d'une façon continue.

IV-2-2-2 Ordre de fonctions

Dans cette étape de l'analyse fonctionnelle, nous allons décortiquer chaque fonction en des fonctions élémentaires. L'objectif de cette décomposition est d'aboutir à des solutions pour

chaque fonction, et cela en posant la question « Comment cette fonction peut être réalisée ? ». Le retour de la fonction élémentaire vers la fonction principale se fait en posant la question « Pourquoi cette fonction doit être réalisée ? ». Il est important de vérifier à chaque étape que ce retour fait revenir au besoin principal qui est celui de graduer des ingénieurs compétents capables d'innover. Cet ordonnancement concerne les fonctions principales et les fonctions contraintes.

Pour les fonctions principales, la décomposition de fonctions va se faire pour chaque catégorie de compétences, à savoir les connaissances en design d'ingénierie, les compétences relatives à la pratique du processus d'ingénierie, ainsi que les compétences personnelles et interpersonnelles.

➤ Fonctions principales :

- Catégorie 1 : Les connaissances en design d'ingénierie

Fonction principale 1.1 : Faire acquérir aux étudiants les connaissances en découverte et planification de produit

Table 5 : Décomposition fonctionnelle de la fonction relative aux connaissances en découverte et planification de produit

Fonction principale relative à la compétence	Fonction élémentaire (1 ^{ère} décomposition)	Fonction élémentaire (2 ^{ème} décomposition)	Fonction élémentaire (3 ^{ème} décomposition)
 Comment ?			
 Pourquoi ?			
Faire acquérir aux étudiants les connaissances en découverte et planification de produit	Permettre aux étudiants d'identifier une opportunité de produit	Pousser les étudiants à générer une multitude d'opportunités	Demander aux étudiants de:
			- Lister les frustrations qui existent dans un domaine
			- Identifier leurs compétences pour en tirer des opportunités
			- Etudier les clients

			- Considérer les implications des nouvelles tendances (technologiques, sociales...)
			- Exploiter les autres innovations pour les imiter et les améliorer
		Appeler les étudiants à filtrer les opportunités	Demander aux étudiants d'utiliser des questionnaires et des techniques de vote auprès des clients
		Appeler les étudiants à sélectionner une opportunité potentielle	Introduire les étudiants aux critères de sélection d'opportunité (taille du marché, avantage compétitif, rentabilité...)
	Permettre aux étudiants d'effectuer un planning pour leur produit	Pousser les étudiants à faire une segmentation du marché	Introduire les étudiants aux méthodes de segmentation du marché
		Demander aux étudiants de lister les ressources nécessaires (matérielles, financières, humaines,...)	Introduire les étudiants au Business Model Canvas
		Demander aux étudiants de planifier le projet de développement de produit sur une échelle de temps	Introduire les étudiants à la planification en gestion de projet (Charte de Gantt,...)

		Demander aux étudiants de faire un énoncé du produit	Demander aux étudiants de : -décrire la vision du produit - expliquer les objectifs clés du produit - lister les segments de marché visés - poser les hypothèses et les contraintes
--	--	--	---

Fonction principale 1.2 : Faire acquérir aux étudiants les connaissances en définition de produit

Table 6 : Décomposition fonctionnelle de la fonction relative aux connaissances en définition de produit

Fonction principale relative à la compétence	Fonction élémentaire (1^{ère} décomposition)	Fonction élémentaire (2^{ème} décomposition)	Fonction élémentaire (3^{ème} décomposition)
 Comment ?			
 Pourquoi ?			
Faire acquérir aux étudiants les connaissances en définition de produit	Introduire les étudiants à l'identification et l'analyse des besoins de clients	Guider les étudiants à travers la collecte des données des clients	Initier les étudiants aux méthodes d'interview, focus groupe, et l'observation d'un produit en utilisation
		Pousser les étudiants à écrire les besoins des clients	Guider les étudiants à travers l'interprétation des données en besoins de clients
		Demander aux étudiants d'organiser et classifier les besoins de clients	Introduire les étudiants à la méthode du diagramme des affinités et au modèle de KANO
	Introduire les étudiants à l'expression fonctionnelle du besoin	Introduire les étudiants à la recherche de fonctions	Introduire les étudiants aux méthodes de brainstorming,

	(Méthode d'analyse fonctionnelle)	Initier les étudiants à la caractérisation des fonctions	Introduire les étudiants aux critères d'appréciation, niveaux et flexibilités
		Initier les étudiants à la hiérarchisation des fonctions	Demander aux étudiants de classifier et pondérer les fonctions
		Initier les étudiants à la valorisation des fonctions	
	Introduire les étudiants à l'identification des spécifications du produit	Introduire les étudiants à la méthode QFD	Introduire les étudiants à : - relations entre les fonctions et critères - interrelations entre les différents critères - sondage comparatif des concurrents - évaluation comparative par rapport à la concurrence
		Guider les étudiants à travers l'analyse de la matrice QFD	Guider les étudiants à travers la sélection des critères de conception les plus importants

Fonction principale 1.3 : Faire acquérir aux étudiants les connaissances en design conceptuel

Table 7 : Décomposition fonctionnelle de la fonction relative aux connaissances en design conceptuel

Fonction principale relative à la compétence	Fonction élémentaire (1 ^{ère} décomposition)	Fonction élémentaire (2 ^{ème} décomposition)	Fonction élémentaire (3 ^{ème} décomposition)
 Comment ?			
 Pourquoi ?			
Faire acquérir aux étudiants les connaissances en design conceptuel	Introduire les étudiants à la génération de concepts de produits	Guider les étudiants à travers la génération de sous-concepts pour chaque fonction	Introduire les étudiants aux techniques de brainstorming
		Guider les étudiants à travers la construction de la matrice morphologique	Introduire les étudiants au « <i>sketching</i> » (schématisation des concepts)
		Guider les étudiants à travers la combinaison des sous-concepts pour l'élaboration de concepts globaux	
	Introduire les étudiants à la sélection de concept final du produit	Guider les étudiants à travers l'évaluation des concepts générés	Introduire les étudiants aux techniques d'évaluation de concepts et prise de décision

Fonction principale 1.4 : Faire acquérir aux étudiants les connaissances en développement du produit

Table 8 : Décomposition fonctionnelle de la fonction relative aux connaissances en développement de produits

Fonction principale relative à la compétence	Fonction élémentaire (1 ^{ère} décomposition)	Fonction élémentaire (2 ^{ème} décomposition)	Fonction élémentaire (3 ^{ème} décomposition)
 Comment ?			
 Pourquoi ?			

Faire acquérir aux étudiants les connaissances en développement du produit	Introduire les étudiants à la concrétisation du concept choisi	Guider les étudiants à travers les dessins d'assemblage	Introduire les étudiants aux logiciels de conception assistée par ordinateur
		Guider les étudiants à travers l'identification des matériaux à utiliser	Introduire les étudiants aux plateformes de sélection de matériaux
		Demander aux étudiants d'effectuer des simulations d'ingénierie	Introduire les étudiants au dimensionnement, choix de géométrie, et choix de matériaux
	Introduire les étudiants à la conception détaillée	Guider les étudiants à travers la validation du dimensionnement	Demander aux étudiants de faire des tests
		Guider les étudiants à travers la réalisation d'un prototype complet du produit	
		Guider les étudiants à travers la documentation de la conception	Demander aux étudiants de réaliser des rapports complets du processus de développement de produit

- Catégorie 2 : Les compétences relatives à la pratique du processus de design

Fonction principale 2.1 : Développer chez les étudiants les compétences en formulation de problème

Table 9: Décomposition fonctionnelle de la fonction relative aux compétences en formulation de problème

Fonction principale relative à la compétence	Fonction élémentaire (1^{ère} décomposition)	Fonction élémentaire (2^{ème} décomposition)	Fonction élémentaire (3^{ème} décomposition)
	 Comment ?		
	 Pourquoi ?		

Développer chez les étudiants les compétences en formulation de problème	Développer chez les étudiants la capacité à identifier les besoins de clients	Développer chez les étudiants la capacité d'identifier les segments de clients	Faire apprendre aux étudiants comment conduire des focus groupes, des interviews et des questionnaires, et remplir la matrice de sélection de clients
		Développer chez les étudiants la capacité de comprendre la nature des besoins des clients	Donner aux étudiants la possibilité de développer un sens d'empathie envers les clients
		Permettre aux étudiants de pratiquer le processus d'identification du besoin	Permettre aux étudiants de collecter des données des clients
			Permettre aux étudiants d'interpréter les données collectées
			Permettre aux étudiants d'hierarchiser les besoins par ordre d'importance
	Développer chez les étudiants la capacité de décomposer le problème en de petites unités gérables	Pousser les étudiants à faire une bonne décomposition fonctionnelle du problème	
	Développer chez les étudiants la capacité de traduire les besoins de clients en des spécifications techniques	Pousser les étudiants à établir les spécifications techniques de design	
		Pousser les étudiants à identifier les spécifications cibles	
	Développer chez les		

	étudiants la capacité de différencier entre les contraintes réelles et fictives		
--	---	--	--

Fonction principale 2.2 : Développer chez les étudiants les compétences en résolution de problèmes (Design conceptuel)

Table 10: Décomposition fonctionnelle de la fonction relative aux compétences en résolution de problèmes

Fonction principale relative à la compétence	Fonction élémentaire (1 ^{ère} décomposition)	Fonction élémentaire (2 ^{ème} décomposition)	Fonction élémentaire (3 ^{ème} décomposition)
 Comment ?			
 Pourquoi ?			
Développer chez les étudiants les compétences en résolution de problèmes (Design conceptuel)	Développer chez les étudiants des compétences en raisonnement divergent	Appeler les étudiants à générer plusieurs alternatives	
		Pousser les étudiants à restructurer et reformuler les problèmes	Demander aux étudiants d'explorer l'espace de design (grande variété de solutions)
		Pousser les étudiants à penser d'une manière non conventionnelle et générer des solutions inattendues	Demander aux étudiants d'éviter les fixations
		Pousser les étudiants à sortir de l'ordinaire	
		Demander aux étudiants de faire des connections, et de trouver des relations et des analogies	

		Pousser les étudiants à traiter des problèmes complexes	
		Pousser les étudiants à penser à un niveau détaillé	
	Développer chez les étudiants les compétences en raisonnement imaginatif	Pousser les étudiants à élargir l'espace de design (penser en dehors du cadre traditionnel)	Appeler les étudiants à prendre des risques
		Pousser les étudiants à proposer de la « nouveauté » dans la génération d'idées	Appeler les étudiants à être flexible et à laisser les options ouvertes
	Développer chez les étudiants les compétences en raisonnement visuel	Demander aux étudiants de réaliser des schémas et croquis à la main	
		Appeler les étudiants à utiliser les outils de dessin assisté par ordinateur	
	Développer chez les étudiants les compétences en raisonnement qualitatif (pensée abstraite verticale)	Développer chez les étudiants la capacité de passer des formules mathématiques abstraites aux relations qualitatives	Appeler les étudiants à simplifier les formules
		Développer chez les étudiants la capacité de travailler avec des données floues ou incomplètes	
		Développer chez les	

		étudiants la capacité de faire de bonnes hypothèses	
--	--	---	--

Fonction principale 2.3 : Développer chez les étudiants les compétences en analyse d'ingénierie et simulation

Table 11: Décomposition fonctionnelle de la fonction relative aux compétences en analyse d'ingénierie et simulation

Fonction principale relative à la compétence	Fonction élémentaire (1 ^{ère} décomposition)	Fonction élémentaire (2 ^{ème} décomposition)	Fonction élémentaire (3 ^{ème} décomposition)
 Comment ?			
 Pourquoi ?			
Développer chez les étudiants les compétences en analyse d'ingénierie et simulation	Développer chez les étudiants les compétences en raisonnement convergent (pensée quantitative verticale)	Développer chez les étudiants les compétences en prise de décision	Demander aux étudiants d'évaluer et sélectionner les alternatives de design
			Développer chez les étudiants la capacité de sélectionner les matériaux, les composants, etc.
			Appeler les étudiants à effectuer des calculs préliminaires de design
	Améliorer les compétences des étudiants en utilisation des outils d'ingénierie	Développer chez les étudiants la capacité d'effectuer une modélisation physique et analytique détaillée Permettre aux étudiants de pratiquer les outils d'ingénierie tout au long du processus de design	Permettre aux étudiants de pratiquer : - L'analyse cinématique - L'analyse dynamique - L'analyse

			d'assemblage - La modélisation par éléments finis
--	--	--	---

Fonction principale 2.4 : Développer chez les étudiants les compétences en fabrication

Table 12: Décomposition fonctionnelle de la fonction relative aux compétences en fabrication

Fonction principale relative à la compétence	Fonction élémentaire (1 ^{ère} décomposition)	Fonction élémentaire (2 ^{ème} décomposition)	Fonction élémentaire (3 ^{ème} décomposition)
 Comment ?			
 Pourquoi ?			
Développer chez les étudiants les compétences en fabrication	Développer chez étudiants la capacité de construire des prototypes	Guider les étudiants à travers le choix de matériaux	Introduire les étudiants aux outils de sélection et choix de matériaux
		Guider les étudiants à travers le choix de matériel	
		Guider les étudiants à travers le dimensionnement des pièces	
		Guider les étudiants à travers l'assemblage des pièces	
		Guider les étudiants à travers le test et l'évaluation du prototype	
	Appeler les étudiants à faire du prototypage itératif		

Fonction principale 2.5 : Développer chez les étudiants les compétences en communication de design

Table 13: Décomposition fonctionnelle de la fonction relative aux compétences en communication de design

Fonction principale relative à la compétence	Fonction élémentaire (1 ^{ère} décomposition)	Fonction élémentaire (2 ^{ème} décomposition)	Fonction élémentaire (3 ^{ème} décomposition)
 Comment ?			
 Pourquoi ?			
Développer chez les étudiants les compétences en communication de design	Développer chez les étudiants la capacité de « parler design »	Développer chez les étudiants la capacité de documenter proprement le design détaillé	Demander aux étudiants de rédiger des rapports détaillés incluant le design, les schémas et les dessins
		Développer chez les étudiants la capacité de communiquer le design aux autres (membres du groupe, clients, parties prenantes,...)	

- Catégorie 3 : Les compétences personnelles et interpersonnelles

Fonction principale 3.1 : Développer chez les étudiants les compétences en travail collaboratif

Table 14: Décomposition fonctionnelle de la fonction relative aux compétences en travail collaboratif

Fonction principale relative à la compétence	Fonction élémentaire (1 ^{ère} décomposition)	Fonction élémentaire (2 ^{ème} décomposition)	Fonction élémentaire (3 ^{ème} décomposition)
 Comment ?			
 Pourquoi ?			
	Appeler les étudiants à compléter des tâches individuelles d'une façon adéquate		

Développer chez les étudiants les compétences en travail collaboratif	Appeler les étudiants à collecter des informations appropriées	Pousser les étudiants à utiliser des techniques orales et visuelles pour collecter les informations	
		Pousser les étudiants à utiliser la documentation existante efficacement	
	Demander aux étudiants de mener une recherche lorsque c'est nécessaire.		
	Permettre aux étudiants de développer leurs compétences en communication	Permettre aux étudiants de s'exprimer clairement	
		Permettre aux étudiants d'introduire de nouvelles idées	
		Permettre aux étudiants d'exprimer des opinions d'une manière ouverte	
		Permettre aux étudiants d'écouter les avis des autres	
		Permettre aux étudiants d'utiliser des compétences de communication : écoute, prise de parole, et communication visuelle	
	Permettre aux étudiants de respecter les autres membres du groupe	Développer chez les étudiants la capacité de gérer et résoudre les	

		conflits	
	Permettre aux étudiants de distinguer entre ce qui est important et ce qui est trivial		
	Appeler chaque étudiant à comprendre son propre style de pensée et la manière dont cela affecte le travail d'équipe		
	Faire comprendre aux étudiants les différents rôles et leurs responsabilités dans une équipe		
	Pousser les étudiants à coopérer afin de construire une équipe efficace	Demander aux étudiants d'adopter les suggestions des autres membres lorsqu'elles sont appropriées	
		Appeler les étudiants à être parfaitement engagé pour atteindre les objectifs de l'équipe	
		Appeler les étudiants à sélectionner les membres de l'équipe en identifiant leurs forces	
	Demander aux étudiants de respecter les dates de réunions		
	Demander aux étudiants de fournir de		

	l'aide aux autres membres		
	Demander aux étudiants de solliciter de l'aide des autres membres		

Fonction principale 3.2 : Développer chez les étudiants les compétences en communication

Table 15: Décomposition fonctionnelle de la fonction relative aux compétences en communication

Fonction principale relative à la compétence	Fonction élémentaire (1^{ère} décomposition)	Fonction élémentaire (2^{ème} décomposition)	Fonction élémentaire (3^{ème} décomposition)
 Comment ?			
 Pourquoi ?			
Développer chez les étudiants les compétences en communication	Développer chez les étudiants les compétences en communication orale	Appeler les étudiants à présenter les informations de design dans des communications orales en groupe	
		Appeler les étudiants à communiquer oralement et par écrit avec l'équipe, le client et les autres parties prenantes	
		Pousser les étudiants à donner et recevoir des critiques constructives et des suggestions.	
	Développer chez les	Appeler les étudiants à enregistrer les objectifs de l'équipe, les idées, les données et d'autres	Pousser les étudiants à tenir un cahier de design incluant des rapports d'ingénierie,

	étudiants les compétences en communication écrite	informations dans un cahier de design individuel.	des réflexions, et des schémas
		Appeler les étudiants à produire des rapports techniques dans un style et format acceptables.	
	Développer chez les étudiants les aptitudes à l'écoute	Appeler les étudiants à écouter efficacement pour recevoir des informations précises.	Engager les étudiants dans des exercices d'écoute
	Développer chez les étudiants les compétences en communication visuelle	Permettre aux étudiants de communiquer en utilisant des dessins, des schémas et des croquis.	
	Développer chez les étudiants les compétences en communication interdisciplinaire	Appeler les étudiants d'identifier les opportunités entre l'ingénierie et les autres disciplines	
		Encourager les opportunités de projets entre les différents départements	
	Développer chez les étudiants les compétences en communication interculturelle	Encourager les opportunités de projet faisant intervenir des étudiants de différents niveaux et domaines	

Fonction principale 3.3 : Développer chez les étudiants les compétences en prise de décision

Table 16: Décomposition fonctionnelle de la fonction relative aux compétences en prise de décision

Fonction principale relative à la compétence	Fonction élémentaire (1 ^{ère} décomposition)	Fonction élémentaire (2 ^{ème} décomposition)	Fonction élémentaire (3 ^{ème} décomposition)
 Comment ?			
 Pourquoi ?			
Développer chez les étudiants les compétences en prise de décision	Développer chez les étudiants la capacité de faire appel à leur raisonnement pour prendre une décision	Pousser les étudiants à utiliser des techniques de matrices pour évaluer les solutions proposées et choisir la plus prometteuse	
		Pousser les étudiants à utiliser une approche itérative dans le processus de design pour une évaluation répétitive.	
	Développer chez les étudiants la capacité de faire appel à leur intuition pour prendre une décision	Encourager les étudiants à considérer les expériences passées	

Fonction principale 3.4 : Développer chez les étudiants les compétences personnelles

Table 17: Décomposition fonctionnelle de la fonction relative aux compétences personnelles

Fonction principale relative à la compétence	Fonction élémentaire (1 ^{ère} décomposition)	Fonction élémentaire (2 ^{ème} décomposition)	Fonction élémentaire (3 ^{ème} décomposition)
 Comment ?			
 Pourquoi ?			

Développer chez les étudiants les compétences personnelles	Développer chez les étudiants les compétences en créativité	Développer chez les étudiants la capacité de générer une variété de solutions qui sont à la fois nouvelles et faisables	Former les étudiants à la méthode brainstorming pour générer les idées
			Encourager les étudiants à penser d'une manière non conventionnelle
			Encourager les étudiants à utiliser des outils de prise de décision pour évaluer les risques potentiels et les éventuels échecs.
	Développer de bonnes attitudes chez les étudiants	Encourager les étudiants à supporter l'ambiguïté	
		Encourager les étudiants à accepter l'échec	
		Introduire les étudiants aux principes d'éthique et de responsabilité sociale	
		Introduire les étudiants à l'équité, la confiance, la loyauté et la conscience dans un contexte professionnel	
	Encourager les étudiants à l'apprentissage continu	Encourager les étudiants à rester au courant des dernières actualités dans le monde d'ingénierie	

➤ Fonctions contraintes :

Table 18: Décomposition fonctionnelle des fonctions contraintes

Fonction contrainte	Fonction élémentaire (1 ^{ère} décomposition)	Fonction élémentaire (2 ^{ème} décomposition)	Fonction élémentaire (3 ^{ème} décomposition)
 Comment ?			
 Pourquoi ?			
Eviter l'inertie du système éducatif	Ne pas bousculer le curriculum existant	Implémenter la solution comme une activité additionnelle à un curriculum existant.	
Etre économique	Ne pas trop exiger des ressources financières de l'institution		
Etre facile à implémenter dans n'importe quelle institution	Ne pas exiger des ressources humaines importantes		
	Etre simple à appréhender par n'importe quel enseignant motivé		
Etre appréciée par les étudiants	Etre implémentée dans un environnement agréable et motivant pour les étudiants		
Etre implémentée dans un temps acceptable			
Etre facile à évaluer et à améliorer d'une façon continue.	Intégrer des outils d'évaluation systématique		

IV-2-2-3 Caractérisation de fonctions

Après avoir ordonné les fonctions, il est temps maintenant de les caractériser. Cette étape va nous permettre de mesurer les fonctions et de s'assurer que les fonctions sont bien remplies.

La procédure consiste à poser la question : « Comment puis-je m'assurer que cette fonction est bien remplie ? »

Ceci nous permettra d'avoir un cadre d'évaluation systématique pour vérifier si les étudiants ont effectivement acquis les connaissances, les compétences et les attitudes requises.

Ces mesures vont nous permettre lors de l'implémentation de la solution de savoir à quel point les étudiants ont compris le processus de design et développement de produits innovants, et à quel point ils sont capables de l'appliquer. Lors de l'application de ce processus, les mesures d'évaluation vont nous permettre d'identifier les compétences relatives au design que les étudiants ont acquis, comme la capacité à formuler un problème de design et le résoudre. Finalement, ces mesures d'évaluation vont aussi nous permettre de savoir si les étudiants ont amélioré leurs compétences personnelles et interpersonnelles à travers le design et développement de produits innovants.

Ces critères d'appréciation vont finalement nous permettre de mesurer et « *quantifier* » la capacité des étudiants à innover.

➤ **Critères d'appréciation des fonctions relatives à la catégorie 1 (*Les connaissances en design d'ingénierie*)**

Table 19: Critères d'appréciation des fonctions relatives aux connaissances en design d'ingénierie

Fonction principale	Fonctions secondaires	Critères d'appréciation
Faire acquérir aux étudiants les connaissances en découverte et planification de produit	Permettre aux étudiants d'identifier une opportunité de produit	Nombre de blocs correctement remplis dans le canevas du business model
	Permettre aux étudiants d'effectuer un planning pour leur produit	- Efficacité des blocs « Ressources clés » et « Activités clés » du business model canevas. - Efficacité du diagramme de Gantt.
	Introduire les étudiants à l'identification et l'analyse des besoins de clients	Nombre de méthodes utilisées pour la capture des besoins de clients
		Nombre de besoins bien classifiés selon le modèle de KANO

Faire acquérir aux étudiants les connaissances en définition de produit	Introduire les étudiants à l'expression fonctionnelle du besoin (Méthode d'analyse fonctionnelle)	- Nombre de méthodes utilisées pour la recherche de fonctions
		- Nombre de fonctions générées
		- Bonne organisation des fonctions avec le diagramme de Gantt
	Introduire les étudiants à l'identification des spécifications du produit	- Nombre des critères d'appréciation
		- Justesse du choix des critères d'appréciation
		- Nombre de blocs correctement remplis dans la matrice QFD
Faire acquérir aux étudiants les connaissances en design conceptuel	Introduire les étudiants à la génération de concepts de produits	- Justesse de la matrice morphologique
		- Nombre de concepts générés
	Introduire les étudiants à la sélection de concept final du produit	- Bonne utilisation de la matrice de Pugh pour le choix du meilleur concept
Faire acquérir aux étudiants les connaissances en développement du produit	Introduire les étudiants à la concrétisation du concept choisi	- Qualité des prototypes virtuels
		- Justesse du dimensionnement et des calculs
		- Justesse du choix des matériaux
	Introduire les étudiants à la conception détaillée	- Bonne représentation du concept choisi
		- Qualité du prototype complet
		- Qualité des rapports de design

➤ **Critères d’appréciation des fonctions relatives à la catégorie 2 (*Les compétences relatives à la pratique du processus du design d’ingénierie*)**

Table 20: Critères d’appréciation des fonctions relatives aux compétences de la pratique du processus de design d’ingénierie

Fonction principale	Fonction secondaires	Critères d’appréciation
Développer chez les étudiants les compétences en formulation de problème	Développer chez les étudiants la capacité à identifier les besoins de clients	
	Développer chez les étudiants la capacité de décomposer le problème en de petites unités gérables	- Vérification de la décomposition fonctionnelle
	Développer chez les étudiants la capacité de traduire les besoins de clients en des spécifications techniques	
	Développer chez les étudiants la capacité de différencier entre les contraintes réelles et fictives	- Découverte du problème réel et qualité de son énoncé
Développer chez les étudiants les compétences en résolution de problèmes (Design conceptuel)	Développer chez les étudiants des compétences en raisonnement divergent	- Nombre d’idées générées
		- Variété des idées générées
		- Faisabilité des idées générées
	Développer chez les étudiants les compétences en raisonnement imaginatif	- Degré de particularité des idées générées (comparaison avec ce qui est habituel et connu)
	Développer chez les étudiants les compétences en raisonnement visuel	- Nombre de schémas et dessins réalisés
		- Nombre de prototypes virtuels réalisés
		- Qualité des dessins, schémas, et prototypes virtuels

	Développer chez les étudiants les compétences en raisonnement qualitatif (pensée abstraite verticale)	- Simplicité des formules utilisées
	Développer chez les étudiants les compétences en pensée convergente	- Exactitude et précision du concept choisi
Développer chez les étudiants les compétences en analyse d'ingénierie et simulation	Développer chez les étudiants la capacité d'effectuer une modélisation physique et analytique détaillée	
	Améliorer les compétences des étudiants en utilisation des outils d'ingénierie	- Qualité de l'analyse cinématique
		- Qualité de l'analyse dynamique
		- Qualité de l'assemblage sur le logiciel de CAD
		- Qualité du calcul de structures
Développer chez les étudiants les compétences en fabrication	Permettre aux étudiants de construire des prototypes	- Qualité du choix de matériaux
		- Qualité du choix de matériel
		- Exactitude et justesse du dimensionnement
		- Qualité de l'assemblage

➤ **Critères d'appréciation des fonctions relatives à la catégorie 3 (*Les compétences personnelles et interpersonnelles*)**

Table 21: Critères d'appréciation des fonctions relatives aux compétences personnelles et interpersonnelles

Fonction principale	Fonction secondaires	Critères d'appréciation
	Permettre aux étudiants de compléter des tâches individuelles d'une façon adéquate	

Développer chez les étudiants les compétences en travail collaboratif	Permettre aux étudiants de mener une recherche lorsque c'est nécessaire.	Résultats obtenus par la méthode d'évaluation par les pairs <i>(Peer assessment methodology)</i>
	Permettre aux étudiants de respecter les autres membres du groupe	
	Permettre aux étudiants de coopérer afin de construire une équipe efficace	
	Permettre aux étudiants de respecter les dates de réunions	
	Permettre aux étudiants de fournir de l'aide aux autres membres et solliciter la leur.	
Développer chez les étudiants les compétences en communication	Développer chez les étudiants les compétences en communication orale	- Qualité des présentations orales - Résultats obtenus par la méthode d'évaluation par les pairs
	Développer chez les étudiants les compétences en communication écrite	- Qualité du cahier de design tenu par les étudiants
		- Qualité des rapports élaborés
	Développer chez les étudiants les aptitudes à l'écoute	- Résultats obtenus par la méthode d'évaluation par les pairs
	Développer chez les étudiants les compétences en communication visuelle	- Qualité des dessins, schémas, et prototypes virtuels
	Développer chez les étudiants les compétences en communication interdisciplinaire et interculturelle	- Degré de synergie du groupe lors des présentations orales

Développer chez les étudiants les compétences en prise de décision	Développer chez les étudiants la capacité de faire appel à leur raisonnement pour prendre une décision	- Evaluation du raisonnement suivi lors du choix du concept final
Développer chez les étudiants les compétences personnelles	Développer chez les étudiants les compétences en créativité	- Nombre d'idées générées - Degré d'originalité et diversité des idées générées
	Développer de bonnes attitudes chez les étudiants	- Degré de motivation des étudiants

IV-3 Génération de concept : Le projet Enjoyeering

Dans le processus de design, la génération de concepts se fait en faisant les différentes combinaisons possibles entre les différentes solutions générées pour chaque fonction. Par la suite, le choix du meilleur concept se fait en s'appuyant sur des outils d'aide à la sélection tels que la matrice de Pugh présentée dans le chapitre précédent.

La 2^{ème} manière de faire les choses est de générer un premier concept en se basant sur les différentes fonctions générées ainsi que leurs critères d'appréciation, et de faire un premier prototype de ce concept. L'objectif par la suite est de tester ce premier concept, et de l'améliorer au fur et à mesure.

Devant un problème aussi flou, nous avons opté pour la 2^{ème} manière et nous avons préféré générer un premier concept de solution qui va être testé et agir en conséquence.

Le choix de cette manière est justifié pour deux raisons. La 1^{ère} est que les différentes compétences clés que doit acquérir l'étudiant ingénieur pour être innovant, sont des compétences qui sont longues à appréhender, et ne peuvent être acquises facilement et rapidement en se basant uniquement sur les solutions précédemment identifiées. La 2^{ème} raison est que ces compétences ne sont pas destinées à tous les niveaux du curriculum d'ingénierie, mais doivent être judicieusement affectées à chaque étape du curriculum.

Pour cela, nous avons pensé développer un projet qui :

- fait acquérir aux étudiants les compétences nécessaires tout au long de leur cursus d'ingénierie.
- adapte les compétences pour chaque niveau du curriculum.
- prend en compte les fonctions contraintes lors de son implémentation.
- est facile à prototyper et à itérer autant de fois que possible pour d'éventuelles améliorations.

Pour la conception du projet, nous avons commencé par classer les compétences en 2 types de compétences ; les compétences de base qui doivent être acquises dès les premiers niveaux du curriculum d'ingénierie, et les compétences approfondies en design et développement de produits qui doivent être acquises dans les derniers niveaux du curriculum.

➤ **Les compétences de base pour les premières années du curriculum d'ingénierie :**

Les premières années du curriculum d'ingénierie sont des années où l'étudiant est introduit à l'ingénierie et où il doit bâtir des fondements solides en design. L'étudiant doit comprendre les étapes majeures du processus de design et doit être capable de l'appliquer dans sa forme générale pour résoudre un problème donné. Il doit acquérir des compétences en créativité pour définir un problème flou, et générer des alternatives de solutions nouvelles qui sortent de l'ordinaire. Il doit développer la capacité d'appliquer les concepts de base appris dans les différents cours. Finalement, l'étudiant doit développer des compétences personnelles et interpersonnelles telles que la prise de décision, le travail d'équipe, et la communication écrite et orale.

La table 22 résume les différentes compétences qui doivent être acquises en premières années du curriculum d'ingénierie.

Table 22 : Principales compétences qui doivent être acquises dans les premières années du curriculum d'ingénierie

Niveau du curriculum d'ingénierie : Premières années		
Connaissances en processus de design	Compétences relatives au processus de design	Compétences personnelles et interpersonnelles
- Définition du problème - Génération de concepts - Sélection de concept - Prototypage	- Formulation du problème - Raisonnement divergent - Raisonnement imaginatif - Raisonnement visuel - Raisonnement qualitatif - Réalisation de prototypes	- Travail collaboratif - Communication orale et écrite - Communication visuelle - Prise de décision - Créativité

➤ **Les compétences approfondies pour les dernières années du curriculum d'ingénierie :**

Les dernières années du curriculum d'ingénierie doivent être des années où l'étudiant ingénieur doit appliquer ses connaissances et compétences en design acquises dans les années précédentes pour le développement de produits répondant à de vrais besoins de clients. Le processus de design et développement de produits doit alors être appliqué en utilisant les outils et méthodes approfondies pour développer des solutions innovantes. L'étudiant doit de même appliquer les concepts techniques appris tout au long de son cursus, principalement dans la phase de développement de produit. Finalement, l'étudiant ingénieur doit être capable de travailler aisément en groupe, de prendre les décisions adéquates, et de communiquer les informations de design aux autres membres de l'équipe ainsi qu'aux différentes parties prenantes du projet.

La table 22 résume les différentes compétences qui doivent être acquises en dernières années du curriculum d'ingénierie.

Table 23 : Principales compétences qui doivent être acquises dans les dernières années du curriculum d'ingénierie

Niveau du curriculum d'ingénierie : Dernières années		
Connaissances en processus de design	Compétences relatives au processus de design	Compétences personnelles et interpersonnelles
- Définition du besoin de client - Définition du produit et méthodes (e.g Analyse fonctionnelle / QFD) - Génération de concepts et méthodes (e.g Matrice morphologique) - Sélection de concept et méthodes (e.g Matrice de PUGH) - Analyse d'ingénierie et simulation (utilisation des outils d'ingénierie) - Prototypage (Choix de matériaux / Choix de matériel / Prototypage itératif)	- Formulation du problème - Raisonnement divergent et convergent - Raisonnement imaginatif - Raisonnement visuel - Raisonnement qualitatif - Réalisation de prototypes - (Choix de matériaux / Choix de matériel / Prototypage itératif) - Communication de design	- Travail collaboratif - Communication orale et écrite - Communication visuelle - Communication interdisciplinaire et interculturelle - Prise de décision - Créativité - Apprentissage continu

➤ Le projet *Enjoyeering* :

En se basant sur cette classification, nous avons conçu un premier concept de solution intitulé *Enjoyeering* (pour *Enjoy Engineering*, littéralement « *Apprécier l'ingénierie* »). *Enjoyeering* est un projet majeur d'acquisition de compétences en conception et innovation technologique destiné à la formation de génie mécanique et qui englobe différents sous-projets adaptés pour chaque niveau du curriculum d'ingénierie mécanique.

Pour les premières années du curriculum d'ingénierie, le projet *Enjoyeering* comprend deux projets (*Enjoyeering Freshman* et *Enjoyeering Junior*) qui introduisent les étudiants de 1^{ère} et 2^{ème} année aux problèmes réels d'ingénierie et au design, encouragent la résolution de problèmes et la créativité, et mettent les étudiants dans un environnement où ils peuvent développer des compétences en travail collaboratif et en communication. Ces projets ont pour objectif aussi d'appréhender d'une manière pratique les concepts théoriques appris dans les différents cours.

Pour les dernières années du curriculum d'ingénierie mécanique, le projet *Enjoyeering Senior* a pour but de renforcer les compétences des étudiants en développement de produits innovants à travers leur immersion dans des problèmes tirant leurs origines de besoins réels de clients. L'objectif est de pousser les étudiants à faire appel aux meilleures pratiques en développement de produits pour la réalisation d'un prototype tangible répondant au besoin identifié.

Ces projets sont conçus de telle manière à faire acquérir aux étudiants les compétences relatives au design incluant connaissances et habiletés, tout en respectant les critères d'appréciation présentés auparavant. En effet, les critères d'appréciation seront utilisés pour mesurer l'acquisition des différentes compétences. Les contraintes relevées précédemment sont à elles incluses dans la conception pour assurer une implémentation adaptée au contexte local.

Les différents projets *Enjoyeering*, leurs contenus, leurs implémentations dans la formation d'ingénierie mécanique ainsi que les résultats de leur implémentation, seront détaillés dans les chapitres 5, 6 et 7.

IV-4 Conclusions

Ce chapitre a été une tentative pour répondre à la problématique soulevée dans le 1^{er} chapitre, et qui est celle de graduer des ingénieurs compétents capables d'innover. Le processus de

design a été l'outil de base utilisé pour résoudre cette problématique. L'analyse des besoins a permis d'identifier trois grands types de compétences que les étudiants doivent développer pour améliorer leur capacité d'innovation, à savoir les connaissances en design et développement de produits, les compétences relatives au processus de design et développement de produit, ainsi que les compétences personnelles et interpersonnelles. L'analyse fonctionnelle a permis de faire un recensement des principales caractéristiques de la solution incluant les compétences à développer ainsi que les critères qui entravent l'implémentation de la solution comme le coût de la solution, les ressources humaines et l'inertie du curriculum. La décomposition fonctionnelle a permis d'aboutir à des premières propositions de solutions pour faire acquérir aux étudiants les différentes compétences alors que la caractérisation des fonctions a permis de déterminer les mesures pour évaluer l'acquisition de ces compétences.

A la suite de ces résultats, nous avons pu concevoir un premier concept de solution sous forme d'un projet intitulé *Enjoyeering* pour d'acquisition de compétences en conception et innovation technologique destiné à la formation de génie mécanique et qui englobe différents sous-projets adaptés pour chaque niveau du curriculum d'ingénierie mécanique. Les chapitres suivants auront pour objectif de discuter la conception de chaque sous-projet, son implémentation et ses principaux résultats obtenus.

CHAPITRE V

Conception et implémentation du projet :

Enjoyeering Freshman



V-1 Introduction

Pour préparer les étudiants de 1^{ère} année du 1^{er} cycle à leur cursus futur d'ingénierie, il est évident que les étudiants doivent être familiarisés précocement avec la philosophie du design. Une activité qui introduit très tôt les étudiants aux problèmes réels d'ingénierie et les initie aux expériences de design et développement de produits est importante pour que les étudiants acquièrent les compétences requises par le cadre de compétences présenté précédemment dans le chapitre IV.

L'objectif majeur de l'activité *Enjoyeering Freshman* est de créer un environnement intuitif qui permettra aux étudiants en 1^{ère} année du 1^{er} cycle d'appliquer les concepts de base de l'ingénierie tout en les expérimentant d'une manière créative et critique (Kojmane et Aboutajeddine 2016).

Pour réaliser cet objectif, le Design Thinking (Brown 2008) a été la méthodologie de base de laquelle nous nous sommes inspirés pour concevoir un processus personnalisé de design qui sera suivi par les étudiants tout au long de l'activité, et qui leur permettra d'atteindre les résultats désirés du cadre de compétences. Nous pensons fortement que le fait de donner aux étudiants l'opportunité de pratiquer un processus itératif du design en ingénierie peut réaliser cet objectif. En effet, plusieurs travaux ont montré que l'introduction des étudiants à un stage précoce au design thinking peut les aider à développer une confiance créative (*creative confidence*), et une capacité à résoudre les problèmes (Kwek 2011; Razzouk and Shute 2012).

V-2 Le projet *Enjoyeering Freshman*

Les étudiants en 1^{ère} année du 1^{er} cycle nouvellement inscrits à la Faculté sont tenus de concevoir, de la manière la plus créative, une application robotique de leur choix qui résout clairement un problème particulier et répond à un besoin humain ou social. Les étudiants doivent utiliser un processus personnalisé de design. Pour la réalisation de l'application robotique, les étudiants ont accès à une plateforme robotique ouverte et peu coûteuse : Lego Mindstorms NXT. A la fin de l'activité, les étudiants participent à une compétition finale afin de présenter leurs réalisations.

V-3 Processus personnalisé basé sur le design pour le projet *Enjoyeering Freshman*

Le design thinking est un protocole de résolution de problèmes qui aspire à apporter des solutions innovantes à différents problèmes. En particulier, le design thinking centré sur l'humain est un processus qui consiste à créer des produits et solutions qui répondent à un besoin humain, à travers la combinaison de l'empathie, la logique et la créativité (Brown 2008).

Le modèle HCD (Human-centered design), littéralement « le design centré sur l'humain », proposé par la compagnie IDEO (Oehlberg 2012) est défini comme suit :

« Le HCD aide à écouter les besoins de gens d'une nouvelle manière, créer des solutions innovantes pour répondre à ces besoins, et délivrer des solutions en gardant à l'esprit la viabilité financière. »

Plusieurs institutions académiques ont intégré le design thinking dans les curriculums d'ingénierie afin d'introduire précocement les étudiants au design, à la résolution de problèmes, et à la pensée critique (Goldman et al.2009 ; Khalaf 2013). Ces programmes se focalisent sur la préparation des étudiants à penser design, et à intégrer l'ingénierie, le business et la technologie dans leurs designs ; cependant ces programmes ne prennent pas en considération le facteur humain dans leur processus. Le modèle HCD peut dans ce cas être particulièrement bénéfique aux étudiants dans la mesure où il leur permet d'élargir leur perspective pour considérer non seulement la technologie dans leur design mais aussi les besoins de gens.

Le design centré sur l'humain est une approche créative pour la résolution de problèmes et le piédestal du travail fait au sein d'IDEO. La raison pour laquelle ce design est dit « *centré sur l'humain* », est qu'il commence principalement par les personnes pour lesquels le designer fait son design. Le processus du HCD commence par examiner les besoins des gens en essayant d'écouter et comprendre ce qu'ils veulent exactement. Il s'agit de construire une empathie profonde avec les gens pour lesquels on fait le design afin de leur procurer le produit ou solution qu'ils désirent. Cette première dimension du modèle HCD s'appelle la « *désirabilité* ». Une fois que le designer ait identifié ce qui est désirable, il commence à générer une grande multitude d'idées, construire une variété de prototypes, et partager la solution innovante avec tout le monde. Dans ce cas, il doit considérer deux autres dimensions du modèle HCD qui sont la « *faisabilité* » et la « *viabilité* » (Figure 28).

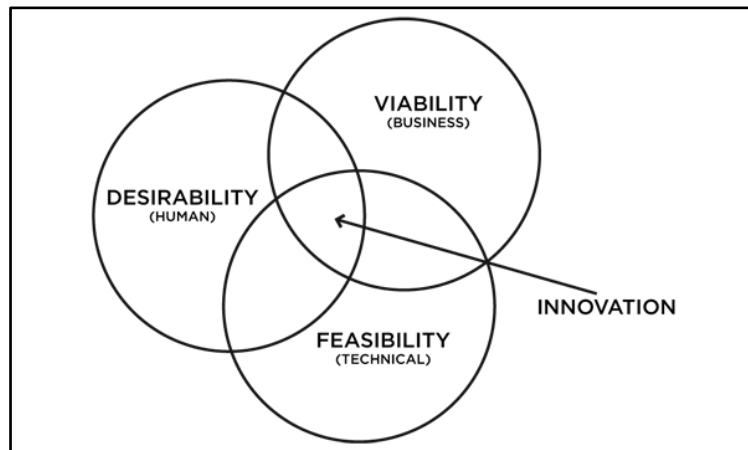


Figure 28 : Dimensions du modèle HCD

Le processus du design thinking consiste en 3 grandes phases, à savoir une phase d'Inspiration, une phase d'Idéation, et une phase d'Implémentation (Figure 29). Dans la phase d'inspiration, le designer essaye de collecter, comprendre et s'inspirer des problèmes et besoins sociétaux. Dans la phase d'idéation, le designer donne sens aux données qu'il a collectées ; il identifie des opportunités pour le design et fait le prototypage de solutions possibles. Et dans la phase d'implémentation, le designer donne vie à sa solution en la faisant sortir au marché.

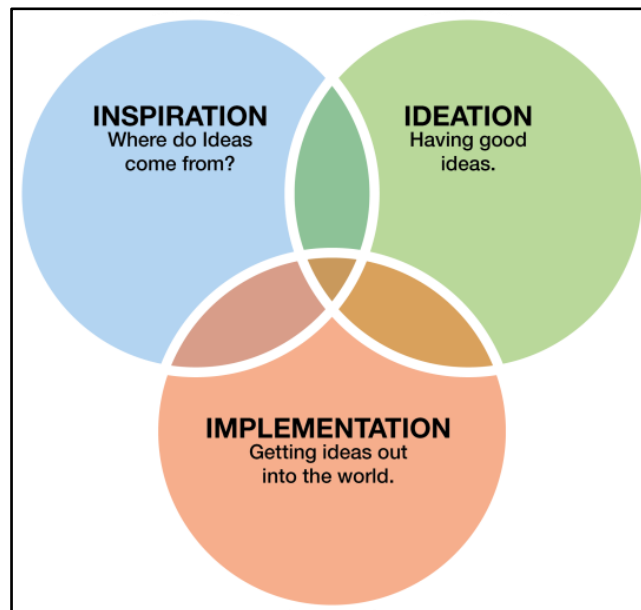


Figure 29 : Phases du modèle HCD

Dans le modèle du design centré sur l'humain, le processus est presque le même, sauf que les besoins et désirs des gens pour lesquels le designer fait le design sont gardés dans le cœur même du processus.

Le processus du design centré sur l'humain commence par spécifier un challenge de design et continue à travers 3 phases : *Hear* (Ecouter), *Create* (Créer), *Deliver* (Délivrer). Durant la phase « *Hear* », le designer ainsi que son équipe commencent par collecter les histoires pour s'en inspirer, et font une recherche dans le domaine. Dans la phase « *Create* », le designer travaille avec son équipe dans un workshop afin de traduire ces histoires en challenges, opportunités, solutions et prototypes. Dans cette phase, le designer passe d'une pensée concrète où il observe les gens à une pensée abstraite où il analyse ces observations et identifie les opportunités potentielles, et puis revient à une pensée concrète où il propose des solutions et des prototypes tangibles. Dans la phase « *Deliver* », le designer réalise ses solutions en faisant un planning d'implémentation et une modélisation des coûts, et s'apprête à lancer son produit.

En s'inspirant du processus de design thinking et du modèle HCD, nous avons conçu un processus personnalisé pour les étudiants de 1^{ère} année (Figure 30).

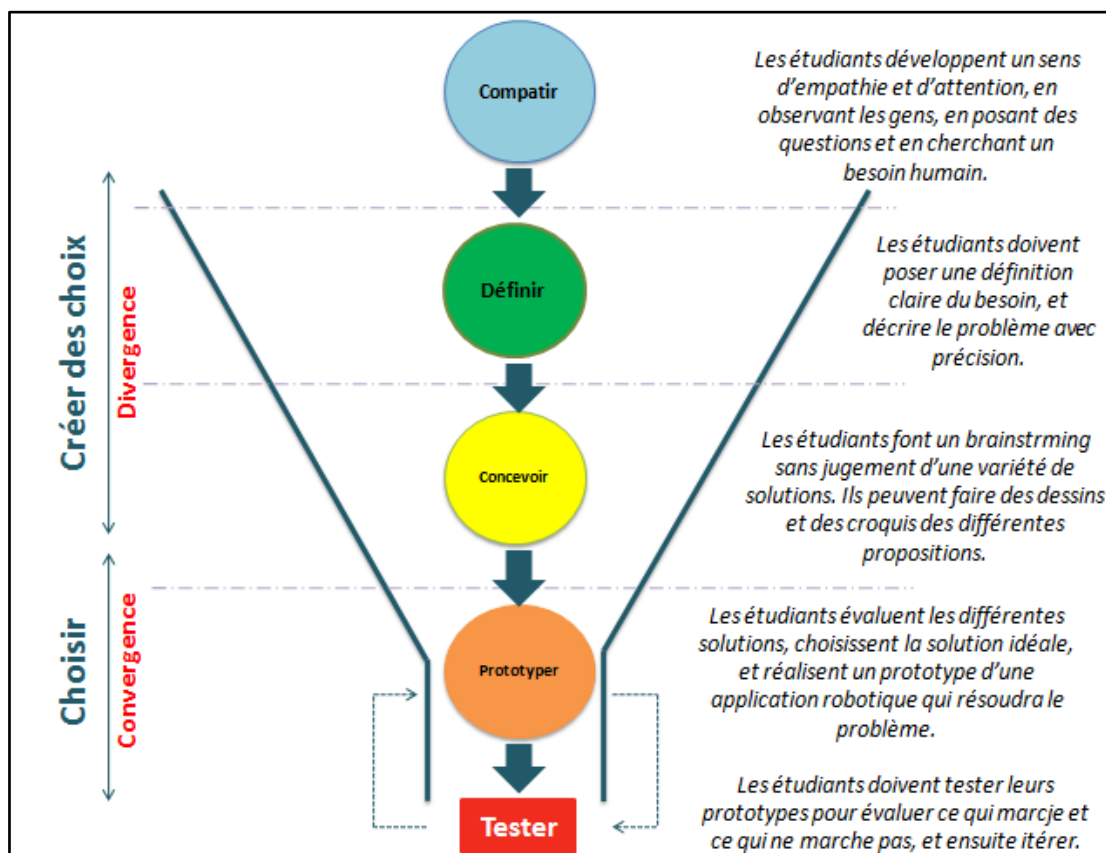


Figure 30 : Processus personnalisé du design thinking utilisé par les étudiants de 1^{ère} année dans le projet *Enjoyeering Freshman* [Source : Notre recherche]

Dans la 1^{ère} phase, les étudiants doivent développer un sens d'empathie et d'attention en observant les gens, en posant des questions, et en identifiant un besoin humain. Une fois que ce besoin a été identifié, les étudiants doivent élaborer une définition claire du besoin et décrire le problème d'une manière précise. Dans la phase d'idéation, les étudiants font un brainstorming d'idées et génèrent sans jugement ou critique une très grande variété de solutions ; ils peuvent aussi faire des dessins des différentes propositions. Une fois qu'ils ont évalué les différentes solutions, ils peuvent choisir la solution la plus prometteuse, et réaliser un prototype d'une application robotique qui résoudra le problème. Finalement, les étudiants doivent tester leur prototype pour définir ce qui marche, et itérer leur solution pour améliorer ce qui ne marche pas.

V-4 Les outils utilisés

➤ Lego Mindstorms NXT

Lego Mindstorms NXT est un kit robotique propose par la compagnie LEGO. Il inclut du hardware et du software pour créer des applications robotiques personnalisées et programmables. Le Lego Mindstorms NXT n'est pas coûteux et possède un hardware compact et solide ainsi qu'un environnement software graphique et créatif.

Le kit NXT contient tout ce dont les étudiants ont besoin pour réaliser des applications robotiques intéressantes : La brique NXT qui est le cerveau du robot Mindstorms, c'est un petit ordinateur intégré qui donne vie au robot Mindstorms et lui permet d'effectuer différentes opérations ; 3 servomoteurs qui donnent au robot la possibilité de bouger ; un capteur de couleur qui permet au robot de distinguer entre les couleurs, la lumière et l'obscurité ; un capteur ultrasonique qui permet au robot de détecter et voir les objets ; 2 capteurs de contact qui donnent au robot la possibilité de sentir les objets et réagir en conséquence, un capteur de luminosité qui permet de lire l'intensité de lumière et la mesurer, et finalement un capteur de son qui permet au robot de détecter les sons et les analyser. D'autres pièces sont incluses dans le kit, à savoir une centaine de briques LEGO, des engrenages, des roues et des axes (Figure 31).

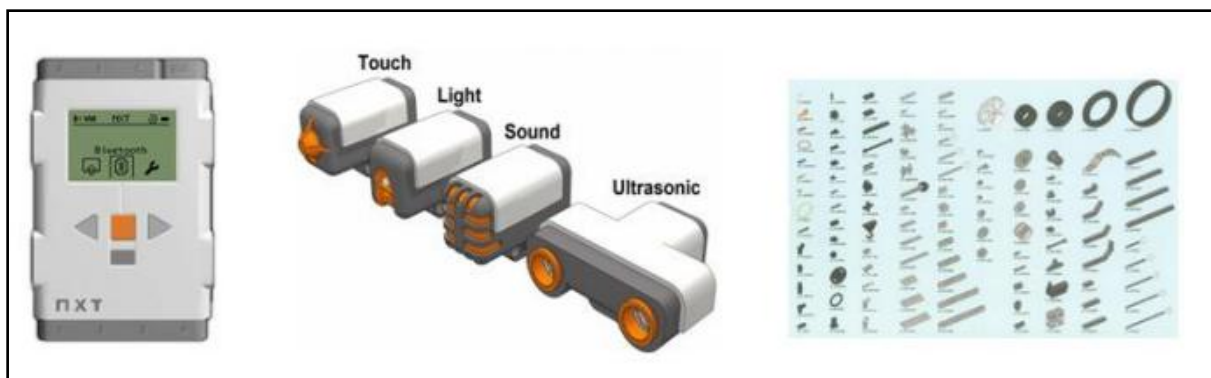


Figure 31 : La brique NXT, les capteurs, et les pièces mécaniques

Le choix de Lego Mindstorms est justifié par deux raisons.

La 1^{ère} raison est principalement reliée à son coût réduit. Comme il a été signalé dans le cadre de contraintes d'implémentation présenté dans la section III-3, les ressources matérielles déployées pour les projets des étudiants ne doivent pas être très coûteuses à cause des ressources financières limitées.

La 2^{ème} raison est que le Lego Mindstorms s'avère être une excellente plateforme pour les projets. En effet, en plus des occasions pluridisciplinaires qu'offre le LEGO MINDSTORMS dans la science, la technologie, l'ingénierie et les maths, il permet une grande liberté de créativité et de conception et se définit comme une opportunité pour les étudiants d'explorer et porter un intérêt au monde d'ingénierie. Il est de plus en plus utilisé dans l'enseignement des sciences et technologies, ainsi que dans des compétitions estudiantines (Ringwood 2005 ; Wang 2004). En outre, de nombreux travaux ont montré que le kit LEGO Mindstorms est un outil de choix pour l'amélioration de la pensée critique et le développement des compétences de résolution de problèmes (Ricca et al. 2006). Il donne également, la possibilité aux étudiants d'apprendre et de pratiquer beaucoup de cours et des concepts d'ingénierie.

V-5 Implémentation du projet *Enjoyeering Freshman*

V-5-1 Organisation et formations :

La 1^{ère} édition du projet *Enjoyeering Freshman* a été organisée en 2014.

L'activité a duré 11 semaines, une moyenne de 45 heures approximativement, à raison de deux séances de deux heures par semaine.

Dans la 1^{ère} séance, 8 équipes d'étudiants ont été formées, à raison de 3 ou 4 personnes par équipe.

La 1^{ère} semaine a été une séance d'initiation, où les étudiants ont été introduits au processus personnalisé de design basé sur le modèle HCD. La formation a porté sur l'intérêt du design thinking, la particularité du modèle du design basé sur l'humain, et les principales étapes du processus qui doivent être suivies tout au long du projet.

Cette première semaine a aussi été dédiée à l'initiation des étudiants au kit robotique utilisé pour cette activité. Environ huit heures de formations ont été dédiées au kit robotique Lego Mindstorms et son logiciel. Une formation de deux heures a été suffisante pour initier les élèves au kit, car la plupart des étudiants sont familiers avec les « legos » depuis leur enfance. Un kit Lego Mindstorms a été attribué à chaque équipe, et les étudiants ont pu ainsi prendre contact avec les différentes composantes du kit robotique (Figure 32). Un premier prototype de robot a été réalisé par les étudiants.



Figure 32 : Initiation des étudiants à la plateforme Mindstorms [Source : Notre recherche]

Il a aussi été demandé à chaque équipe de garder le kit robotique tout au long de l'activité, et ce pour deux raisons.

La 1^{ère} est que les étudiants ont constamment besoin de travailler sur leurs projets. Ils veulent profiter de leur temps libre pour les raffiner, et doivent se trouver tout le temps très proches de leurs kits pour mettre leurs idées en exécution.

La 2^{ème} raison est que la créativité ne peut pas être liée à une séance ou deux pendant toute la semaine, mais peut se manifester à n'importe quel moment de la journée. Il est donc préférable que les étudiants trouvent tout le matériel dont ils ont besoin à portée de main.

Finalement, cette solution réglera le problème de trouver une salle libre et un créneau libre pour l'administration, ainsi que la nécessité de la présence d'un superviseur pour les projets.

Le logiciel Lego Mindstorms NXT a nécessité un peu plus de temps, en raison du fait que les étudiants n'ont aucune expérience préalable avec la programmation et les algorithmes. C'est pour cela qu'une formation de six heures a été dédiée à la présentation du logiciel NXT-G qui est un environnement de programmation graphique fourni avec le kit Lego Mindstorms. Les étudiants ont utilisé des blocs graphiques pour écrire des programmes et ont été rapidement séduits par la facilité de son utilisation.

Les 2 semaines qui ont suivi ont été dédiés aux 3 premières phases du processus de design.

Nous avons demandé aux étudiants dans un premier temps d'observer les gens autour d'eux (famille, enseignants, citoyens,...) et d'essayer de collecter le maximum de problèmes et besoins de gens. Les étudiants ont généré une multitude de besoins humains, et se sont finalement décidé sur l'idée de projet pour laquelle ils ressentent plus d'empathie. La 2^{ème} séance de la 1^{ère} semaine a été dédiée à la définition claire du problème et du besoin. Les idées de projets ont donc été décidées, et les étudiants ont pu passer durant la 3^{ème} semaine à générer une variété de solutions. Pour cela, une formation de brainstorming leur a été donnée. Les étudiants ont appris à proposer un maximum d'idées au sein de leur équipe sans qu'ils soient pour autant critiquées. Souvent pour expliquer telle ou telle idée, les étudiants ont dû faire des dessins à la main pour une meilleure description et représentation. A la fin de la 3^{ème} semaine, les étudiants avaient en tête et sur papier une première image de l'application robotique qu'ils allaient réaliser pour résoudre le problème choisi.

Les 4^{ème} et 5^{ème} semaines ont été dédiées au prototypage. Les étudiants ont été ravis de faire sortir à la réalité les idées abstraites. Des premiers prototypes ont été réalisés et les premiers essais de programmation ont commencé.

Les étudiants ont aussi réalisé qu'en design d'ingénierie, rien ne marche du premier coup. Les tests sur les robots leur ont montré qu'il y a des choses qui marchent et d'autres qui ne marchent pas. Au bout de 3 semaines de tests, d'itération et de perfectionnement, les étudiants ont finalement pu développer des robots performants et se sont préparés à la compétition qui clôture l'activité *Enjoyeering Freshman*.

V-5-2 La compétition et l'évaluation :

La compétition a été organisée publiquement à la fin de l'activité, et ça a été une occasion pour les équipes d'étudiants de présenter leurs réalisations robotiques, et de convaincre le jury que leur produit répond réellement à un besoin humain ou social. À la fin de la compétition, des prix ont été décernés aux trois équipes dont les réalisations ont été les plus créatives.

Généralement dans ce genre d'activités, il est difficile d'évaluer la performance des étudiants et savoir exactement qui fait quoi. Comme l'activité *Enjoyeering Freshman* est une activité additionnelle réalisée en parallèle avec le curriculum, il n'a pas été nécessaire d'évaluer la contribution de chaque étudiant puisqu'il n'y pas eu de notes à la fin de l'activité, mais plutôt une compétition entre les équipes de projets. C'est pour cela que nous nous sommes intéressés à faire une évaluation d'équipe plutôt qu'une évaluation individuelle.

Pour cette évaluation, chaque équipe a dû préparer une présentation PowerPoint. Chaque présentation a été évaluée par 5 enseignants de différentes disciplines en se basant sur sa qualité et la clarté des explications fournies. Dans une salle d'exposition, chaque équipe a dû convaincre le jury de la pertinence de son projet. L'évaluation du jury a porté sur 4 critères majeurs (Figure 33). Le 1^{er} critère concerne l'originalité de l'idée du projet, ainsi que le degré de créativité dont l'équipe a fait preuve pour répondre au besoin humain. Le 2^{ème} critère concerne la complexité du robot ainsi que sa performance. Le 3^{ème} critère concerne la logique des tâches accomplies par le robot, explicitement la logique des algorithmes créés pour programmer le robot à exécuter les tâches souhaitées. Finalement, le 4^{ème} critère concerne la qualité de la présentation des étudiants, incluant la qualité de la communication orale, la capacité à défendre le projet, ainsi que la synergie du groupe.

Critère Equipe	Originalité & Créativité	Complexité & Performance	Logique	Qualité de la présentation	Total Points
Equipe 1					
Equipe 2					
Equipe 3					
Equipe 4					
Equipe 5					
Equipe 6					
Equipe 7					
Equipe 8					

Figure 33 : Grille d'évaluation des projets des étudiants [Source : Notre recherche]

V-5-3 Exemples de projets des étudiants :

Dans ce qui suit, nous allons présenter les 3 projets qui ont été primés le jour de la compétition, à savoir le projet « The waiter Robot », le projet « The Bracelet Maker », et le projet « Fresh Floor ». Nous présentons dans l'annexe 2 des photos d'autres projets participants (Figures 34-39).

V-5-3-1 The waiter robot :

Le projet The Waiter Robot est une application robotique qui consiste à servir automatiquement les consommateurs dans un restaurant, sans déplacement du serveur. Le client passe sa commande au début directement au serveur ; le serveur pose la commande sur le plateau du robot, et clique sur le numéro de la table où est assis le client. Sur le prototype du Lego Mindstorms, les étudiants ont choisi d'écrire des programmes numérotés pour chaque table ; ainsi lorsqu'on choisit le programme N°1 sur la brique NXT, un moteur s'actionne et fait avancer le robot vers la table 1. Une fois que le robot arrive à cette table, le consommateur lui commande de déposer le plateau sur la table. Pour cela, les étudiants ont opté pour un capteur tactile ; une fois qu'il est actionné, un 2^{ème} moteur permet de faire descendre le plateau à la position de la table via un système de poulies-courroies. Finalement, le consommateur demande au robot de s'en aller en cliquant sur un autre capteur tactile. Les étudiants de cette équipe pensent fortement qu'avec cette idée, la tâche du serveur ne sera plus ardue puisque la gestion des commandes est effectuée par le robot. Ce projet a obtenu le 3^{ème} prix du jury (Figure 38).

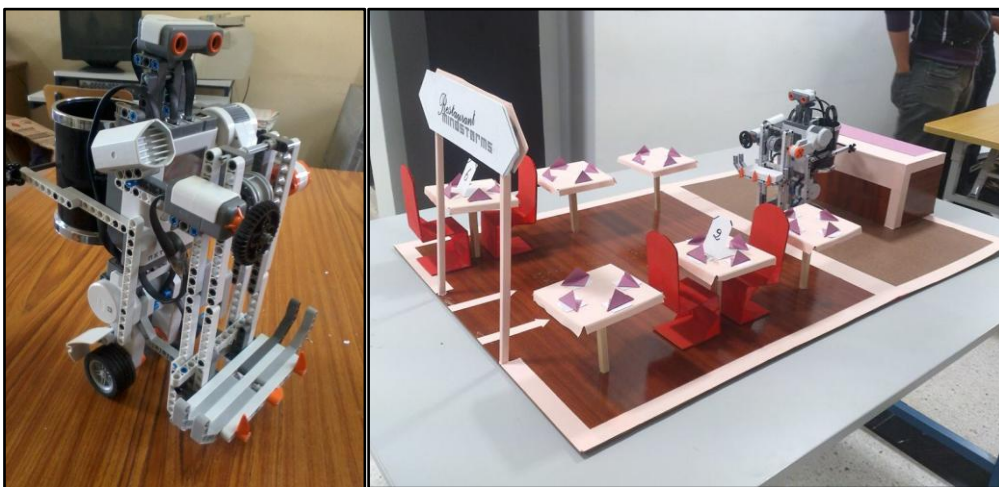


Figure 38 : Compétition *Enjoyeering Freshman*- 3^{ème} prix du jury – The robot Waiter [Source: Notre recherche]

V-5-3-2 The Bracelet Maker :

Le projet The Bracelet Maker est une application robotique pour la réalisation automatique de bracelets à perles pour filles. Pour ce projet, les étudiants ont opté pour un système de bras robotique à 3 moteurs. Le 1^{er} moteur en bas permet de réaliser l'angle Psi, et par conséquent le robot peut se positionner sur un plan XY soit devant les perles colorées, soit devant le fil qui servira par la suite de bracelets. Le 2^{ème} moteur permet de réaliser l'angle Theta et fait descendre le bras du robot dans un plan YZ soit pour prendre les perles, soit pour les mettre dans le bracelet. Finalement, un 3^{ème} moteur permet d'ouvrir et fermer une pince à l'extrémité du bras afin de prendre la perle (position fermée) ou l'enfiler dans le fil du bracelet (position ouverte). Un capteur de couleur est positionné à l'intérieur de la pince pour permettre au robot de choisir la couleur de la perle souhaitée.

Les étudiants de cette équipe suggèrent l'utilisation de ce robot dans un contexte industriel afin d'aider les ouvrières dans cette tâche jugée trop fatigante manuellement.

Dans ce projet, les étudiants ont pu :

- connaître et comprendre les angles d'Euler ainsi que leur application.
- tester la stabilité du bras robotique.

Ce projet a obtenu le 2^{ème} prix du jury (Figure 39).



Figure 39: Compétition *Enjoyeering Freshman*- 2^{ème} prix du jury – The Bracelet Maker [Source: Notre recherche]

V-5-3-3 Fresh Floor :

Le projet Fresh Floor est une application robotique qui permet de faire le ménage automatiquement à longueur de journée dans des surfaces commerciales ou autres.

Lorsque le robot est actionné, 2 moteurs le font avancer. Les étudiants ont choisi de lui faire suivre des trajectoires bien déterminées sous forme d'un va et vient couvrant toute la surface désirée. Le système est composé d'un système de roues tournantes actionné par un 3^{ème} moteur, et qui permet de collecter les déchets rencontrés sur la trajectoire et les stocker dans un sac poubelle positionné à l'intérieur du robot. Un autre système de balayage est installé à l'autre extrémité du robot, lui permettant ainsi de balayer la poussière du sol tout en avançant. Un capteur ultrasonique installé au devant du robot lui permet de détecter les obstacles (murs, personnes, objets,...) et de les éviter.

Les étudiants de cette équipe proposent une variété d'utilisations pour ce robot ; soit pour usage domestique, soit dans des surfaces commerciales ou des espaces de travail afin de minimiser ou supprimer la présence de ménagères.

Ce projet a obtenu le 1^{er} prix du jury (Figure 40).



Figure 40: Compétition *Enjoyeering Freshman*- 1er prix du jury – Fresh Floor [Source: Notre recherche]

V-6 Résultats :

Des questionnaires ont été élaborés et utilisés à la fin de l'activité *Enjoyeering Freshman* pour obtenir les feedbacks des étudiants concernant le déroulement de l'activité et la réalisation de leurs projets, et collecter les suggestions des étudiants pour d'éventuelles améliorations. Des résultats qualitatifs ont été obtenus à partir des impressions générales des étudiants, à partir des questions cibles élaborées en se basant sur le cadre de compétences pour les étudiants en premières années du curriculum d'ingénierie.

Le questionnaire établi comprend des questions comme :

- Avez-vous aimé votre propre projet ?
- Sur une échelle de 1 à 5, évaluez votre degré d'investissement dans le projet.
- Est-ce que vous avez recherché de l'information pour votre projet ? (Internet ou autre...)
- Dans le contexte de votre projet, à combien de concepts avez-vous pensé ?
- Sur une échelle de 1 à 5, évaluez votre participation au projet au sein de votre équipe.
- Mis à part les problèmes reliés à la réalisation de votre robot, quelles sont les difficultés que vous avez eues tout au long du projet ?
- « *Enjoyeering Freshman* » a-t-il eu un impact sur vous ? Si oui, dites de quelle manière.

Les commentaires des étudiants ont été les suivants :

- *Enjoyeering Freshman* était un projet agréable. J'ai appris beaucoup de choses, mais le temps alloué au projet n'était pas vraiment suffisant.
- Travailler au sein d'une équipe m'a permis de résoudre des problèmes que je n'aurais jamais pu résoudre seul, et j'ai pu proposer des idées et solutions créatives.
- Des fois, nous avions besoin de plus de pièces du Lego Mindstorms, mais malheureusement un seul kit était permis, ce qui nous a posé beaucoup plus de problèmes lors du design du projet.
- *Enjoyeering Freshman* a été une inspiration pour nous ; nous savons mieux maintenant ce que c'est l'ingénierie et les problèmes d'ingénierie.

V-7 Conclusions et perspectives :

Le projet *Enjoyeering Freshman* a créé un environnement attractif pour les étudiants de 1ère année. En effet, il a pu introduire à un stade très précoce les étudiants aux problèmes d'ingénierie et à la connaissance du design grâce au processus du design thinking, et leur a permis de développer des compétences relatives au design telles que la résolution créative de problèmes, la génération d'idées et la génération de concepts, la sélection de concepts et le prototypage. Les étudiants ont aussi acquis une solide expérience en travail collaboratif et ont pu améliorer leurs compétences en communication orale durant les présentations de leurs projets.

L'implémentation du projet *Enjoyeering Freshman* a été relativement aisée. En effet, le coût du projet *Enjoyeering Freshman* a été raisonnable, du fait qu'il n'a sollicité au niveau du matériel que les kits robotiques Lego Mindstorms, et nous pensons que ce projet peut être aisément installé dans n'importe quelle institution d'ingénierie à ressources financières limitées. De même, les autres contraintes d'implémentation ont été satisfaites ; le projet a été implémenté comme une activité ad-hoc au curriculum, et n'a pas sollicité beaucoup de ressources humaines ; en effet un seul superviseur a été suffisant pour guider les étudiants tout au long du projet. La durée du projet a duré approximativement 3 mois, et même si les étudiants ont pu développer des applications robotiques intéressantes, il serait préférable pour les éditions suivantes d'accorder un peu plus de temps au projet pour permettre aux étudiants d'effectuer plus de tests sur leurs projets afin de les raffiner.

Même si les résultats qualitatifs ont été en général très positifs et très encourageants, ils restent à valider avec une étude quantitative. Cette étude n'a pas été faite pour le moment pour 3 raisons :

- La 1^{ère} est que l'échantillon d'étudiants à étudier est relativement faible.
- La 2^{ème} est que le projet n'a été implémenté qu'une seule fois, pour des raisons d'inaccessibilité de matériel dans notre Faculté.

De ce fait, les perspectives concernant les implémentations futures du projet *Enjoyeering Freshman* portent essentiellement sur sa durée et sur son évaluation quantitative.

CHAPITRE VI

Conception et implémentation du projet :

Enjoyeering Junior



VI-1 Introduction :

Dans notre curriculum, les premières années sont dédiées à l'introduction des concepts fondamentaux de mathématique, physique et informatique, d'une manière théorique sans aucune perspective d'ingénierie. Toutefois, pour aider les étudiants à comprendre profondément les fondamentaux de l'ingénierie en mettant en pratique ce qu'ils apprennent dans les cours, et en acquérant des compétences en design d'ingénierie, nos étudiants doivent être activement impliqués et engagés dans leur apprentissage à travers des expériences de design et développement de produits.

Le projet *Enjoyeering Junior* proposé est une initiative qui vise à introduire précocement les étudiants de 2^{ème} année du 1^{er} cycle au design d'ingénierie et à la résolution de problèmes dans le contexte d'un cours de mécanique de solides (Kojmane et Aboutajeddine 2016). Dans une perspective ambitieuse, l'activité proposée peut aussi être vue comme une initiative pour passer d'un modèle d'apprentissage passif basé sur la science, à un modèle d'apprentissage actif basé sur l'ingénierie.

Généralement dans les cours fondamentaux d'ingénierie mécanique, le cours de la mécanique de solides est le premier cours où les étudiants peuvent être exposés aux problèmes réels d'ingénierie, et peuvent comprendre le vrai sens de l'ingénierie et du design. Dans ce cours, les étudiants découvrent les mécanismes et sont généralement tenus de résoudre des problèmes relatifs à la modélisation, l'analyse et le design des systèmes en mouvement. Ce cours est critique pour les étudiants et peut être considéré comme une anticipation à ce qu'ils sont censés expérimenter dans leurs carrières futures d'ingénieurs.

De plus, les industries automobile et aéronautique, sont devenus de plus en plus exigeants en ce qui concerne la qualité de leurs ingénieurs, et il y a aujourd'hui une forte demande pour les ingénieurs qui maîtrisent les outils de design des systèmes en mouvement, et sont capables de résoudre des problèmes relatifs au développement de produits. Pour cette raison, et afin de développer ces compétences chez nos étudiants, le cours de mécanique de solides a été un environnement approprié et évident pour l'implémentation du projet *Enjoyeering Junior*.

Le projet a été conçu en se basant sur les 3 cadres décrits précédemment sur le chapitre IV. Le 1^{er} cadre est le cadre de compétences visées que les étudiants de 2^{ème} année doivent développer pour améliorer leurs compétences en innovation et en design d'ingénierie. Le 2^{ème} cadre est le cadre de propositions clés pour devancer les contraintes d'implémentation.

Finalement le 3^{ème} cadre est le cadre de mesures d'évaluation pour évaluer la performance des étudiants d'une part, et évaluer les forces et faiblesses de l'activité d'autre part.

VI-2 Le projet *Enjoyeering Junior*

Les étudiants en 2^{ème} année du 1^{er} cycle sont tenus de concevoir des systèmes mécaniques et contrôler leurs mouvements, en appliquant les concepts appris dans le cours de mécanique de solides, et en utilisant du matériel ouvert peu coûteux.

VI-3 Processus personnalisé basé sur le design pour le projet *Enjoyeering Junior*

Le cours de mécanique de solides est le premier cours dans le curriculum d'ingénierie où les étudiants peuvent comprendre et pratiquer le vrai sens du design d'ingénierie, puisque les principes de la dynamique sont incorporés dans le design des automobiles, des avions et des bâtiments. Par conséquent, nous pensons fortement que le fait de donner aux étudiants d'appliquer les principes de cinématique et de dynamique enseignés en classe à travers la pratique d'un processus itératif de design d'ingénierie, permettra aux étudiants d'acquérir les compétences requises pour les étudiants en 2^{ème} année.

Dans ce contexte, nous avons conçu un processus personnalisé pour les étudiants en 2^{ème} année du 1^{er} cycle et qui relie chaque phase du processus de design d'ingénierie aux objectifs du cours de mécanique de solides (Figure 41). Ce processus met la lumière sur les compétences que doivent acquérir les étudiants à travers une activité de design tout en utilisant les concepts de dynamique appris dans le cours.

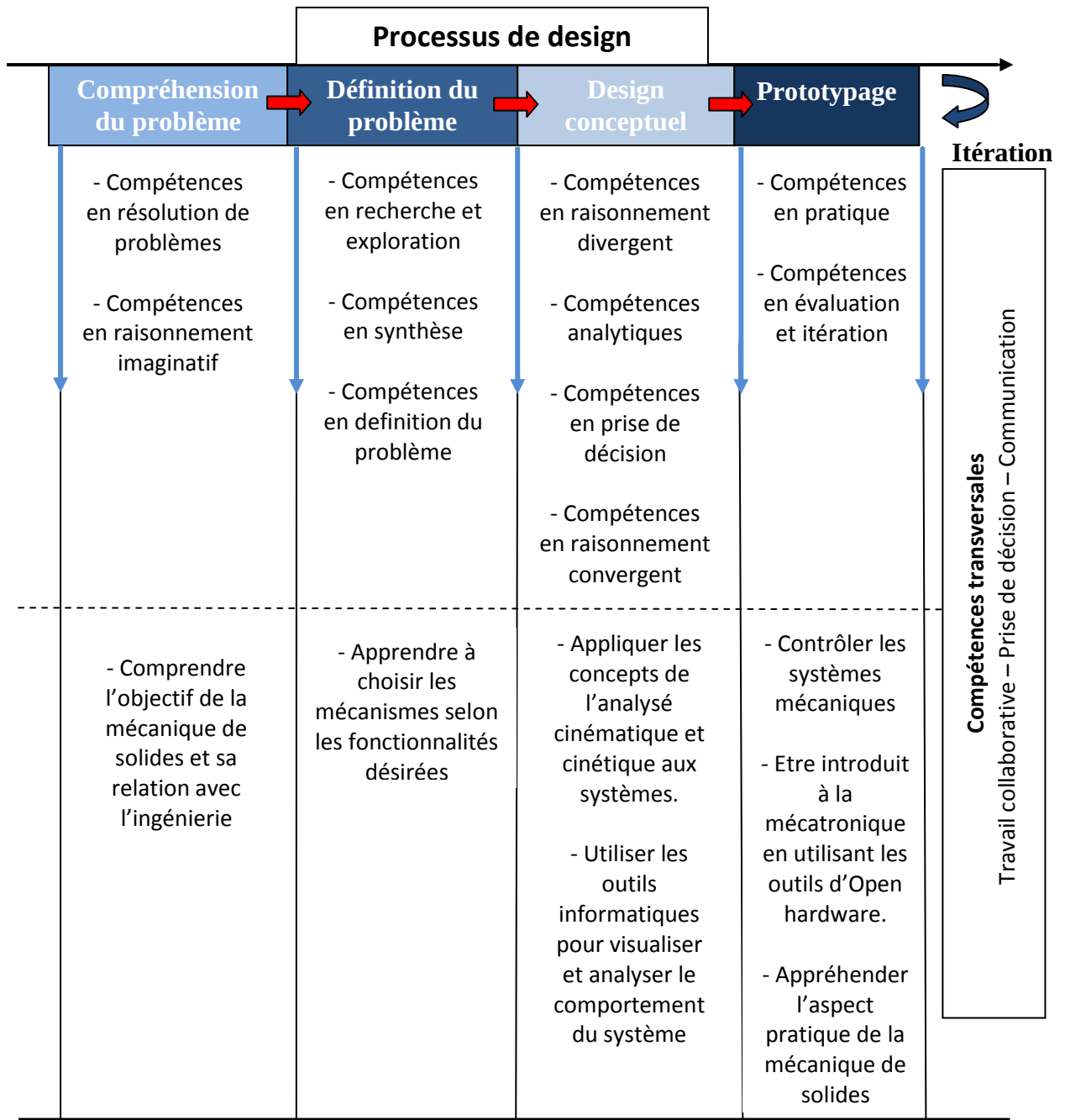


Figure 41 : Compétences visées par *Enjoyeering Junior* versus objectifs du cours de mécanique de solides

[Source : Notre recherche]

Ce processus commence par une 1^{ère} phase de compréhension. Dans cette phase, les étudiants doivent comprendre les objectifs requis sans aucune interprétation au préalable. Ils découvrent les applications de la mécanique de solides dans les designs de la vie courante, et commencent à comprendre comment traiter les problèmes mal structurés d'ingénierie. Cette phase est intéressante dans la mesure où elle permet aux étudiants de ne plus rester figés sur des problèmes bien définis, et de résoudre des problèmes complexes par leur multi dimensionnalité à travers l'observation et la critique.

Au fur et à mesure que les étudiants progressent dans le cours, ils commencent par comprendre les concepts basiques de la mécanique de solides. Ils comprennent les différents mécanismes et leur principe de fonctionnement, et par conséquent arrivent à définir le problème de design en utilisant des compétences en énoncé du problème et en synthèse. Une fois que le problème est bien défini, les étudiants commencent à explorer les solutions possibles du problème impliquant ainsi leurs compétences en pensée divergente. Pour converger vers la meilleure solution, les étudiants appliquent les concepts du cours tels que l'analyse cinématique et cinétique. A ce niveau, les étudiants peuvent développer et améliorer leurs compétences en pensée convergente et en prise de décisions.

La dernière phase de ce processus est la phase où les étudiants peuvent concrétiser le concept de solution choisi à travers le prototypage. Quand les étudiants dessinent, modélisent, et construisent leur solution, ils développent des compétences en prototypage, passant ainsi d'une pensée abstraite à la construction pratique.

Le projet *Enjoyeering Junior* est constitué de 3 phases (Figure 42).

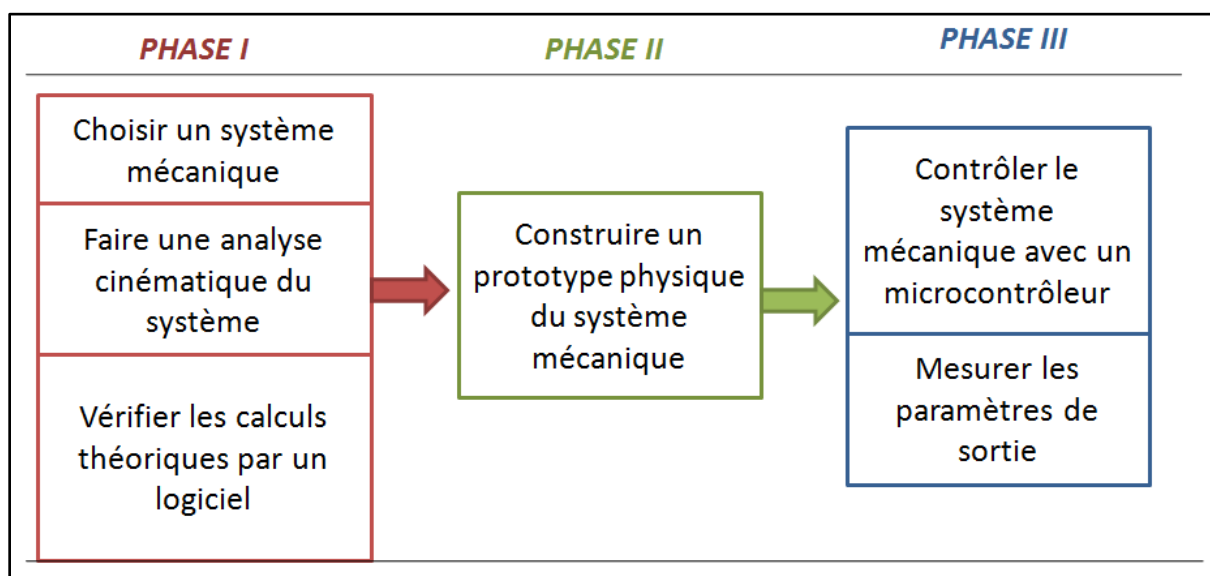


Figure 42: Phases du projet *Enjoyeering Junior* [Source: Notre recherche]

Dans la 1^{ère} phase, les étudiants doivent concevoir un système mécanique créatif. Les étudiants commencent par imaginer un système mécanique en se basant sur des mécanismes existants. Pour cela, les étudiants peuvent trouver de l'aide et de l'inspiration dans les livres de mécanique de solides comme ceux utilisés dans le cours (Beer and Johanson 2009 ;

Hibbeler 2009 ; Meriam and Kraige). La figure 43 montre des exemples de mécanismes que les étudiants peuvent utiliser pour leur système mécanique.

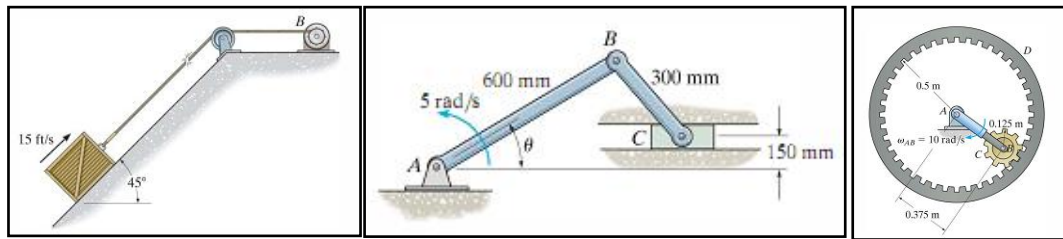


Figure 43 : Exemples de mécanismes pris d'un livre de mécanique de solides

Dans cette partie de cette 1^{ère} phase, les étudiants développent des compétences en imagination, en pensée divergente et en pensée convergente. Par la suite, les étudiants sont tenus de réaliser des calculs analytiques pour leurs mécanismes. C'est dans cette partie que les étudiants peuvent appliquer les concepts qu'ils ont appris dans les différents chapitres du cours. Ils peuvent créer un diagramme de corps libre d'un système, effectuer une analyse cinématique et cinétique de leur système, et analyser la dynamique de leur système.

L'étape suivante pour les étudiants est de vérifier les calculs précédents par un logiciel de dynamique comme Working Model. Cette partie est le cœur du processus de design des systèmes en mouvement, où les étudiants peuvent expérimenter le vrai sens du design d'ingénierie. Les étudiants sont beaucoup plus impliqués que dans les parties précédentes, parce qu'ils jouent un rôle actif dans leur processus d'apprentissage. En fait, ils peuvent réaliser des dessins des mécanismes, appliquer des contraintes comme des forces ou des moments, simuler le mouvement du système et récupérer à la fin des calculs de paramètres tels que la vitesse linéaire, la vitesse angulaire, l'accélération.

De cette façon, les étudiants sont motivés de voir la manière dont leur système évolue sous des conditions spécifiques, et peuvent par conséquent développer des compétences en visualisation ainsi que des compétences analytiques.

Dans la seconde phase, les étudiants sont tenus de construire leur système mécanique en se basant sur du matériel hardware qui n'est pas coûteux et peuvent utiliser du matériel usuel tiré des objets de la vie quotidienne. L'idée est de concevoir des systèmes mécaniques qui ne sont pas du tout chers, et répondre ainsi au cadre de contraintes d'implémentation présenté précédemment. La 3^{ème} phase représente le vrai challenge des étudiants. Dans cette phase, les étudiants sont tenus de rendre « vivants » leurs systèmes mécaniques en les contrôlant par un

microcontrôleur Arduino, mesurer les paramètres de sortie (vitesses, accélérations,...) et les comparer avec les paramètres calculés dans la 1^{ère} phase.

VI-4 Outils utilisés

VI-4-1 Outils utilisés dans la 1^{ère} phase : Working Model

Dans la dernière étape de la 1^{ère} phase, l'outil technologique et analytique utilisé est le logiciel Working Model 2D. L'étape suivante pour les étudiants est de vérifier les calculs précédents par un logiciel de dynamique comme Working Model. Il s'agit d'un logiciel de simulation mécanique peu coûteux développé par la Knowledge Revolution à San Mateo en Californie. Le choix de ce logiciel est justifié par le fait que c'est un outil d'ingénierie assistée par ordinateur qui a été adopté par des milliers d'ingénieurs professionnels pour créer et analyser des systèmes mécaniques (Working Model 2016). Cette partie est le cœur du processus de design des systèmes en mouvement, où les étudiants peuvent « toucher » le design d'ingénierie. Les étudiants sont plus impliqués que dans les parties précédentes, parce qu'ils jouent un rôle actif dans leur processus d'apprentissage. En fait, ils peuvent réaliser des dessins des mécanismes, appliquer des contraintes comme des forces ou des moments, simuler le mouvement du système et récupérer à la fin des calculs tels que la vitesse linéaire, la vitesse angulaire, l'accélération, etc. (Figure 44). De cette façon, les étudiants sont motivés de voir la manière dont leur système se comporte sous des conditions spécifiques, et peuvent par conséquent développer des compétences analytiques et de raisonnement visuel.

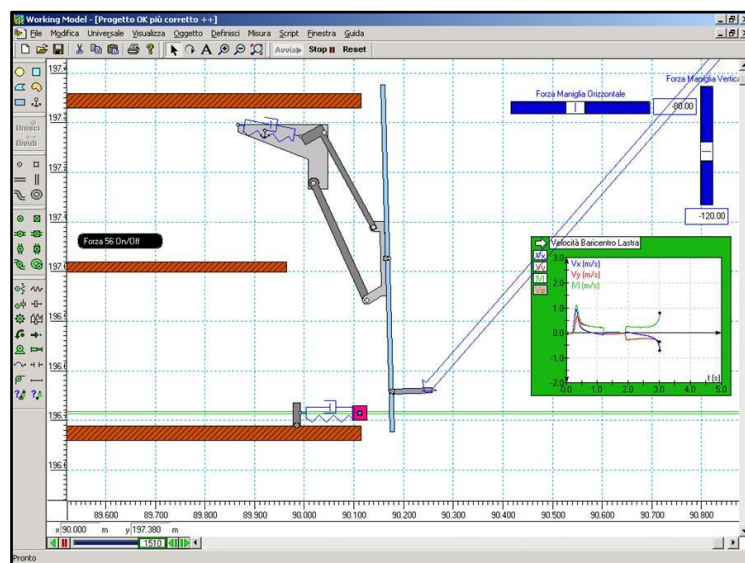


Figure 44 : Exemple de mécanisme réalisé par les étudiants sur Working Model [Source : Notre recherche]

VI-4-2 Outils utilisés dans la 2^{ème} phase : Matériel usuel

Dans la seconde phase, les étudiants sont tenus de construire leur système mécanique en se basant sur du matériel hardware qui n'est pas coûteux et peuvent utiliser du matériel usuel tiré des objets de la vie quotidienne. Par exemple, pour permettre le mouvement du système, les moteurs (moteurs pas à pas ou servomoteurs) peuvent être collectés des équipements déjà utilisés tels que les imprimantes ou les mixeurs (Figure 45).

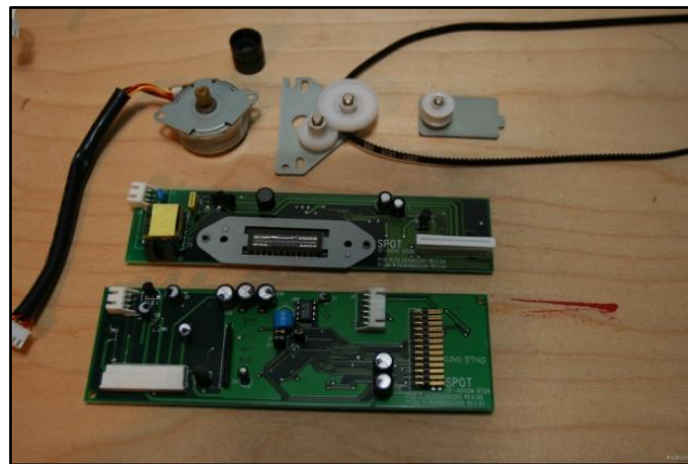


Figure 45 : Exemple de matériel usuel utilisé par les étudiants

VI-4-3 Outils utilisés dans la 3^{ème} phase : Arduino

Le choix de la plateforme Arduino est justifié par diverses raisons. Premièrement, c'est une plateforme électronique qui n'est pas coûteuse, et les étudiants peuvent se l'offrir facilement. Deuxièmement, Arduino inspire beaucoup de fans à travers le monde par sa capacité à développer des objets interactifs qui peuvent recevoir des paramètres d'entrée d'une variété de capteurs et d'actionneurs, et peuvent contrôler une variété de lumières, moteurs et sorties matérielles. Il peut être utilisé pour contrôler un simple circuit pour allumer une Led, ou contrôler des robots complexes et des jeux vidéo (Figure 46). Cela constitue un environnement excellent pour introduire le design aux étudiants et améliorer leurs compétences en programmation (Rubio et al.2013). Dans le contexte de ce projet, Arduino peut être utilisé en combinaison avec différents capteurs et actionneurs pour le contrôle d'une partie du système mécanique, l'acquisition des données et la visualisation des résultats.

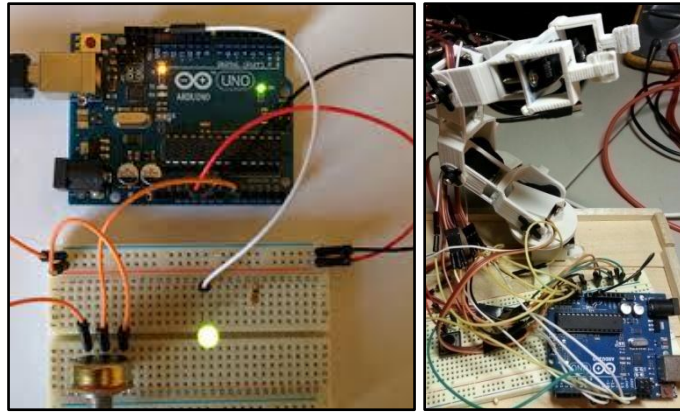


Figure 46 : Exemples d'utilisation de la plateforme Arduino

VI-5 Implémentation du projet *Enjoyeering Junior*

VI-5-1 Organisation :

Le projet *Enjoyeering Junior* a été implémenté 3 fois, en 2014, 2015 et 2016, avec 2 sections et un effectif d'approximativement 120 étudiants par section. Dans chaque édition, les étudiants ont été divisés en des groupes de 4 ou 5, et ont travaillé sur le design d'applications mécatroniques innovantes, selon le processus proposé.

Le projet dure tout au long d'un semestre. Au début du semestre, le contexte du projet ainsi que son déroulement sont expliqués aux étudiants. Des livres de mécanique de solides sont proposés aux étudiants pour qu'ils s'inspirent des différents mécanismes existants. Les étudiants commencent alors à discuter d'une application éventuelle de ces mécanismes dans un système mécanique innovant. Ils réalisent des dessins pour mieux expliquer et visualiser leurs propositions de systèmes et commencent à identifier les paramètres d'entrée et de sortie pour les calculs théoriques (Figure 47).

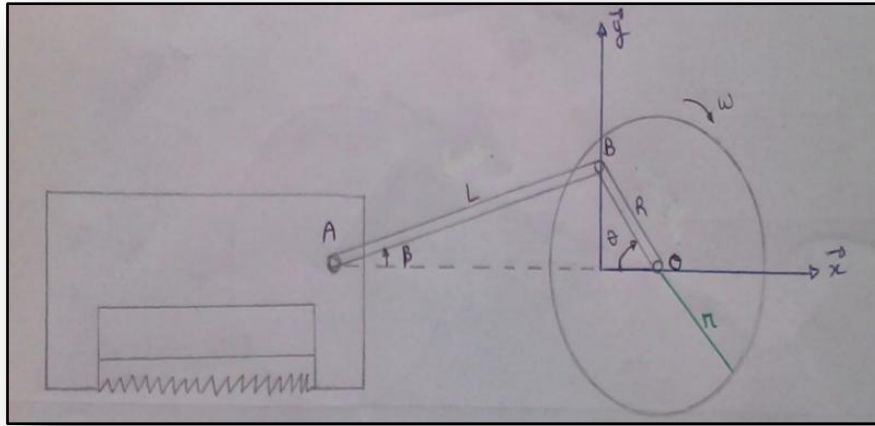


Figure 47 : Exemple d'un premier dessin d'un système mécanique élaboré par les étudiants

Une formation de 2 heures en logiciel Working Model 2D est donnée aux étudiants. Dans cette formation, les étudiants sont introduits à la conception assistée par ordinateur, et apprennent à faire une première modélisation de leur système dans le plan, à vérifier leurs calculs théoriques par le logiciel Working Model et à simuler les mouvements en 2D pour mieux comprendre le comportement du système lorsque les paramètres d'entrée sont modifiés (Figure 48).

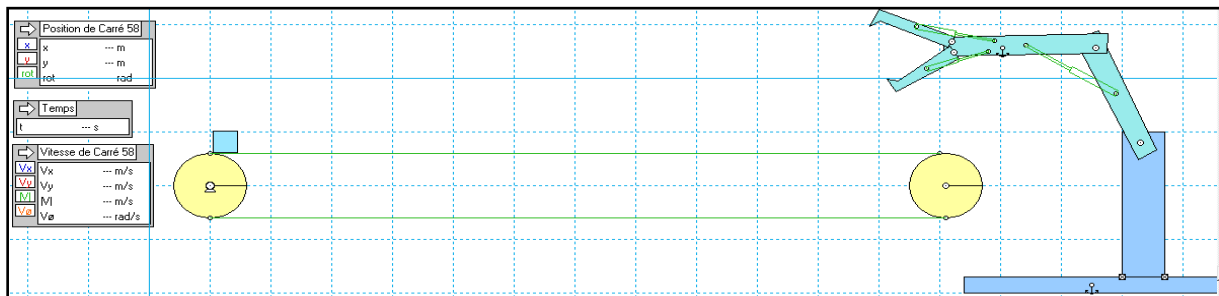


Figure 48 : Exemple de simulation avec le logiciel Working Model 2D [Source : Notre recherche]

Dans la seconde phase de l'activité, les équipes construisent leurs prototypes. Ils prennent des décisions concernant le matériel qu'ils vont utiliser (bois, aluminium, plexiglas,...) ainsi que le type de moteurs adéquats pour leur système mécanique (servomoteurs, moteurs pas à pas, moteurs DC...). Finalement dans la 3^{ème} phase, les équipes contrôlent leurs systèmes par la plateforme électronique Arduino.

L'annexe 3 illustre les étapes suivies par les étudiants pour la réalisation d'une scie mécanique (Figures 51-52) – (Table 24).

VI-5-2 La compétition :

La compétition est organisée publiquement à la fin du projet, et c'est une occasion pour les équipes d'étudiants de présenter leurs réalisations robotiques dans une salle d'exposition, et de convaincre le jury que de la pertinence des livrables de leurs projets. À la fin de la compétition, des prix sont décernés aux trois équipes dont les réalisations sont les plus créatives. Ci-dessous des exemples de projets développés par les étudiants des éditions 2015 et 2016 à la Faculté des Sciences et Techniques de Fès (Figures 53 -54). Il est important de noter que des groupes de projets ont participé après le projet dans des compétitions nationales (à Rabat et Casablanca), et une équipe a été primée 3^{ème} dans une compétition locale (Startup Weekend Makers Fès 2016) avec un projet intitulé Smart Garden, un système d'arrosage automatique des plantes contrôlé par Arduino.



Figure 53 : Exemples de projets d'*Enjeering Junior*, édition 2015 [Source : Notre recherche]



Figure 54 : Exemples de projets d'*Enjeering Junior*, édition 2016 [Source : Notre recherche]

Nous présentons dans l'annexe 4 des photos de différents projets réalisés par les étudiants dans les éditions 2015 et 2016 (Figures 55-59).

VI-6 Evaluation et Résultats

VI-6-1 Evaluation sommative des étudiants :

Le projet *Enjoyeering Junior* fait partie intégrale du cours de mécanique de solides, et donc la contribution de chaque étudiant doit être notée. Pour cela, une évaluation sommative est utilisée. La note finale de l'étudiant est basée sur une évaluation individuelle et une évaluation d'équipe.

L'évaluation de l'équipe implique l'évaluation des étudiants comme équipes. A la fin de l'activité, chaque équipe est tenue de présenter tous les documents du projet. Tous les livrables sont passés sous revue, tels que les dessins, les calculs de l'analyse cinématique, les simulations, et l'efficacité de l'application d'Arduino. Les systèmes mécatroniques sont présentés dans une salle d'exposition et les meilleures notes sont attribuées aux systèmes les plus créatifs et les plus innovants.

L'évaluation individuelle de chaque étudiant inclut 2 parties : une évaluation individuelle reliée au cours, et une évaluation individuelle reliée à l'activité.

L'évaluation individuelle reliée au cours est calculée en se basant sur l'examen final et le contrôle. Les deux examens vérifient si les étudiants ont appris ce qu'ils sont censés apprendre concernant les concepts du cours de mécanique de solides.

D'autre part, la performance individuelle de chaque étudiant reliée à l'activité est évaluée par l'utilisation de la méthodologie de l'évaluation par les pairs qui est une méthode généralement très appréciée par les étudiants (Hanrahan and Isaacs 2001). Les étudiants sont tenus d'évaluer la performance de leurs collègues pendant le projet. Cette méthode encourage les étudiants à faire de leur mieux pour être bien noté par leurs pairs, et augmente le développement d'une variété de compétences telles que le travail collaboratif, le jugement professionnel, la négociation et la conscience (Topping et al. 2000).

La note individuelle de chaque étudiant est formulée comme suit :

Individual Grade

$$= \frac{G_{\text{mid-term}} W_{\text{mid-term}} + G_{\text{final}} W_{\text{final}} + G_{\text{peer-assessment}} W_{\text{peer-assessment}}}{W_{\text{mid-term}} + W_{\text{final}} + W_{\text{peer-assessment}}}$$

Avec $G_{\text{mid-term}}$ est la note du contrôle avec un facteur $W_{\text{mid-term}}$, G_{final} est la note de l'examen final avec un facteur W_{final} , et $G_{\text{peer-assessment}}$ est la note de l'évaluation par pairs avec un facteur $W_{\text{peer-assessment}}$. Les facteurs ont été choisis respectivement comme 1,2 et 1.

Finalement, la note finale de chaque étudiant est formulée comme suit :

$$\text{Final Grade} = \frac{G_{\text{team}} W_{\text{team}} + G_{\text{ind}} W_{\text{ind}}}{W_{\text{team}} + W_{\text{ind}}}$$

Avec G_{team} est la note du groupe avec un facteur W_{team} , et G_{ind} est la note individuelle avec un facteur W_{ind} . Les facteurs ont été choisis respectivement comme 2 et 1.

VI-6-2 Evaluation formative des étudiants :

VI-6-2 -1 Evaluation qualitative :

Dans l'évaluation qualitative, des questionnaires anonymes ont été donnés aux étudiants afin de collecter leurs feedbacks. Dans cet objectif, des questions ouvertes ont été demandées aux étudiants pour plus de liberté dans leur propre évaluation du projet. Explicitement, nous avons posé les questions suivantes aux étudiants :

- Comment avez-vous trouvé l'idée de votre projet ?
- Quelles sont les compétences que vous avez acquises durant le projet ?
- Comment l'activité vous a-t-elle aidé à mieux assimiler les concepts du cours de mécanique de solides ?
- Comment évaluez-vous l'organisation de l'activité ?
- Quelles sont les difficultés rencontrées tout au long de l'activité ?
- Quelles sont vos propositions pour l'amélioration de l'activité ?

Nous présentons dans ce qui suit des commentaires communs des étudiants :

- Le fait de travailler en équipe m'a poussé à être plus créatif et à faire de mon mieux pour résoudre les problèmes.
- Des fois, nous avons besoin de plus de matériel pour la réalisation du prototype, ce qui nous a rendu la tâche un peu plus difficile.
- *Enjoyeering Junior* m'a donné une idée claire sur le métier d'ingénieur designer.

- C'est la première fois qu'on me donne la possibilité de mettre en pratique ce que j'apprends en classe !
- *Enjoyeering Junior* a été une opportunité pour nous de mieux comprendre les concepts du cours de mécanique de solides.

VI-6-2 -2 Evaluation quantitative :

Pour l'évaluation quantitative, des questionnaires anonymes ont été donnés aux étudiants pour collecter leurs feedbacks (Annexe 5). Pour cela, les étudiants ont été tenus de noter l'acquisition de leurs compétences pendant l'activité. Nous avons signalé aux étudiants qu'il n'existe pas de « bonnes » ou « mauvaises » réponses, et que l'objectif du questionnaire est de nous fournir des feedbacks pour d'éventuelles améliorations de l'activité *Enjoyeering Junior*.

La 1^{ère} section du questionnaire concerne les connaissances de base du processus de design d'ingénierie. Nous avons posé aux étudiants des questions relatives à leurs habiletés à bien définir un problème, à générer des idées et choisir le bon concept, et finalement à prototyper le concept choisi et l'améliorer.

Dans la 2^{ème} section du questionnaire, les compétences de résolution de problèmes sont évaluées en profondeur, incluant les habiletés à chercher et collecter les informations, l'habileté à décomposer le problème en des sous-problèmes et voir le problème de différentes perspectives, l'habileté à considérer différentes alternatives, et finalement l'habileté à prioriser les solutions dans le but de converger vers une seule et unique solution.

La 3^{ème} section du questionnaire concerne les compétences techniques relatives aux objectifs du cours de mécanique de solides. Dans cette section, les étudiants répondent à des questions concernant leur compréhension de mécanismes et des concepts d'analyse cinématique et cinétique, leurs habiletés à faire des dessins et des modèles en 2D pour visualiser le système mécanique et simuler son mouvement, et finalement leurs habiletés à choisir le matériel adéquat pour construire un prototype et le contrôler par la plateforme Arduino.

Finalement, la 4^{ème} section du questionnaire aspire à évaluer les compétences transverses acquises pendant l'activité. Dans cette section, nous avons demandé aux étudiants d'évaluer leurs habiletés à décrire un problème oralement et par écrit et le présenter publiquement, leurs habiletés à travailler collaborativement avec les autres membres de l'équipe et tolérer leurs idées, et finalement leurs habiletés à prendre des décisions individuelles ou en groupe.

Les figures ci-dessous montrent les résultats obtenus après l'analyse des données obtenus des questionnaires. Pour chaque question, une moyenne a été calculée. L'activité *Enjoyeering*

Junior a été un bon environnement pour l'acquisition des compétences relatives au processus de design d'ingénierie (Figure 60.a), particulièrement les habiletés relatives à la génération d'idées et au prototypage. Les données collectées de la seconde section du questionnaire montrent un bon développement des compétences en résolution de problèmes (Figure 60.b). En effet, les problèmes de design que les étudiants résolvent dans leurs projets ne sont pas bien définis ; et leur nature de problèmes mal structurés pousse les étudiants à générer diverses solutions avant de choisir la meilleure. Par conséquent, le processus de résolution de problèmes présent dans l'activité *Enjoyeering Junior* est une opportunité pour les étudiants pour développer leurs compétences en pensée divergente et convergente.

Concernant les compétences techniques, l'activité a aide les étudiants à mieux comprendre les concepts du cours de mécanique de solides. En effet, il est clair sur la Figure 60.c que l'activité a été une occasion pour les étudiants de mieux comprendre les mécanismes et leur fonctionnement, ainsi que les concepts reliés à l'analyse cinématique et cinétique. Plus que cela, le dessin des mécanismes et leur simulation avec le logiciel Working Model 2D permet aux étudiants de développer leurs compétences en modélisation et visualisation des systèmes. La 3^{ème} phase du projet a aussi été une opportunité pour les étudiants de développer une expertise reliée au choix de matériaux pour la construction de prototypes, et une expérience en contrôle de systèmes mécaniques par Arduino. Finalement, l'activité a amélioré d'une manière significative les compétences transverses des étudiants telles que le travail collaboratif et la prise de décision (Figure 60.d).

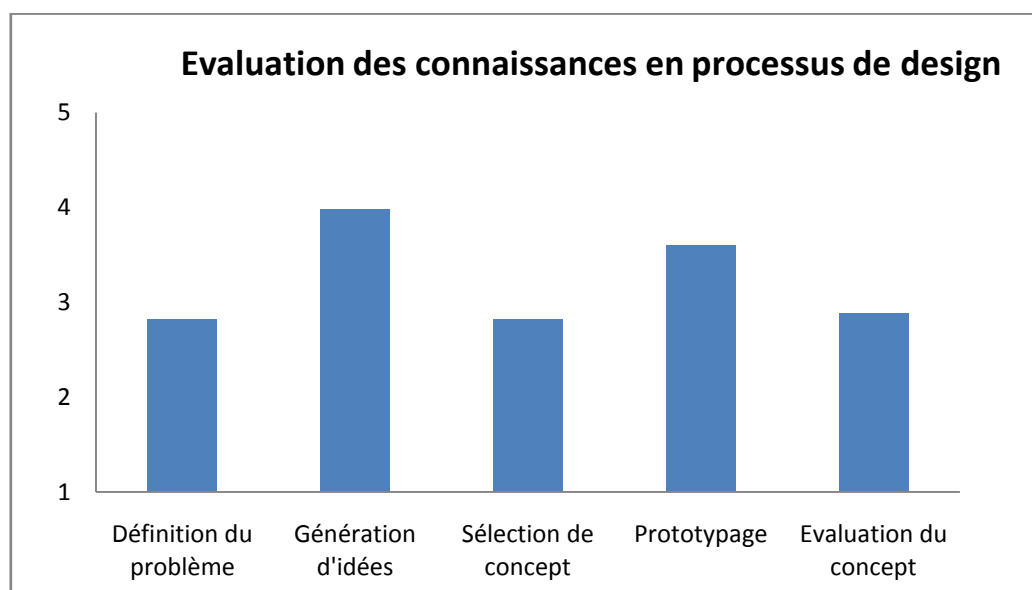


Figure 60.a : Evaluation de l'acquisition des connaissances en processus de design

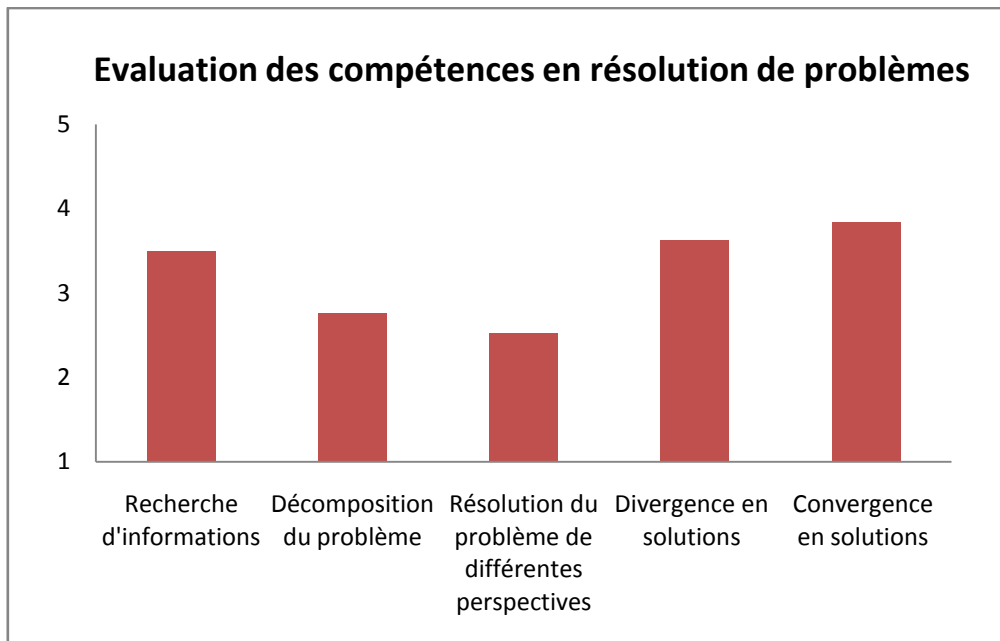


Figure 60.b : Evaluation de l'acquisition des compétences en résolution de problèmes

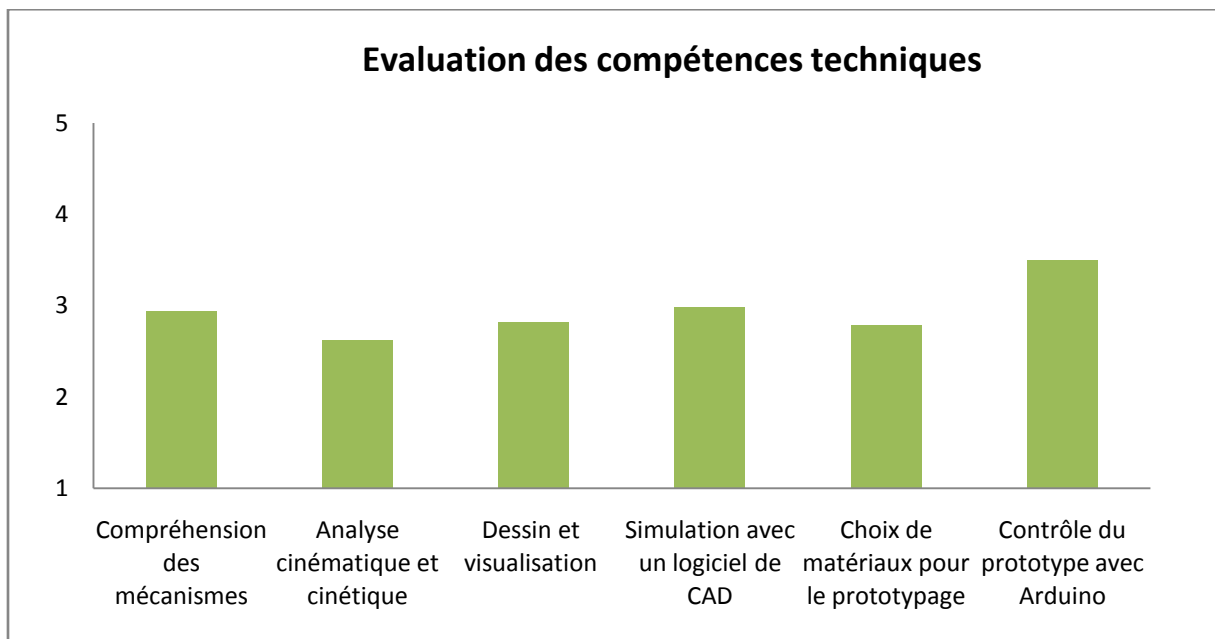


Figure 60.c : Evaluation de l'acquisition des compétences techniques

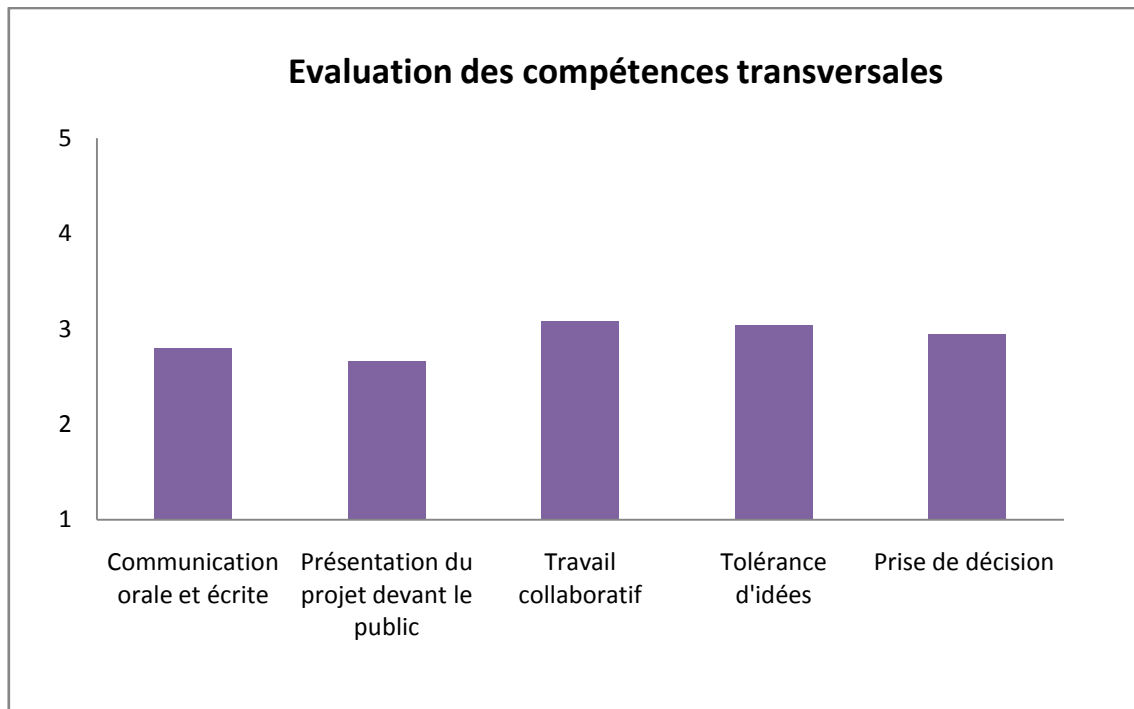


Figure 60.d : Evaluation de l'acquisition des compétences transversales

VI-7 Conclusions et perspectives

Enjoyeering Junior est un projet conçu et implémenté dans la formation d'ingénierie mécanique comme une part intégrale d'un cours de mécanique de solides, pour introduire les étudiants de 2^{ème} année au design d'ingénierie. Le projet a été structuré de manière d'engager les étudiants dans une expérience pratique de design et de réalisation de systèmes mécaniques en mouvement, tout en utilisant des technologies non coûteuses.

L'évaluation du projet a montré une amélioration des connaissances en processus de design et des compétences en résolution de problèmes, ainsi qu'un renforcement des compétences techniques relatives aux objectifs du cours de mécanique de solides. Le projet a eu de même un impact positif sur le développement des compétences des étudiants en travail collaboratif et communication.

Finalement le coût du matériel utilisé, la durée du projet, ainsi que les ressources humaines impliquées sont très raisonnables, ce qui rend le projet particulièrement adapté aux institutions à ressources limitées, spécialement celles des pays émergents ou en voie de développement.

CHAPITRE VII

Conception et implémentation du projet :

Enjoyeering Senior



VII-1 Introduction

Les ingénieurs d'aujourd'hui fraîchement diplômés sont censés avoir les compétences du 21^{ème} siècle, à savoir des compétences en résolution de problèmes, et une capacité à faire le design et le développement de produits innovants.

Dans ce chapitre, nous présentons un projet pionnier intitulé *Enjoyeering Senior*, conçu et implémenté au sein du département de mécanique de la Faculté des Sciences et Techniques de Fès. Ce projet aspire à équiper les élèves-ingénieurs de compétences en design et innovation, tout en étant implémenté facilement dans un contexte de contraintes de ressources.

Pour réaliser ces objectifs, le projet guide les étudiants à travers l'utilisation d'un processus personnalisé de design intégrant design de produit et business model, ainsi qu'une variété d'outils de prototypage non coûteux.

VII-2 Le projet *Enjoyeering Senior*

Dans le projet *Enjoyeering Senior*, les étudiants sont tenus d'appliquer le processus de design d'ingénierie pour le développement d'un prototype de produit basé sur des plateformes hardware non coûteuses, afin de répondre à une opportunité bien identifiée. Les étudiants ont été encouragés de travailler sur un thème intitulé « Open Labs », où ils doivent faire le design et le développement de produits éducatifs destinés à illustrer des expériences de différentes disciplines telles que les sciences physiques, la chimie, la médecine, ainsi que l'ingénierie mécanique et mécatronique.

VII-3 Processus personnalisé basé sur le design pour le projet *Enjoyeering Senior*

Les objectifs identifiés précédemment, incluant les compétences critiques et les facteurs clés pour une implementation réussie, ont été le fondement de base pour le développement de l'activité *Enjoyeering Senior*.

Comme il a déjà été expliqué, les compétences ciblées peuvent être vues comme des compétences associées provenant de 2 phases : une phase de découverte d'opportunité (business) et une phase de développement de produits. Par conséquent, la meilleure façon d'acquérir ces compétences est à travers la pratique d'un processus de design intégré qui va de

l'identification d'opportunité à la réalisation d'un prototype tangible. Dans cette perspective, la première étape dans ce projet a été de proposer un processus personnalisé de design intégrant business (identification d'opportunités) et design de produit. Ce processus doit inclure toutes les étapes nécessaires pour une vue holistique de business-produit combinée avec les meilleurs outils et pratiques établis pour chaque étape.

Dans le contexte du projet proposé, les étudiants en ingénierie sont tenus de suivre des directives bien déterminées. Ces directives sont tirées d'une boucle itérative basée sur un processus personnalisé de design de produits que nous avons conçue pour ce projet. Cette boucle personnalisée, présentée sur la Figure 61 et détaillée sur la Figure 62, commence de la découverte de produit au prototypage de produit.

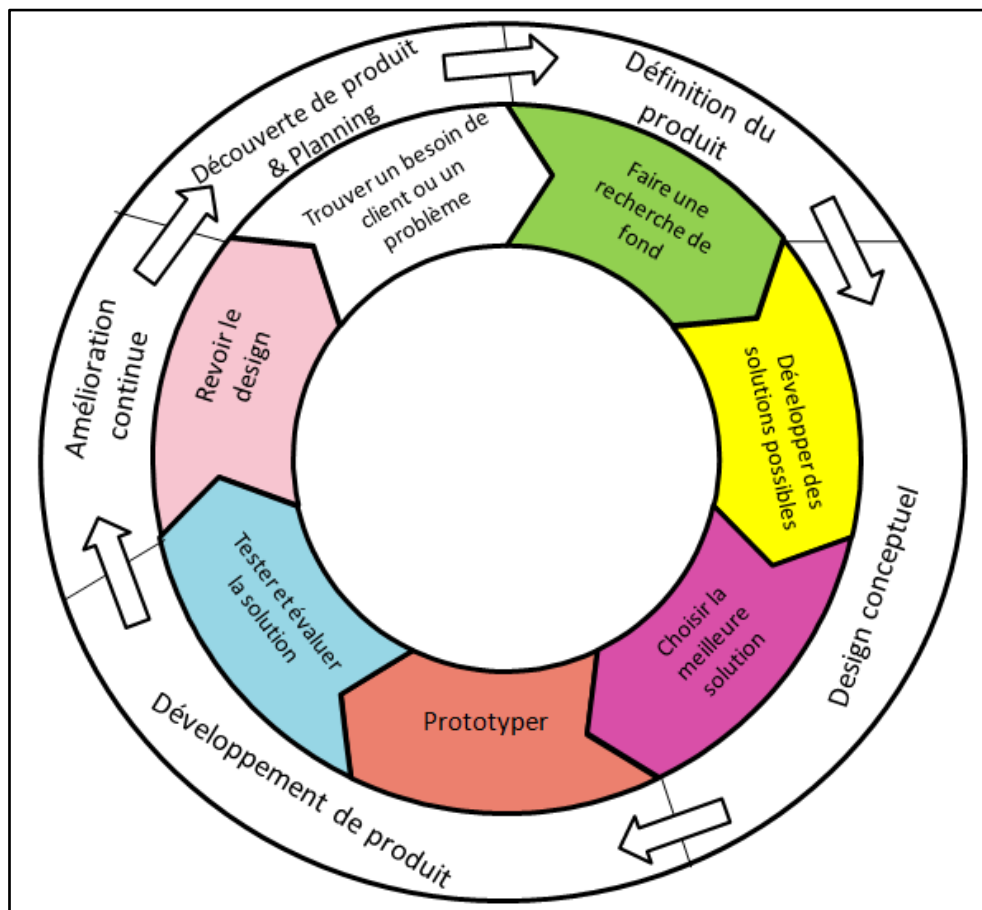


Figure 61 : Boucle du projet de design [Source : Notre recherche]

Dans la 1^{ère} phase : Découverte de produit et planning (Product Discovery and planning), les étudiants en ingénierie sont poussés à explorer des opportunités et démontrer un business

model viable. Le Business Model Canvas (Osterwalder and Pigneur 2010) a été choisi comme l'outil adéquat pour réaliser cet objectif. En se basant sur les différents blocs du business model canvas, les étudiants établissent un planning pour les étapes suivantes de design et développement de produit sous forme d'une charte de Gantt.

Dans la phase de définition de produit (Product Definition), les étudiants doivent lister les exigences les plus importantes du client, et les évaluer par ordre d'importance. Ces exigences deviennent des fonctions et sont par conséquent organisées selon un diagramme FAST (Function Analysis System Technique). Ce diagramme est une représentation qui organise les fonctions de produits graphiquement, et permet une compréhension claire du problème et des exigences client.

Par la suite, les étudiants traduisent ces exigences client ou « fonctions » en des objectifs mesurables de design, appelés aussi « spécifications d'ingénierie » tels que le poids, la taille, le coût, le moment, etc. Pour identifier les spécifications d'ingénierie critiques nécessaires à la réalisation des exigences du client, la technique de Déploiement de la fonction qualité (QFD) (Hauser and Clausing 1988) est utilisée, en particulier sa 1^{ère} matrice appelée la « maison de qualité » (House of Quality HOQ). Afin de construire cette matrice HOQ, les étudiants commencent par donner des poids aux relations existantes entre les exigences du client et les spécifications d'ingénierie, et établissent la nature des interrelations entre les différentes spécifications d'ingénierie. De même, les étudiants font des comparaisons entre les exigences du client et les spécifications d'ingénierie, en analysant des produits similaires déjà existants. L'analyse de la matrice HOQ permet aux étudiants d'avoir des informations relatives au design, incluant les spécifications critiques d'ingénierie qui permettront le succès du produit.

Une fois que la phase de définition du produit est terminée, les étudiants passent à la phase de design conceptuel, où ils doivent générer et évaluer des concepts innovants du produit en se basant sur les fonctions du produit précédemment établies ainsi que sur les spécifications critiques d'ingénierie. Ils peuvent utiliser des techniques comme l'analyse morphologique pour générer un nombre de sous-concepts possibles pour les exigences du client, et les combiner par la suite afin d'obtenir des concepts globaux de produit. La matrice Pugh (Pugh 1991) peut ensuite être utilisée pour évaluer et améliorer les différents concepts, et sortir avec un concept supérieur de produit.

La phase de Développement de produit (Product Development) est la phase où les étudiants peuvent finalement travailler sur leurs solutions choisies. Les outils de prototypage et d'analyse sont utilisés par les étudiants pour simuler leur système robotique et voir comment il interagit avec son environnement. Quand le prototype réel est finalement construit, les outils

de programmation sont utilisés pour contrôler le système robotique et lui permettre de réaliser les objectifs désirés.

Si les étudiants trouvent qu'il est nécessaire de faire des changements à n'importe quelle phase du processus afin de raffiner leur design, ils peuvent itérer la boucle autant de fois qu'ils le veulent.

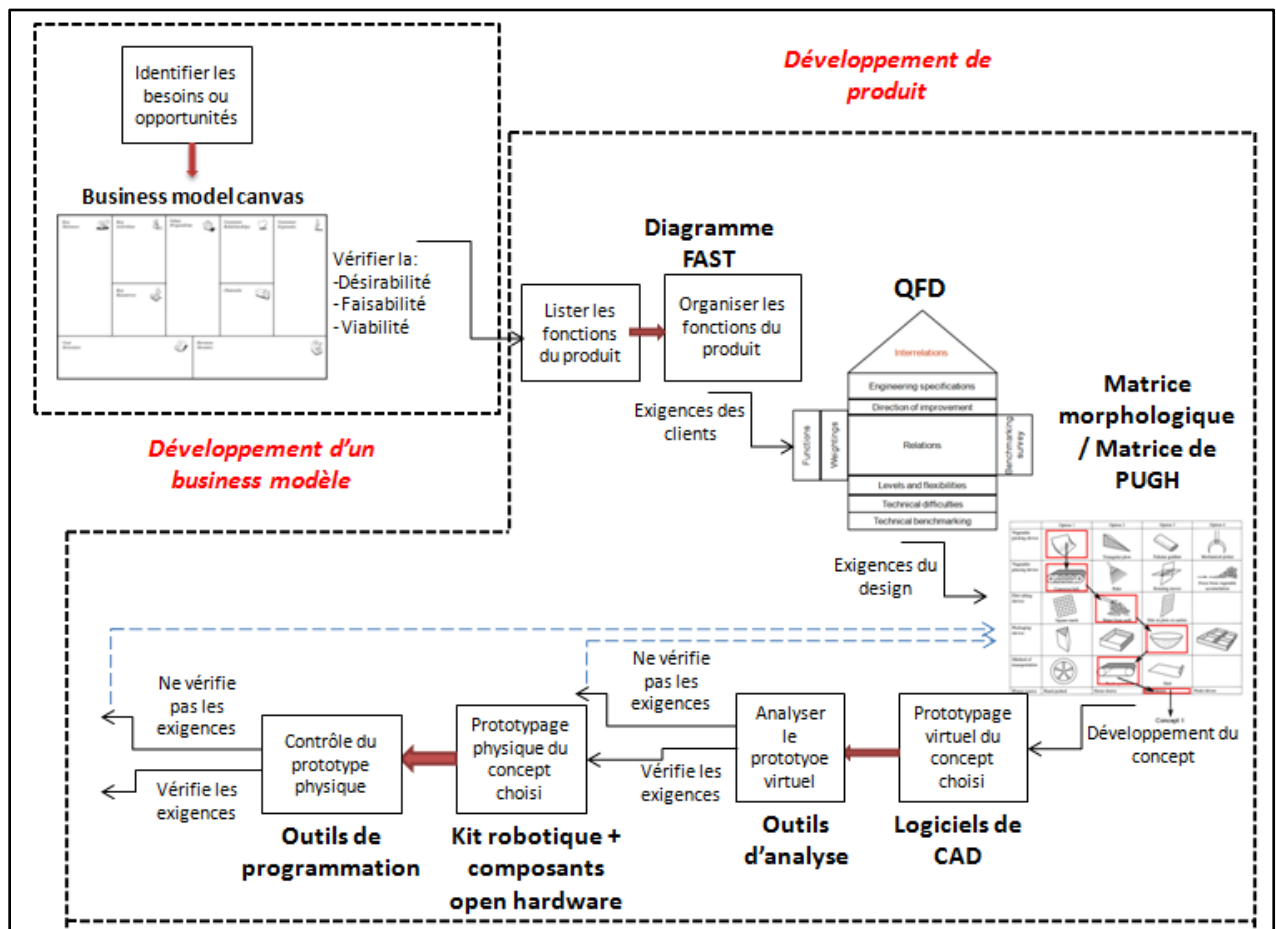


Figure 62 : Carte détaillée du processus de design proposé [Source : Notre recherche]

VII-4 Outils utilisés

Pour l'étape du prototypage virtuel, des outils de conception assistée par ordinateur (CAD) sont utilisés.

De nos jours, les outils de conception assistée par ordinateur CAD sont inévitables pour le prototypage numérique, l'analyse en ingénierie et le manufacturing. Ils permettent aux ingénieurs de créer virtuellement et analyser interactivement le produit mécanique dans son environnement d'exploitation, sans l'utilisation nécessaire de prototypes physiques. Par

conséquent, c'est devenu une nécessité pour les étudiants en ingénierie de maîtriser les outils de CAD. Les logiciels de CAD les plus célèbres en industrie et en éducation sont les logiciels Catia et Solidworks de Dassault Systems.

Pour l'étape du prototypage physique, les étudiants peuvent avoir recours au kit robotique Lego Mindstorms NXT, à la plateforme électronique Arduino, et à différentes composants mécaniques (moteurs, capteurs,...)

VII-5 Implémentation du projet *Enjoyeering Senior*

VII-5-1 Organisation et formations :

L'activité *Enjoyeering Senior* occupe 60 heures, à raison d'une séance de 4 heures par semaine, pour un effectif d'approximativement 30 étudiants ayant participé ou pas aux activités précédentes *Enjoyeering Freshman* et *Enjoyeering Junior*. Les kits de Lego Mindstorms sont donnés aux étudiants au début du projet, de même que le microcontrôleur Arduino, les actionneurs et les capteurs. Les étudiants peuvent aussi avoir recours à du matériel usuel.

Pour aider les étudiants et leur permettre d'acquérir de la connaissance au préalable et s'initier à l'aspect pratique du projet, des formations autour des outils clés du projet sont données au début du projet.

VII-5-1-1 Formation en Business Model Generation:

Le livrable final de chaque projet de développement de produits est un prototype fonctionnel qui répond à un besoin de client. En fait, le développement de produits n'est pas uniquement un processus de design, c'est aussi un problème de marketing (Ulrich and Eppinger 2008), et les étudiants doivent comprendre que leur prototype doit être celui d'un produit qui peut être mis sur le marché par la suite. Pour cela, une formation préliminaire en Business Model Generation (Osterwalder and Pigneur 2010) est donnée aux étudiants au début du projet, afin de les introduire au Business Model Canvas. Le Business Model Canvas est un outil de management stratégique et d'entrepreneuriat, ainsi qu'une charte visuelle possédant des éléments pour décrire principalement la valeur proposée d'un produit, ses clients, ses revenus, ses ressources et activités clés et ses coûts. Les étudiants doivent itérer autant de fois que nécessaire leur canevas afin de clarifier les besoins des clients et proposer des solutions

innovantes. Le business model canevas est un outil intéressant de créativité dans la mesure où il guide les étudiants à travers la découverte de nouvelles opportunités en considérant le produit du point de vue client. Finalement, le business model canevas permet aux étudiants de développer leur capacité de visualisation, lorsqu'ils utilisent des images et des croquis et organisent leurs propositions d'idées.

VII-5-1-2 Formation en Lego Mindstorms NXT et Arduino :

Une formation de 4 heures en Lego Mindstorms NXT est proposée au début du projet. 2 heures sont suffisantes pour introduire les étudiants au hardware, et un premier prototype de robot est construit. Les 2 heures suivantes sont dédiées à l'introduction des étudiants à l'environnement graphique NXT-G développé par NI Labview. Les étudiants commencent alors par écrire des programmes pour leur robot déjà construit, les exécutent en temps réel et les modifient au fur et à mesure pour réaliser les tâches désirées.

De même, une formation de 4 heures en Arduino est proposée au début du projet. Les étudiants sont introduits à la plateforme Arduino, et un premier programme pour allumer et éteindre une Led est exécuté. Une fois que les étudiants sont familiarisés avec les programmes basiques, un programme plus complexe pour faire tourner un moteur est par la suite réalisé.

VII-5-1-3 Formation en contrôle et simulation par Matlab et Simulink :

4 heures de formation en Matlab et Simulink sont données aux étudiants. Le fait d'utiliser Matlab dans le projet proposé a été guidé par deux raisons. Au début, Matlab est un logiciel très populaire dans le domaine d'ingénierie, et qui est adopté par plusieurs institutions d'ingénierie pour sa capacité à traiter des problèmes réels d'ingénierie dans un environnement favorable. Matlab possède une variété de boîtes à outils, chacune avec une application bien spécifique en ingénierie. D'autre part, Matlab supporte des progiciels pour les plateformes Lego Mindstorms NXT et Arduino. En fait, une boîte à outils pour Matlab a été développée à la Faculté d'ingénierie électrique à l'université RWTH Aachen (Behrens et al. 2008). Cette boîte à outils est intégrée dans Matlab, et permet de contrôler les moteurs du robot Mindstorms ainsi que ses capteurs, via un câble USB ou une connexion Bluetooth. En utilisant la boîte à outils RWTH-Mindstorms NXT, les étudiants peuvent développer un programme pour contrôler en temps réel leur robot Mindstorms d'une manière interactive, et

par suite, visualiser et analyser les données des moteurs et des capteurs. De même, avec Simulink, les étudiants peuvent appliquer les techniques du Model-Based Design pour vérifier leurs algorithmes pendant la simulation avant de les exécuter comme applications en temps réel sur la brique NXT (Figure 60). De la même manière, Matlab et Simulink peuvent aider les étudiants à réaliser des projets avec Arduino. Arduino peut être utilisé en combinaison avec différents capteurs et actionneurs pour contrôler des parties du système, et Matlab permet l'analyse et la visualisation des données à travers ses fonctions de traçage intégrées. De cette manière, Arduino peut être considéré comme un excellent environnement pour l'introduction des étudiants à la conception innovante, et l'amélioration de leurs compétences en programmation (Rubio et al. 2013).

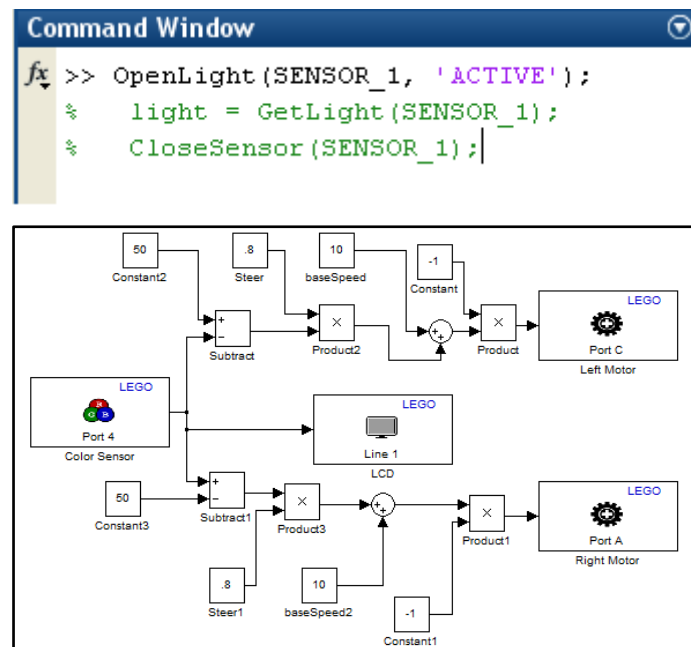


Figure 63 : (En haut) Exemple d'un code Matlab utilisant une fonction pour la lecture d'un capteur de lumière, (En bas) Exemple d'une modélisation sur Simulink pour la programmation d'un capteur de couleur (*Running Simulink models on Lego Mindstorms NXT <http://blogs.mathworks.com/simulink/>*)

VII-5-1-4 Formation en prototypage virtuel :

Les étudiants sont libres de choisir l'un des logiciels Catia ou Solidworks pour réaliser des prototypes virtuels de leurs systèmes robotiques. Ces 2 logiciels de CAD sont adoptés ici pour le prototypage virtuel et l'analyse dynamique des systèmes robotiques des étudiants. D'une part, c'est une approche basée sur le projet pour améliorer la compétence des étudiants en

Catia et Solidworks en utilisant les briques LEGO existantes dans le catalogue 3D LEGO ; de cette manière, les étudiants apprennent l'utilisation de Catia et Solidworks dans une expérience virtuelle agréable et créative. D'autre part, le modèle virtuel du robot Mindstorms est plus qu'une animation géométrique ; il reproduit le comportement réel de la géométrie, et donne les paramètres d'entrée ainsi que les informations concernant les capteurs et les moteurs en temps réel (Figure 64).

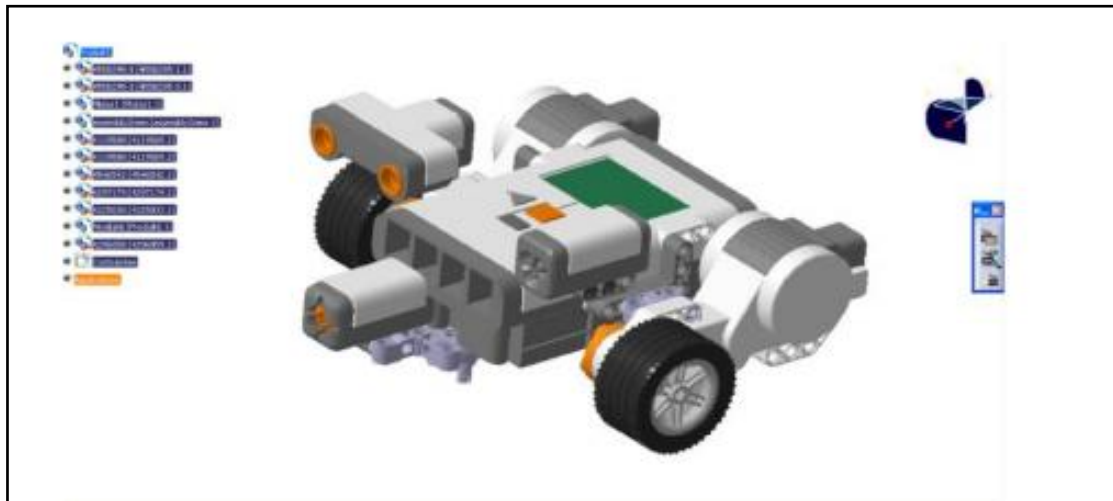


Figure 64 : Prototype virtuel du robot Mindstorms dans Catia V5R19 [Source : Notre recherche]

VII-5-2 Exemples de projets des étudiants :

Le projet proposé a été implémenté 4 fois à la Faculté des Sciences et Techniques de Fès, en 2013, 2014, 2015 et 2016. Dans chaque édition, les étudiants ont été divisés en 5 équipes de 5, et ont travaillé sur le design et développement d'applications robotiques innovantes qui répondent à des besoins réels de clients. Il est important de signaler qu'en 2015 et 2016, quelques projets ont été réalisés en collaboration avec la Faculté de Médecine de Fès, et les étudiants ont été inspirés par les besoins réels du centre hospitalier universitaire.

Ci-dessous des exemples de projets développés par les étudiants des éditions 2014 et 2015.

- Un prototype de robot pour l'analyse de sang, combiné avec une centrifugeuse, et dédié pour les expériences dans les laboratoires de biologie (Figure 65).
- Un prototype d'une machine CNC pour illustrer les opérations de tournage et fraisage (Figure 65).

- X-Perator, une plateforme robotique pour enseigner le mouvement, la vitesse et l'accélération aux étudiants de lycée.
- Un prototype d'une machine de perçage pour la réalisation de circuits imprimés basiques.
- Un prototype d'un banc d'essai de fatigue pour illustrer l'expérience de la flexion rotative, dédié pour les élèves-ingénieurs en mécanique.
- Un robot pour le positionnement et le maintien de la caméra d'endoscope pendant une opération chirurgicale.
- Un système automatisé pour le nettoyage et la désinfection d'endoscopes flexibles.

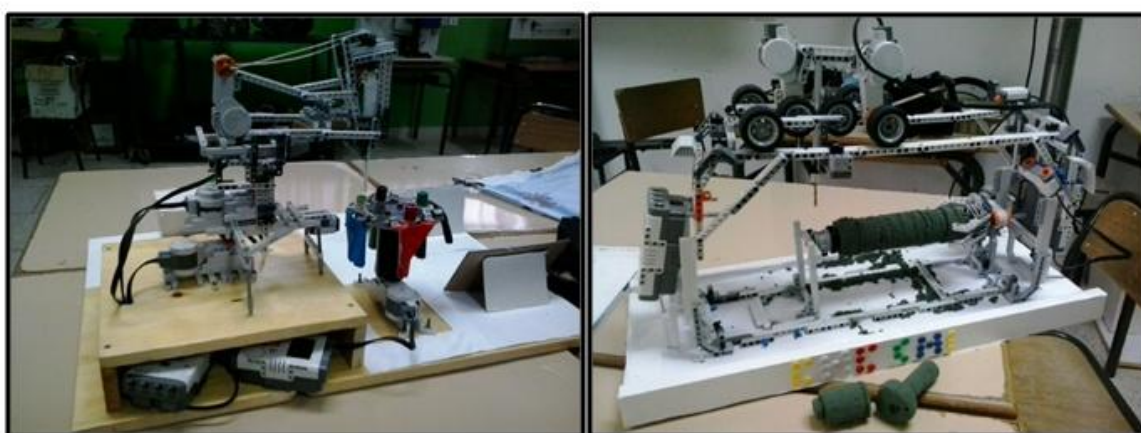


Figure 65 : Exemples de prototypes développés par les étudiants avec Lego Mindstorms [Source : Notre recherche]

Dans l'annexe 6, nous présentons quelques unes des étapes suivies par une équipe pour le développement de leur projet réalisé en 2015 et qui est un système de nettoyage et désinfection d'endoscopes (Figures 66-77) – (Tables 25-26).

VII-6 Evaluation et résultats

VII-6-1 Evaluation de la performance des étudiants :

Le projet *Enjoyeering Senior* fait partie d'un cours, et donc la contribution de chaque étudiant doit être évaluée. Pour évaluer donc la performance des étudiants, nous nous sommes basés sur une évaluation individuelle et une évaluation de groupe.

VII-6-1-1 Evaluation de l'équipe :

L'évaluation de chaque équipe est réalisée tout au long du projet. Les étudiants sont contraints de fournir des mini-rapports de design à la fin des phases de définition de produit et de design conceptuel. Un rapport final est fourni à la fin de la phase de développement de produits et incluant les croquis, dessins, calculs, prototypes numériques, et codes de programmation, etc. Ces rapports de design servent de base pour évaluer si les étudiants ont compris le processus de design d'ingénierie à travers son application. Cela est possible grâce aux mesures d'évaluation établies pour chaque phase de design (Table 27). La note finale de chaque équipe G_{team} n'est autre que les notes d'évaluation de toutes les phases. Par exemple, pour la phase de définition de produit, les mesures sont relatives au nombre d'outils utilisés pour la collecte des besoins de clients, le nombre de besoins collectés, la qualité de structure fonctionnelle dans le diagramme FAST, le nombre et la qualité des spécifications d'ingénierie, etc.

Table 27 : Mesures d'évaluation pour chaque phase du processus de design

Phase du design	Mesures d'évaluation
Découverte de produit et planning	-Nombre de blocs remplis correctement sur le business modèle canevas.
Définition du produit	- Nombre de méthodes utilisées pour la capture des besoins de clients.
	- Nombre de besoins classifiés correctement selon le modèle de KANO.
	- Nombre de méthodes utilisées pour la recherche des fonctions du produit.
	- Nombre de fonctions générées.
	- Bonne organisation des fonctions selon le diagramme de FAST.
	- Nombre de spécifications d'ingénierie.
	- Précision et justesse des spécifications d'ingénierie.
	- Nombre de blocs remplis correctement dans la matrice QFD.
	- Précision et justesse des critères critiques

	obtenus de la matrice QFD.
Design conceptuel	- Qualité de la matrice morphologique.
	- Nombre de concepts générés.
	- Choix justifié du choix de concept selon la matrice de PUGH.

VII-6-1-2 Evaluation individuelle :

L'évaluation individuelle des étudiants inclut 3 parties : la note du contrôle, la note de l'examen final, et la note de la performance individuelle de l'étudiant calculée en se basant sur la méthodologie du *peer assessment*. Le contrôle et l'examen final incluent des questions concernant le projet de l'étudiant. Dans l'expérience du *peer assessment*, les étudiants sont tenus d'évaluer leurs collègues : une note supérieure pour les étudiants qui ont fait plus de travail, et une note inférieure pour les étudiants qui n'ont pas fourni beaucoup d'efforts. Cette méthode encourage les étudiants à faire de leur mieux pour être bien évalués par leurs pairs, et leur permet de développer une variété de compétences telles que le travail collaboratif, le jugement professionnel, la négociation et la conscience (Topping et al. 2000).

La note individuelle de chaque étudiant est formulée comme suit :

Individual Grade

$$= \frac{G_{\text{mid-term}} W_{\text{mid-term}} + G_{\text{final}} W_{\text{final}} + G_{\text{peer-assessment}} W_{\text{peer-assessment}}}{W_{\text{mid-term}} + W_{\text{final}} + W_{\text{peer-assessment}}}$$

Avec $G_{\text{mid-term}}$ est la note du contrôle avec un facteur $W_{\text{mid-term}}$, G_{final} est la note de l'examen final avec un facteur W_{final} , et $G_{\text{peer-assessment}}$ est la note de l'évaluation par pairs avec un facteur $W_{\text{peer-assessment}}$. Les facteurs ont été choisis respectivement comme 1,2 et 1.

Finalement, la note finale de chaque étudiant est formulée comme suit :

$$\text{Final Grade} = \frac{G_{\text{team}} W_{\text{team}} + G_{\text{ind}} W_{\text{ind}}}{W_{\text{team}} + W_{\text{ind}}}$$

Avec G_{team} est la note du groupe avec un facteur W_{team} , et G_{ind} est la note individuelle avec un facteur W_{ind} . Les facteurs ont été choisis respectivement comme 2 et 1.

VII-6-2 Résultats et discussion :

VII-6-2-1 Evaluation de l'acquisition des connaissances :

L'analyse des rapports des équipes nous a permis d'évaluer à quel point les étudiants ont compris le processus de design d'ingénierie, et à quel point ils l'ont bien appliqué dans leurs projets. En général, les équipes ont obtenu de bonnes notes (Figure 78), montrant ainsi une bonne assimilation du processus de design d'ingénierie. Cependant, il est important de noter une petite confusion des étudiants dans la phase de définition de produits. Au fait, nous avons noté une pauvre organisation des fonctions dans le diagramme FAST. En plus de cela, les étudiants ont montré une compréhension insuffisante des spécifications d'ingénierie et de la manière dont elles sont choisies. De même, le remplissage de la matrice QFD a aussi été un challenge pour les étudiants, du moment où ils n'ont pas pu bien remplir les différents blocs de la matrice.

Malgré cela, le projet a eu le mérite de développer les capacités des étudiants à traiter des problèmes d'ingénierie mal structurés. En effet, au lieu de choisir une solution unique à un problème bien défini, le projet guide les étudiants à travers la génération de concepts de solutions multiples et variés, et leur permet de schématiser et visualiser leurs idées. L'évaluation du nombre et l'originalité de concepts générés et visualisés – à travers les rapports des étudiants – a montré incontestablement que les étudiants ont développé d'une manière significative leur raisonnement divergent et leur pensée visuelle.

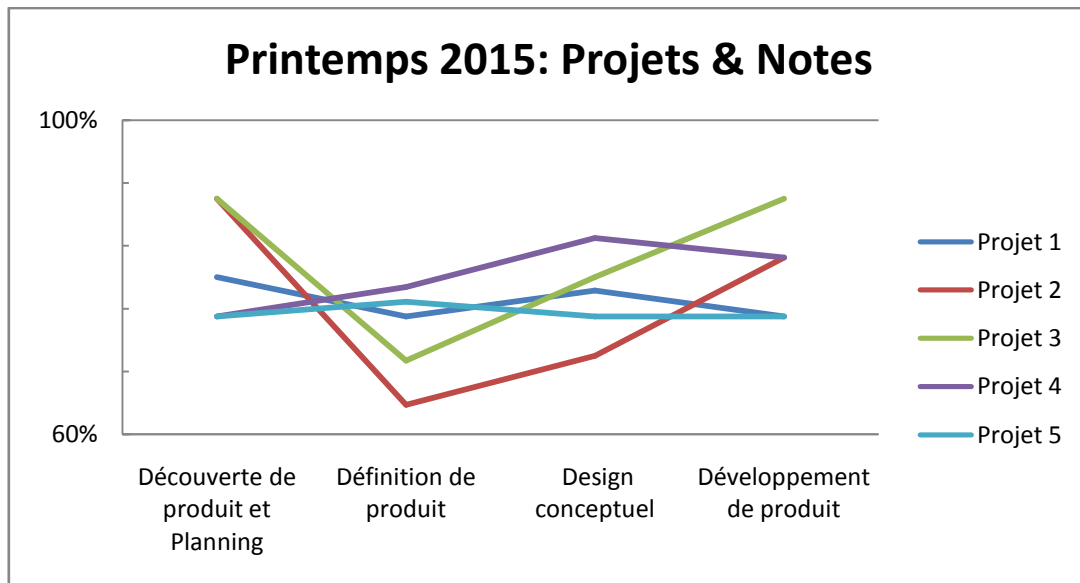


Figure 78 : Notes obtenues par les équipes (Edition 2015) dans chaque phase du processus de design [Source : Notre recherche]

VII-6-2-2 Evaluation de la pratique d'ingénierie :

Nous avons été particulièrement intéressés d'examiner l'impact du projet sur l'acquisition des compétences pratiques du point de vue des étudiants. Chaque année, les étudiants participent à une évaluation anonyme, où des questionnaires sont utilisés avant et après le projet pour évaluer le niveau des étudiants en CAD et en programmation. Pour les éditions 2013, 201 et 2015, nous avons noté (Figure 79) que le projet a réalisé un impact substantiel. En effet, le pourcentage des étudiants qui ont évalué leur niveau de CAD et programmation comme « bon » a augmenté d'une manière significative après le projet, ce qui peut être considéré comme un résultat positif. L'évaluation basée sur le questionnaire a été répétée après quelques mois, et le résultat est resté presque le même.

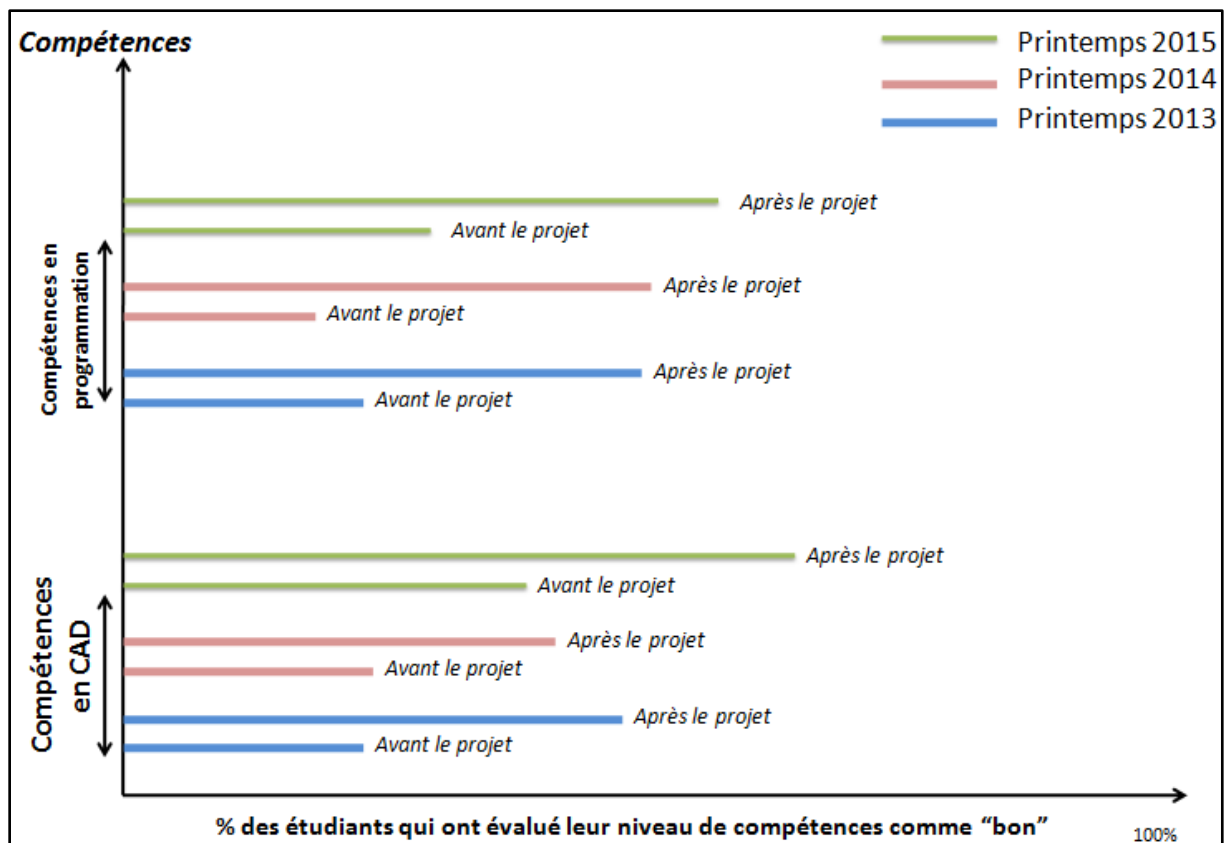


Figure 79 : Evaluation des compétences en CAD et programmation avant et après le projet [Source : Notre recherche]

VII-7 Conclusion et perspectives

La profusion des connaissances et technologies ouvertes nous offre une opportunité sans précédent pour améliorer notre système d'éducation d'ingénierie, particulièrement dans les pays émergents. Ces deux moteurs de changements ont été les premiers blocs dans le développement et l'implémentation du projet *Enjoyeering Senior*.

Le projet de design et développement de produits a été conçu et implémenté dans un curriculum d'ingénierie mécanique pour améliorer les capacités de design des étudiants, et a été structuré d'une manière rationnelle, ajustable et mesurable en se basant sur un cadre d'objectifs souhaités et un processus personnalisé de design. Le projet a aussi été adapté aux contraintes locales d'implémentation telles que les ressources humaines et financières.

Le projet a créé un environnement attractif d'apprentissage qui immerge les étudiants dans une expérience réelle de développement d'applications robotiques qui répondent à un besoin validé et en utilisant de la technologie non coûteuse. Au fait, les étudiants ont eu accès aux plateformes Lego Mindstorms et Arduino, ainsi que différents outils d'analyse tels que des logiciels CAD pour le prototypage virtuel, et Matlab pour la programmation. L'évaluation du

projet a montré une bonne assimilation du processus de design et un renforcement du raisonnement divergent, convergent et visuel des étudiants. Le projet a aussi amélioré d'une manière significative les compétences pratiques des étudiants à travers l'application d'outils d'ingénierie.

Ce projet peut être vu comme un premier pas pour le développement d'un projet holistique incluant business et design de produit, approprié pour les universités aux ressources limitées comme celles des pays émergents ou en voie de développement. Les améliorations de ce projet peuvent être explorées dans plusieurs directions, comme le développement de mesures de compétences plus élaborées, ou l'incorporation de concepts développés dans le domaine de l'innovation et l'entrepreneuriat.

CHAPITRE VIII

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES



VIII- 1 Conclusion générale :

Le travail développé dans le cadre de cette thèse résulte de notre ambition pressante de renforcer la capacité de conception et d'innovation technologique dans les curriculums d'ingénierie, particulièrement dans les pays émergents ou en voie de développement, afin de graduer des ingénieurs compétents capables d'innover et faire face aux challenges du monde actuel.

Les objectifs de la thèse ont été du nombre de trois, et ont été pleinement satisfaits à travers les différents chapitres. Le 1^{er} objectif était d'identifier les compétences que doivent développer les étudiants tout au long de leur cursus d'ingénierie pour être des ingénieurs compétents capables de concevoir des produits innovants.

Le deuxième objectif était de proposer des solutions pour faire acquérir aux étudiants ces compétences, tout en respectant les contraintes existantes dans le curriculum d'ingénierie au Maroc en particulier, et aux pays émergents ou en voie de développement en général. Le troisième objectif de cette thèse était de faire une première implémentation de ces solutions dans la formation d'ingénieurs en génie mécanique dans notre faculté pour évaluer leur efficacité et agir en conséquence.

Le processus de design a été l'outil de base utilisé pour atteindre ces 3 objectifs. En effet, la 1^{ère} phase du processus de design qui est l'analyse des besoins nous a permis de savoir que pour développer leur capacité d'innovation technologique, les étudiants sont tenus de développer 3 grands types d'habiletés à travers leur cursus, à savoir les connaissances en design et développement de produits, les compétences relatives au processus de design et développement de produit, ainsi que les compétences personnelles et interpersonnelles.

La méthode de l'analyse fonctionnelle nous a permis d'expliciter chaque catégorie d'habiletés, détailler les connaissances et les compétences, et déterminer les mesures pour évaluer l'acquisition de chaque type d'habileté. Les contraintes qui peuvent entraver l'implémentation de la solution ont aussi été identifiées dans cette phase, et incluent essentiellement des contraintes relatives au coût de la solution, à l'impact de la solution sur le curriculum, aux ressources humaines sollicitées, et à l'évaluation de la solution.

Le processus de design utilisé a finalement abouti au développement d'un premier concept intitulé *Enjoyeering*. Il s'agit d'un projet d'acquisition de compétences en conception et innovation technologique destiné à la formation de génie mécanique et qui englobe différents sous-projets adaptés pour chaque niveau du curriculum d'ingénierie mécanique.

Finalement, pour répondre au 3^{ème} objectif de la thèse, le concept *Enjoyeering* a été implémenté dans la formation d'ingénierie mécanique dans notre faculté.

Enjoyeering Freshman est un projet destiné aux étudiants de la 1^{ère} année du 1^{er} cycle où ils sont tenus de concevoir, de la manière la plus créative, une application robotique de leur choix qui résout clairement un problème particulier et répond à un besoin humain ou social, en se basant sur le processus du Design Thinking et sur la plateforme robotique ouverte et peu coûteuse : Lego Mindstorms NXT. Le projet *Enjoyeering Freshman* a pu introduire à un stade très précoce les étudiants aux problèmes d'ingénierie et à la connaissance du design grâce au processus du design thinking, et leur a permis de développer des compétences relatives au design telles que la résolution créative de problèmes, la génération d'idées et la génération de concepts, la sélection de concepts et le prototypage. Les étudiants ont aussi acquis une solide expérience en travail collaboratif et ont pu améliorer leurs compétences en communication orale durant les présentations de leurs projets.

Enjoyeering Junior est un projet destiné aux étudiants en 2^{ème} année du 1^{er} cycle où ils sont tenus de concevoir des systèmes mécaniques et contrôler leurs mouvements, en appliquant les concepts appris dans le cours de mécanique de solides, et en utilisant du matériel ouvert peu coûteux. Le projet *Enjoyeering Junior* a réussi à donner aux étudiants une solide expérience en design de systèmes mécaniques, et l'évaluation du projet a montré un impact positif sur le développement des compétences relatives au design, des compétences techniques relatives au cours de mécanique de solides, et des compétences en travail collaboratif et communication.

Finalement, *Enjoyeering Senior* est un projet destiné aux étudiants en dernières années d'ingénierie, où ils sont tenus d'appliquer le processus de design d'ingénierie pour le développement d'un prototype de produit basé sur des plateformes hardware non coûteuses, afin de répondre à un besoin de client. Le projet *Enjoyeering Senior* a réussi à immerger les étudiants dans une expérience réelle de développement de produits innovants, et l'évaluation a montré que le projet a permis d'améliorer les connaissances des étudiants en processus du design, et a permis de renforcer leurs compétences relatives au design telles que le raisonnement divergent, convergent et visuel. Finalement, le projet a aussi amélioré d'une manière significative les compétences pratiques des étudiants à travers l'application d'outils d'ingénierie.

D'une manière générale, le concept *Enjoyeering* a pu répondre aux objectifs principaux de cette thèse. D'une part, il a pu contribuer au développement d'habiletés qui vont permettre aux étudiants d'être de futurs ingénieurs capables d'innover, à savoir les connaissances en design d'ingénierie, les compétences relatives au processus de design, et les compétences

personnelles et interpersonnelles (Table 27). D'autre part, il a pu répondre aux contraintes locales d'implémentation, du fait que le coût du matériel utilisé, la durée du projet, ainsi que les ressources humaines impliquées ont été très raisonnables, ce qui nous pousse à penser fortement que la solution *Enjoyeering* est particulièrement adaptée aux institutions à ressources limitées, spécialement celles des pays émergents ou en voie de développement.

Table 27 : Tableau récapitulatif des projets Enjoyeering, leurs compétences visées et les résultats obtenus

Projet	Compétences ciblées			Résultats obtenus
	Connaissances en processus de design	Compétences relatives au processus de design	Compétences personnelles et interpersonnelles	
Enjoyeering Freshman	- Définition du problème - Génération de concepts - Sélection de concept - Prototypage	- Formulation du problème - Raisonnement divergent - Raisonnement imaginatif - Raisonnement visuel - Raisonnement qualitatif - Réalisation de prototypes	- Travail collaboratif - Communication orale et écrite - Communication visuelle - Prise de décision - Créativité	- Introduction à un stade très précoce des étudiants aux problèmes d'ingénierie et à la connaissance du design - Développement des compétences en : résolution créative de problèmes, génération d'idées, sélection de concept et prototypage.
Enjoyeering Junior	- Définition du problème - Génération d'idées - Sélection de concept - Prototypage - Evaluation de concept	- Recherche d'informations - Décomposition du problème - Résolution du problème de différentes perspectives - Raisonnement divergent - Raisonnement convergent - Compréhension des mécanismes - Analyse cinématique et cinétique - Dessin et visualisation - Simulation avec un logiciel de CAD - Choix de matériaux pour le prototypage - Contrôle du prototype avec Arduino	- Communication orale et écrite - Présentation du projet devant un public - Travail collaboratif - Tolérance d'idées - Prise de décision	- Amélioration des connaissances en processus de design et des compétences en résolution de problèmes. - Renforcement des compétences techniques en mécanique de solides. - Développement des compétences des étudiants en travail collaboratif et communication.
	- Définition du besoin de client - Définition du	- Formulation du problème - Raisonnement	- Communication orale et écrite	- Bonne assimilation du processus de design.

Enjoyeering Senior	produit et méthodes (e.g Analyse fonctionnelle / QFD) - Génération de concepts et méthodes (e.g Matrice morphologique) - Sélection de concept et méthodes (e.g Matrice de PUGH) - Analyse d'ingénierie et simulation (utilisation des outils d'ingénierie) - Prototypage (Choix de matériaux / Choix de matériel / Prototypage itératif)	divergent et convergent - Raisonnement imaginatif - Raisonnement visuel - Raisonnement qualitatif - Réalisation de prototypes - (Choix de matériaux / Choix de matériel / Prototypage itératif) - Communication de design	- Communication visuelle - Communication interdisciplinaire et interculturelle - Prise de décision - Créativité - Apprentissage continu	-Renforcement du raisonnement divergent, convergent et visuel des étudiants. - Amélioration des compétences pratiques en application des outils d'ingénierie (logiciels de CAD et programmation).
---------------------------	--	--	---	--

VIII- 2 Perspectives à court terme :

Les perspectives à court terme concernent principalement l'amélioration des projets *Enjoyeering* suite aux résultats d'évaluation faite pour chaque projet. Ces perspectives portent sur :

- La validation des résultats qualitatifs obtenus pour le projet *Enjoyeering Freshman* par des études quantitatives.
- L'incorporation de concepts et outils développés dans les domaines d'innovation et d'entrepreneuriat au niveau du projet *Enjoyeering Senior*.
- La proposition de formations plus ciblées concernant l'utilisation des outils d'ingénierie, et ce pour les 3 projets.
- Le développement de mesures d'évaluation plus élaborées afin d'évaluer l'acquisition des différentes habiletés au niveau des différents projets.

VIII-3 Perspectives à long terme :

Dans le travail effectué dans le chapitre 4 et implémenté dans les chapitres 5,6 et 7, nous avons essayé de répondre au problème identifié qui est celui de graduer des ingénieurs compétents capables d'innover.

Il s'agit d'un problème flou, complexe et surdéterminé par de multiples paramètres auxquels il n'existe pas de réponse unique ni de solution miracle. C'est pour cette raison que notre démarche de résolution pour analyser et gérer cette complexité a été d'utiliser ce que nous connaissons et maîtrisons et appliquer le processus de design d'ingénierie pour la résolution du problème.

Cette première phase nous a permis de développer une certaine maturité, et de déposer les bases de fondement d'un premier concept de solution. La figure 80 présente le processus de design que nous avons suivi pour développer le projet *Enjoyeering*.

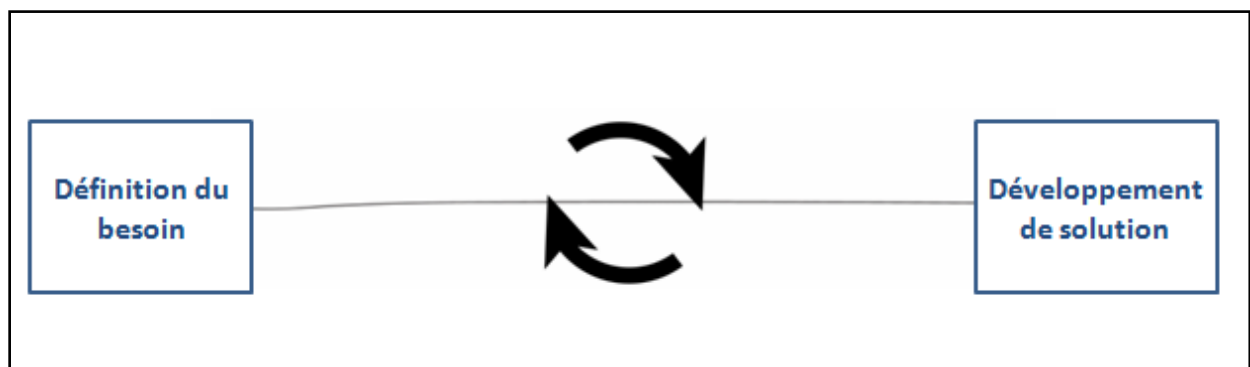


Figure 80 : Processus de design utilisé [Source : Notre recherche]

A travers ce processus, nous avons pu :

- Identifier les fonctionnalités clés d'une potentielle nouvelle solution.
- Identifier les contraintes qui doivent être prises en compte lors du développement de la solution.
- Caractériser ces fonctionnalités en déterminant les critères d'appréciation ou mesures d'évaluation de chaque fonction.
- Développer un premier concept de solution intitulé *Enjoyeering* qui aspire à développer la capacité d'innovation des étudiants tout au long du curriculum d'ingénierie. Ce premier concept a été prototypé et testé à travers les 3 projets *Enjoyeering Freshman*, *Enjoyeering Junior*, et *Enjoyeering Senior*. Cette première expérience nous a permis d'avoir un premier feedback des forces et faiblesses du concept *Enjoyeering*.

Graduer des ingénieurs compétents capables d'innover dans un contexte de pays émergents ou en voie de développement est un problème d'innovation. Et devant un problème d'innovation, l'ultime approche est d'utiliser un processus d'innovation.

Cependant, le processus d'innovation est beaucoup plus complexe et est loin d'être réduit à la linéarité rapportée sur la figure ci-dessus. En effet, le processus d'innovation ne fait pas intervenir que le processus de design et développement de solution, mais comporte une phase amont plus complexe et plus floue qui doit prendre en compte plusieurs autres paramètres relatifs généralement à l'acceptation de la solution par le marché et la société (Figure 81).

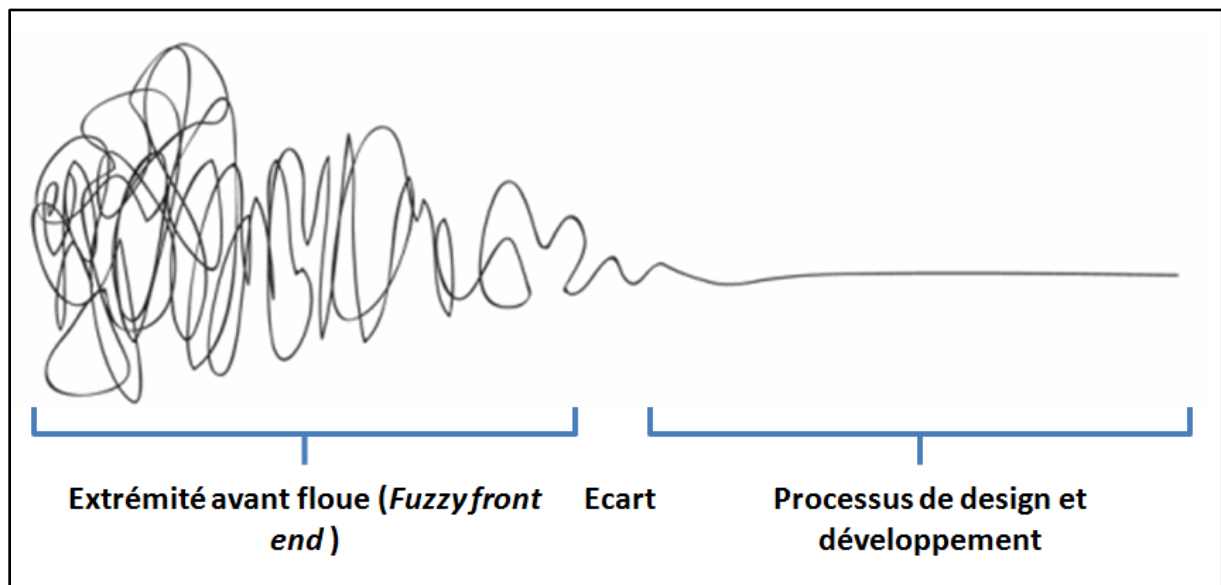


Figure 81 : Processus d'innovation

De ce fait, l'innovation peut être vue comme un objet qui commence petit, représentant une idée créative, un besoin ou un concept, et qui a besoin d'évoluer progressivement pour acquérir des éléments additionnels. Ces éléments concernent la valeur créée par la mise en place de la solution proposée, ainsi que le processus qui permet de capturer cette valeur et mesurer la pertinence de la solution proposée.

Nous proposons sur la figure 82 une illustration du processus d'innovation. Dans notre perspective, nous voyons l'innovation comme l'intersection de trois entités, à savoir la proposition de valeur, le processus de création de valeur, et le processus de capture de valeur.

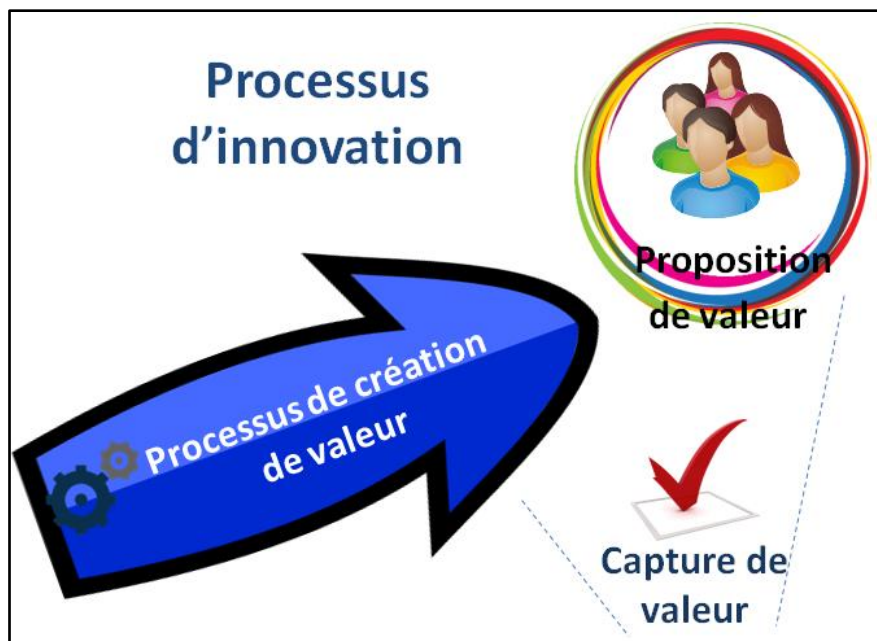


Figure 82 : Proposition d'illustration pour le processus d'innovation [Source : Notre recherche]

- La proposition de valeur est définie comme la validation de la solution proposée auprès des clients et parties prenantes, et la vérification de la pertinence de la solution proposée en termes de désirabilité de la part des différents segments de clients.
- Le processus de création de valeur est défini comme l'ensemble des moyens et outils qui permettent de développer cette solution.
- Le processus de capture de valeur est défini comme le processus qui permet d'évaluer systématiquement l'atteinte des objectifs fixés à travers la mise en place de la solution.

Dans notre cas, le processus de création de valeur est bien identifié ; il s'agit du processus de design d'ingénierie qui nous a permis de développer le concept *Enjoyeering*. Pour capturer cette valeur, on a eu recours à des mesures d'évaluation développées dans la phase conceptuelle du processus de design, et qui nous ont permis de savoir comment on peut s'assurer que notre solution a réalisé les objectifs fixés au préalable.

Cependant, pour achever le cycle d'innovation, la proposition de valeur doit être validée. C'est sur cette partie que nous devons porter notre intérêt et concentrer nos efforts.

Ainsi, nos perspectives futures de recherche consistent à développer un nouveau processus d'innovation beaucoup plus général, beaucoup plus systématique, et qui va nous permettre de

mettre en place un écosystème holistique d'innovation pour graduer des innovateurs, et qui va nous faire traverser d'une pensée déductive et linéaire, à une pensée inductive qui se base sur les expériences passées pour faire améliorer la solution proposée. Ce nouveau processus d'innovation va nous permettre de :

- intégrer la valeur ainsi que le processus de création de valeur en un seul processus.
- effectuer une itération systématique entre ces deux entités.
- incorporer les meilleures techniques et outils en matière d'innovation.

REFERENCES

A

- Andrew J.P., et al. "Innovation 2010, A Return to Prominence." Boston Consulting Group, April 2010.
- Abu-Mulaweh H.I. and Al-Arfaj A.A., "Engineering design experience of an undergraduate thermodynamics course", *World Transactions on Engineering and Technology Education*, 10(1): p. 77-81. 19, 2012.
- Amidon, D. The Innovation Highway. Boston: Butterworth-Heinemann, 2003.
- Al-Holou, et al. "First-Year Integrated Curricula across Engineering Education Coalitions," *Journal of Engineering Education*, Vol. 88, No. 4, 1999.
- Aglan H.A. and Ali S.F., "Hands-On Experiences: An Integral Part of Engineering Curriculum Reform", *Journal of Engineering Education*, 85(4): p. 327-330, 1996.
- Akins L. and Burghardt D., "Work in progress: Improving K-12 mathematics understanding with engineering design projects" In *Frontiers in education conference*, 36th annual. IEEE. 33, 2006.
- Apedoe X.S., et al., "Bringing engineering design into high school science classrooms: The heating/cooling unit", *Journal of Science Education and Technology*, 17(5): p. 454-465. 36, 2008.

B

- Benítez Molina, J.C., et al. « Youth Transition to the Labor Market in Morocco», International Policy Practicum of the Harris School of Public Policy at the University of Chicago, May 2014.
- Berglund A., "Assessing the Innovation Process of SMEs", Licentiate thesis, Luleå University of Technology Department of Business Administration and Social Sciences, 2007.
- Borrego M., and Bernhard J., "The emergence of engineering education research as an internationally connected field of inquiry", *Journal of Engineering Education*, 100(1), 14-47, 2011.
- Becker K., "High school student engineering design thinking and performance". Paper presented at the *meeting of the American Society for Engineering Education*, San Antonio, TX, 2012.

- Blumenthal P. and Ulrich G., “Developing Global Competence in Engineering Students: U.S. and German Approaches,” *Online Journal for Global Engineering Education*, Vol. 3: Iss. 2, Article 1, 2008.
- Badran, I., “Enhancing creativity and innovation in engineering education”. *European Journal of Engineering Education*, 32(5), 573-585, 2007.
- Bailey R. et al. “Assessing Student Learning about Engineering Design in Project-Based Courses”, Paper presented at the *American Society for Engineering Education Annual Conference*, Salt Lake City, Utah, June 20±23 2004.
- Black M. K., “An Industry View of Engineering Education,” *Journal of Engineering Education*, vol. 83, no. 1, pp. 26-28, 1994.
- Bean E., et al., “Introducing the Engineering Design Process to First Year Engineering Students”, *4th First Year Engineering Experience (FYEE) Conference*, Session F2C, Pittsburgh, PA, 2012.
- Blumenfeld P. C., et al., “Motivating project-based learning: Sustaining the doing, supporting the learning”, *Educational psychologist*, 26 (3-4), pp 369-398, 1991.
- Barron, B. J. S., et al., “Doing With Understanding: Lessons From Research on Problem- and Project-Based Learning.” *Journal of the Learning Sciences* 7(3-4): 271-311, 1998.
- Bell, S. “Project-Based Learning for the 21st Century: Skills for the Future”, *The Clearing House: A Journal of Educational Strategies, Issues and Ideas*, 83 (2). Pp 39-43, 2010.
- Brown T. “Design thinking”. *Harvard Bus Rev* ; 86: 84–92, 2008.
- Beer F.P., and Johanston E.R. “Mécanique pour ingénieurs”, Vol. 2, McGraw-Hill, 2009.
- Behrens, A., et al., “First Steps into Practical Engineering for Freshman Students Using Matlab and LEGO Mindstorms.” *Acta Polytechnica Journal of Advances Engineering* 48 (3): 44-49, 2008.
- Barfield C.E., et al., “Internet, Economic Growth and Globalization, Perspectives on the New Economy in Europe, Japan and the USA”, ISBN 978-3-540-00286-4, doi 10.1007/978-3-540-24761-6, 2003.
- Borcuch A., et al., “The Influence of the Internet on globalization process”, *Journal of Economics and Business Research*, ISSN: 2068 - 3537, E – ISSN (online) 2069 – 9476, ISSN – L = 2068 – 3537 Year XVIII, No. 1, pp. 118-129, 2012.

C

- Cox Review of Creativity in Business: building on the UK’s strengths, Sir George Cox 2005.

- Cooper R.G., “A process model for industrial new product development”, *IEEE Transactions on Engineering Management*, 30, 1: 2-11, 1983.
- Carlson, C. R., and Wilmot W. W., “Innovation: The Five Disciplines for Creating What Customers Want”, New York: Crown- Random House, 2006.
- Cooper, J. R., “A Multidimensional Approach to the Adoption of Innovation”, *Management Decision*, vol. 36, no. 8, pp. 493-502, 1998.
- Christensen, C. M. “The innovator’s dilemma: When new technologies cause great firms to fail”. Boston, Mass: Harvard Business School Press, 1997.
- Crawley, E. F., et al., “Educating engineers for research-based innovation – Creating the learning outcomes framework”, In *Proceedings of the 9th International CDIO Conference*, Cambridge, Massachusetts, 2013.
- Crawley, E. F., et al., « Rethinking Engineering Education: The CDIO Approach”. Boston, MA: Springer US, 2007.
- Clayton, G., et al., “Integrating design education across the curriculum using impromptu design projects”, In *ASEE Mid-Atlanta Section Conference*, Villanova, PA.24, 2010.
- Clayton, G., “Impromptu Design Exercises in an Introductory Mechanical Engineering Course”, *American Society for Engineering Education*, pp. 00740-12. 2012. p. 00740-00712, 2012.
- Cantrell, P., et al., “The effects of engineering modules on student learning in middle school science classrooms”, *Journal of Engineering Education*, 95(4): p. 301-309. 35, 2006.

D

- Dess G.G., and Picken J.C., “Changing roles: leadership in the 21st century”. *Organizational Dynamics*, Vol 28, No 3, 18–34, 2000.
- Dym, C. L., et al., “Engineering design thinking, teaching, and learning”. *Journal of Engineering Education*, 94(1), 104–120, 2005.
- Dunne D., and Martin R. “Design thinking and how it will change management education: An interview and discussion”, *Academy of Management Learning and Education*, 5(4), pp. 512-523, 2006.
- Dym C.L., “Teaching Design to Freshmen: Style and Content,” *Journal of Engineering Education*, Vol. 83, No. 4, pp. 303–310, 1994.
- Dutson A.J. et al., “A review of literature on teaching design through project-oriented capstone courses”, *Journal of engineering education*, 76(1), pp.17 – 28, 1997.

- de Graaff E., and Ravesteijn W., “Training complete engineers: global enterprise and engineering education”, *European Journal of Engineering Education*, 26(4), 419-427, 2001.
- Demel J.T., et al., “Changing the Core – Changing the Culture,” *Proceedings of the 1994 Frontiers in Education Conference*, p. 656-659, November 2-6, San Jose, CA, 1994.
- Danford, G. L., “Project-based Learning and International Business Education”, *Journal of Teaching in International Business*, 18 (1). pp 7-25.
- de Graaff, E., and Kolmos, A. “History of problem-based and project-based learning”, In *Management of change: Implementation of problem-based and project-based learning in engineering*. pp 1-8, 2007.
- Dyrenfurth M., “Systematic Globalization of the TLI degree experience: Transformative Implementation of Globalization – Developing Global Competence in Tomorrow’s Technology Leaders”, Unpublished position paper. West Lafayette, IN: Purdue University, College of Technology, Department of Technology Leadership and Innovation, 2014.

E

- Etkina E. and Heuvelen A.V., “Investigative science learning environment–A science process approach to learning physics”, *Research-based reform of university physics*, 2007.

F

- Friesen, M., et al., “A qualitative study of a course trilogy in biosystems engineering design”, *Journal of Engineering Education*, 94(3), 287-296, 2005.
- Frank M., “Implementing the project-based learning approach in an academic engineering course”, *International Journal of Technology and Design Education*, 13(3): p. 273-288, 2003.

G

- Goldberg D.E., “Change in Engineering Education: One Myth, Two Scenarios, and Three Foci,” IlliGAL Report No. 94003, Dept. of General Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, June 1994.
- Grose T. K., “Trouble on the Horizon”. *ASEE Prism*, Vol. 16 (2), pp. 26-31, 2006.
- Gülbahar Y., and Tinmaz H., “Implementing Project-Based Learning And E-Portfolio Assessment In an Undergraduate Course”, *Journal of Research on Technology in Education*, 38(3), 309-327, 2006.
- Gorman M.E., et al., “Teaching Invention and Design: Multi-Disciplinary Learning Modules”, *Journal of Engineering Education*, 1995. 84(2): p. 175-185.

- Gregson P. and Little T.A., “Using contests to teach design to EE juniors”. *IEEE Transactions on Education*, 42(3): p. 229-232, 1999.
- Goldman S, et al., “Destination, imagination & the fires within: Design thinking in a middle school classroom”. *Int J Art Des Educ*; 29: 37–53, 2009.
- Graham R., “Achieving Excellence in Engineering Education: The Ingredients of Successful Change”. Royal Academy of Engineering /MIT, ISBN 1-903496- 83-7, 2012.

H

- Hansen S. O., and Wakonen J., “Innovation, a winning solution ?, *International Journal of Technology Management*, 13, 345–58, 1997.
- Heitmann G., “Challenges of engineering education and curriculum development in the context of the Bologna process”, *European Journal of Engineering Education*, 30(4), 447–458, 2005.
- Heitmann G., “Accreditation and Quality Assurance of Engineering Education in Europe”, paper presented to *DAAD Workshop on Perspectives of German and American Exchange in Engineering Education*, Salt Lake City, 18.06.2004.
- Hirsch P.L, and McKenna A.F., “Using reflection to promote teamwork understanding in engineering design education”, *Int J Eng Educ* ; 24: 377–385, 2008.
- Hatchuel A., et al., “Teaching innovative design reasoning: How concept–knowledge theory can help overcome fixation effects”, *Art Int Eng Des, Ana Manuf* ; 25: 77–92, 2011.
- Hunter W., “Knowledge, skills, attitudes, and experiences necessary to become globally competent”, Unpublished doctoral dissertation, Lehigh University, Pennsylvania, 2004.
- Hoit M., and Ohland M., “The impact of a discipline-based introduction to engineering course on improving retention”, *Journal of Engineering Education*, January, 79-85, 1998.
- Hanney R., and Savin-Baden M., “The problem of projects: understanding the theoretical underpinnings of project-led PBL”, *London Review of Education*, 11 (1). Pp 7-19, 2013.
- Hadim H.A. and Esche S.K., “Enhancing the engineering curriculum through project-based learning”, In *Frontiers in Education*, FIE 2002. 32nd Annual. 2002.
- Howe S., and Wilbarger J., “National Survey of Engineering Capstone Design Courses”., *ASEE Annual Conference Proceedings*, Chicago, IL, Paper ASEE-2006-1781, 2006.
- Hong H. et al, “Capstone Design Projects at the Department of Mechanical and Industrial Engineering at Concordia University,” in *Proceedings of the Second CDEN International Conference*, 2005.
- Hibbeler RC. *Dynamics*, 12th edition, Prentice Hall, 2009.

- Hanrahan S.J., and Isaacs G., “Assessing Self- and Peer-assessment: the students’ views”, *Higher Education Research Development*, 20(1): 53-70, 2001.
- Hauser J. R. and Clausing D. P., “The House of Quality”. *Harvard Business Review*, **66**, 3, (May-June 1988), 63-73, 1988.
- Hagel J., and Brown J.S., “Globalization & Innovation: Some Contrarian Perspectives”, Prepared for the *Annual Meeting of the World Economic Forum* in Davos, Switzerland January 25 – 30, 2006.

I

Ijoui R., et al., “Globalization 2.0: a roadmap to the future from leading minds”, ISBN 978-3-642-44633-7, doi 10.1007/978-3-642-01178-8, 2010.

K

- Kelley, T. The art of innovation. London: Profile, 2001.
- Khandani S., “Engineering Design Process. 1st ed. [ebook] Available at: <http://www.saylor.org/site/wp-content/uploads/2012/09/ME101-4.1-Engineering-Design-Process.pdf>, 2005.
- Knight D. W., et al., “Improving engineering student retention through hands-on, team based, first-year design projects”, in *Proc. Int. Conf. Res. Eng. Educ.*, Honolulu, HI, 2001.
- Kolmos A., “Problem-Based and Project-Based Learning”. *University Science and Mathematics Education in Transition*, Springer US: 261-280, 2009.
- Kolodner J.L., “Facilitating the learning of design practices: Lessons learned from an inquiry into science education”, *Journal of Industrial Teacher Education*, 39(3). 32, 2002.
- Kwek D., “Innovation in the classroom: Design thinking for 21st century learning”, Master’s Thesis, Stanford University, 2011.
- Khalaf K., et al., “Engineering design education: When, what, and how”, *Adv Eng Educ* 3, 2013.
- Kauser J., et al., “Design and research Across the Curriculum: The Rowan Engineering Clinics”, *International Conference on Engineering Design*, Glasgow, Scotland, 2001.
- Kojmane J., Aboutajeddine A., “Strengthening engineering design skills of first-year university students under resources constraints”, *International journal of mechanical engineering education*, Vol. 44(2) 148–164, 2016.
- Kojmane J., Aboutajeddine A., “Enjoyeering Junior: A hands-on activity to enhance technological learning in an engineering dynamics course”, *Proceedings of the International*

Conference on Information Technology for organizations development, Fez, IEEEExplore Library, 2016.

L

- Lehmann, M., “Problem-oriented and project-based learning (POPBL) as an innovative learning strategy for sustainable development in engineering education”, *European Journal of Engineering Education*, 33 (3), pp 283-295, 2008.
- Njock L.J., “Integration of Design in the First Course in Fluid Mechanics: Experience and Evaluation”, *Proceedings of the 2002 American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition*, ASEE, 2002.
- Lockrey S. and Bissett J.K., “Designing pedagogy with emerging sustainable technologies”, *Journal of Cleaner Production*, 61 (0). Pp 70-79, 2013.

M

- Mills J. E., and Treagust D. F., “Engineering education – is problem-based or project-based learning the answer?”, *Australasian Journal of Engineering Education*, Online Publication 2003-04.
- Moore T. J., et al., “Building a framework to evaluate the inclusion of engineering in state K-12 STEM education academic standards”, Paper presented at the *American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition*, San Antonio, TX, 2012.
- McKenna A.F., et al., “IDEA: formalizing the foundation for an engineering design education”, *International Journal of Engineering Education*, 22(3): p. 671, 2007.
- Morgan A., “Theoretical Aspects of Project-Based Learning in Higher Education”, *British Journal of Educational Technology*, 14 (1). Pp 66-78, 1983.
- Miri S.M., and Fu R.J., “A hands-on practical approach to teaching engineering design. Education”, *IEEE Transactions on Education*, 36(1): p. 131-136, 1993.
- Morris E.T., and McAdams D.A., “A review of practical design integration methods for existing engineering curriculum”, *122nd ASEE Annual Conference & Exposition*, Seattle, WA, 2015.
- Meriam J.L., and Kraige L.G. *Engineering mechanics: Dynamics*”, 4th-5th and 6th edition, John Wiley & Sons Inc.

N

- NAE, “The engineering of 2020 – Visions of engineering in the new century”, Washington, D.C: The National Academies Press, 2004.
- NAS (National Academy of Sciences), *Rising above the gathering storm: energizing and employing America for a brighter economic future*, Washington, D.C: The National Academies Press, 2007.
- NAE, “The Bridge – Linking engineering and society”, 2013.
- Nicolai L.M., “Viewpoint: An industry view of engineering design education”, *International Journal of Engineering Education*, 14(1), 7–13, 1998.
- Nation M. L., ““Project-Based Learning for Sustainable Development”, *Journal of Geography*, 107 (3), pp 102-111, 2008.
- Newcomer J.L., “A design project based approach to teaching automatic control theory to mechanical engineers”, In *Frontiers in Education Conference, FIE’98*. 28th Annual. 1998.
- Nasr K.J., “Towards a converged and global set of competencies for graduates of engineering programs in a globalization-governed world”, *Ideas*; 18, 2014.

O

- O’Regan N., et al., “Fast tracking innovation in manufacturing SME’s”, *Technovation* 26(2): 251, 2006.
- O’Sullivan D., and Dooley L. “Applying Innovation” , Sage Publications, Inc., 2009.
- Otake, M., et al., “Autonomous collaborative environment for project-based learning”, *Robotics and Autonomous Systems*, 57 (2). pp 134-138, 2009.
- Oliver D.L., and Kane J., “Engineering Design Modules as Physics Teaching Tools”, *The Physics Teacher*, 49(4): p. 242-245, 2011.
- Osterwalder A., et al., “Business model generation: A handbook for visionaries, game changers, and challengers”, 2010.
- Oehlberg L., et al., « Showing is sharing: Building shared understanding in human-centered design teams with Dazzle”, In: *Proceedings of DIS’12*, pp. 669–678, 2012.

P

- Peercy P.S., and Cramer S.M., “Redefining quality in engineering education through hybrid instruction”, *Journal of Engineering Education*, 100(4), 625-629, 2010.
- Prados J. W., «Engineering Education in the United States: Past, Present, and Future» *Proceedings, International Conference on Engineering Education: Rio de Janeiro, Brazil*, 1998.

- Pahl G., and Beitz W. “Engineering Design: A Systematic Approach”, Springer, Berlin, 2007.
- Puente S.M.G., et al., “A sampled literature review of design-based learning approaches: a search for key characteristics”, *International Journal of Technology and Design Education*, 23(3): p. 717-732, 2013.
- Pugh S., “Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering”, Addison-Wesley. ISBN 0-201-41639-5, February 1991.

R

- Ruprecht R., “Curriculum development: The whole and its parts”, *European Journal of Engineering Education*, Abingdon; Dec 2000.
- Ringwood J. V., et al., “Teaching engineering design through Lego® Mindstorms™.”, *European Journal of Engineering Education*, 30(1): 91-104. Doi: 10.1080/03043790310001658587, 2005.
- Report of the Committee of Inquiry into the Engineering Profession (The Finniston Report) *Engineering our Future* HMSO Cmnd. 7794, 1980.
- Roberts T. S., “Computer-supported collaborative learning in higher education”, *IGI Global*, 2004.
- Reidsema C., et al., “Impromptu design as a vehicle for developing team work and problem solving skills in design engineering”, In *International Conference on Engineering Education*, Gainesville, Florida, USA. 2004.
- Ries E., “The lean startup: How today’s entrepreneurs use continuous innovation to create radically successful businesses”, 2011.
- Razzouk R., and Shute V., “What is design thinking and why is it important?”, *Rev Educ Res*; 82: 330–348, 2012.
- Ricca B., et al., “Lego Mindstorms and the Growth of Critical Thinking”, In: *Intelligent Tutoring Systems Workshop on Teaching with Robots, Agents, and NLP*, 2006.
- Ringwood J.V., “Teaching engineering design through Lego Mindstorms”, *Eur J Eng Educ*; 30: 91–104, 2005.
- Rubio M.A et al., “Using Arduino to enhance Computer Programming courses in Science and Engineering”, *Proceedings of EDULEARN13 Conference*, Barcelona, Spain, ISBN 978-84-616-3822-2, pp.5127-5133, 2013.

S

- Schumpeter, J. A., “Theorie der Wirtschaftlichen Entwicklung” (English translation, 1934: The Theory of Economic Development. Cambridge, MA: Harvard University Press). Leipzig, Duncker und Humblot, 1912.
- Sheppard S.D. et al., « Educating Engineers: Designing for the Future of the Field”, San Francisco: Jossey-Bass, 2008.
- Seely B. E., “Patterns in the history of engineering education reform: A brief essay”, In Educating the engineer of 2020: Adapting engineering education to the new century (pp. 114-130). Washington, DC: National Academies Press, 2005.
- Schachterle L., and Vinther O., “Introduction: the role of projects in engineering education”, *European Journal of Engineering Education*, 21(2), 115-120, 2006.
- Sheppard S. D., et al., « Educating engineers: Designing for the future of the field”, San Francisco: JosseyBass, 2009.
- Skates G.W., “Interdisciplinary project working in engineering education.” *European Journal of Engineering Education* 28(2): 187.doi: 10.1080/0304379031000079022, 2003.
- Sheppard S. D., “A description of engineering: An essential backdrop for interpreting Engineering Education”, Paper presented at the *Mudd Design Workshop IV Designing Engineering Education*, Claremont, CA, 2003.
- Sheppard S. D., and Jenison R., “Freshman engineering design experiences: An organizational framework “, *International Journal of. Engineering Education*, 13(3): 190–197, 1997.
- Stauffacher M., et al., “Learning to research environmental problems from a functional socio-cultural constructivism perspective: the transdisciplinary case study approach”, *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 7(3): 252-275, 2006.
- Startup Weekend Makers Fès 2016, <https://www.youtube.com/watch?v=kwpO0a0wVdM> accessed May 2016.

T

- Tidd J., et al., “Learning through alliances” in Henry, J. and Mayle, D. (eds.) *Managing Innovation and Change*, London: Sage, 2002.

- Tushman M.L., and O'reilly C.A., "Winning through innovation: A practical guide to leading organizational change and renewal". Boston, MASS: Harvard Business School Press, 1997.
- The Boeing Company & Rensselaer Polytechnic Institute. A Manifesto for Global Engineering Education: Summary Report of the Engineering Futures Conference. Seattle, WA, 1997.
- The Design Council 1991.
- Thomas J. W., "A review of research on project-based learning", [Online]. Available at: http://w.newtechnetwork.org/sites/default/files/news/pbl_research2.pdf, 2001.
- Topping K.J., et al., "Formative peer assessment of academic writing between post graduate students", *Assess eval high educ* 2000, 25(2): 149–166, 2000.
- Terwiesch et al. *Innovation tournaments: Creating and selecting exceptional opportunities*. Harvard Business Press, 2009.

U

- Ulrich K. T., and Eppinger S. D., "*Product Design and Development*", McGraw-Hill International Edition, 2008.

V

- Von Kotze A., and Cooper L., "Exploring the transformative potential of project-based learning in university adult education", *Studies in the Education of Adults*, 32 (2), pp 212-228, 2000.

W

- Wolpert J.D., "Breaking out of the innovation box," *Harvard Business Review*, vol. 80(8), p. 76–8, 2002.
- Wulf W.A. "The urgency of engineering education reform", *The Bridge*, 28 (1), 1998.
- Woods D.R., et al., "The future of Engineering Education III. Developing Critical skills", *Chemical Engineering Education* 34 (2): 108-117, 2000.
- World Wide CDIO Initiative Standards, <http://www.cdio.org/implementing-cdio-your-institution/standards/>.
- Wood K.L., et al., "Reverse engineering and redesign: Courses to incrementally and systematically teach design", *Journal of Engineering Education*, 90(3): p. 363-374, 2001.

- Wang E., “Using LEGO Bricks to conduct engineering”, In: *Proceedings of the ASEE, annual conference and exposition*, Salt Lake City, UT, USA, 2004, Session 2756.
- Working Model 2D, <http://http://www.designsimulation.com/WM2D/Index.php>, (accessed 1 February 2016).

Y

- Yoder M.A., “Sparking Life in a Circuits Classroom”, In *Frontiers in Education Conference*, Twenty Third Annual Conference Engineering Education: Renewing America’s Technology’, Proceedings. IEEE 1993.

Z

- Zaltman G., et al., “Innovations and organizations”, New York: Wiley, 1973.
- Zimmerman J., et al., “Discovering Knowledge in the Design Case”, *Proceedings of Future Ground Design Research Society*, 2004.

ANNEXES



Annexe 1

La méthode QFD

La méthode QFD a été développée au Japon vers les années 1970 et a été introduite aux Etats Unis vers les fins de 1980. En utilisant cette méthode, Toyota a pu réduire de presque 60% les coûts de développement d'un nouveau modèle de voiture et sa mise sur le marché, et a pu réduire aussi d'un tiers le temps requis pour son développement. Toyota a pu ainsi obtenir des résultats satisfaisants sur le coût et le temps tout en améliorant la qualité du produit.

Il existe différentes zones de la maison de la qualité, à savoir :

- **Les QUOI :** Cette zone contient la liste des attentes et des exigences des clients sur le produit. Cette liste peut être à un seul niveau pour des produits simples ou hiérarchisée pour des produits plus complexes (en utilisant le diagramme des affinités). Dans cette 1^{ère} étape, il s'agit d'inscrire les fonctions et leur pondération (Figure 13).

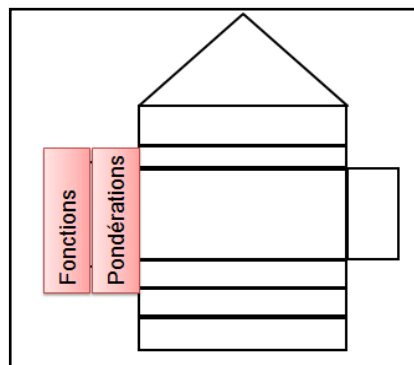


Figure 13 : 1^{ère} étape de la construction de la maison de qualité; construction de la zone des Quoi

- **Les COMMENT :** Sachant les besoins exprimés par les clients, il faut analyser la façon de les satisfaire. Dans cette 2^{ème} étape, il faut inscrire les critères et leurs orientations. 3 orientations de critères sont possibles : *Maximiser le niveau, minimiser le niveau, obtenir le niveau désiré* (Figure 14).

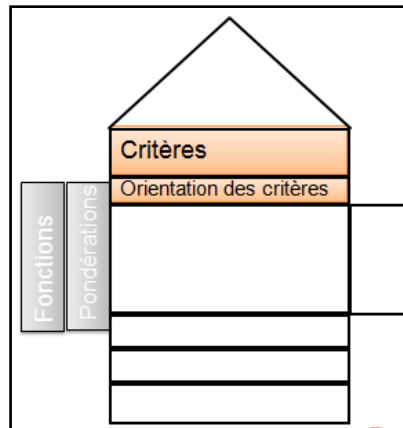


Figure 14 : 2^{ème} étape de la construction de la maison de qualité ; construction de la zone des Comment

- **Les COMBIEN** : La liste des COMBIEN sert à caractériser les COMMENT. On trouve en général dans cette liste les valeurs « cibles » des spécifications. Dans cette 3^{ème} étape, il faut aussi coter les difficultés techniques des spécifications (3 niveaux de difficulté technique, 1 étant facile, et 3 difficile) (Figure 15).

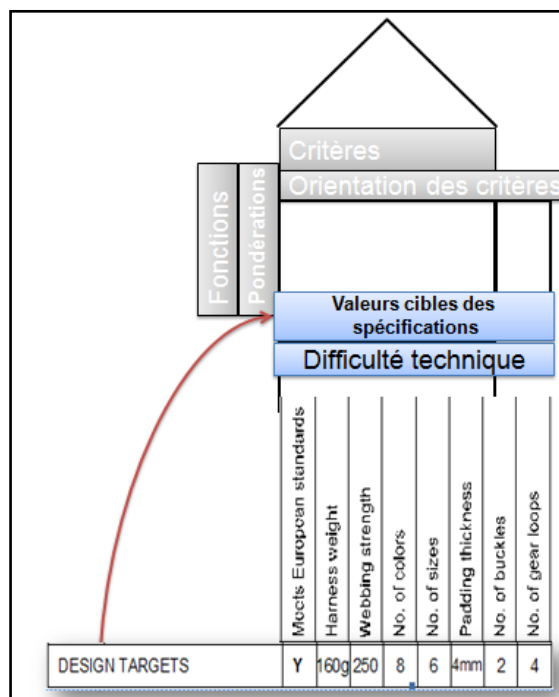


Figure 15 : 3^{ème} étape de construction de la maison de la qualité ; construction de la zone des Comment

- **Les QUOI vs COMMENT** : Cette zone permet de mesurer les relations entre les besoins des utilisateurs et les moyens envisagés pour les satisfaire, autrement dit les relations entre les fonctions et les spécifications. Cette relation matricielle QUOI/COMMENT représente la base et l'originalité de toute méthode QFD. En règle générale, les relations QUOI/COMMENT

sont hiérarchisées en fonction de l'importance de la relation. On utilise souvent une pondération 1, 3, 9 pour des relations faibles, moyennes et fortes (Figure 16).

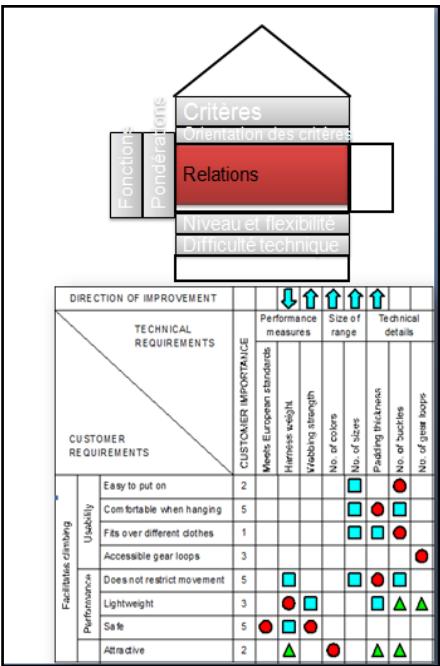


Figure 16 : 4^{ème} étape de construction de la maison de la qualité ; construction de la zone des Quoi vs les Comment

- **Les COMMENT vs COMMENT** : Les solutions apportées pour satisfaire les clients sont parfois contradictoires. On identifiera donc dans cette partie toutes les relations positives (qui vont dans le même sens en terme de qualité) et négatives (qui vont dans le sens opposé) entre les différents critères (Figure 17).

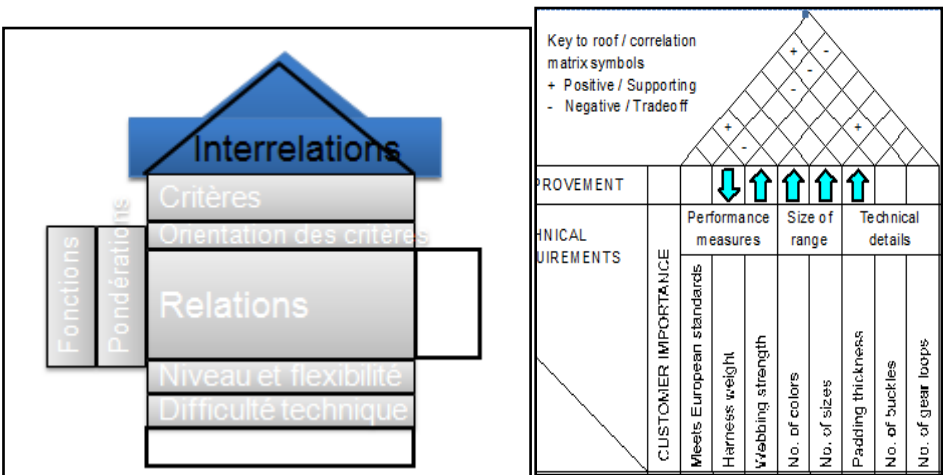


Figure 17 : 5^{ème} étape de construction de la maison de la qualité ; construction de la zone des interrelations entre les Comment et les Comment

- **Évaluation par rapport à la concurrence** : Il s'agit de faire une évaluation comparative des concurrents sur chaque QUOI. Les résultats sont inscrits sur une échelle de 0 à 5 (Figure 18).

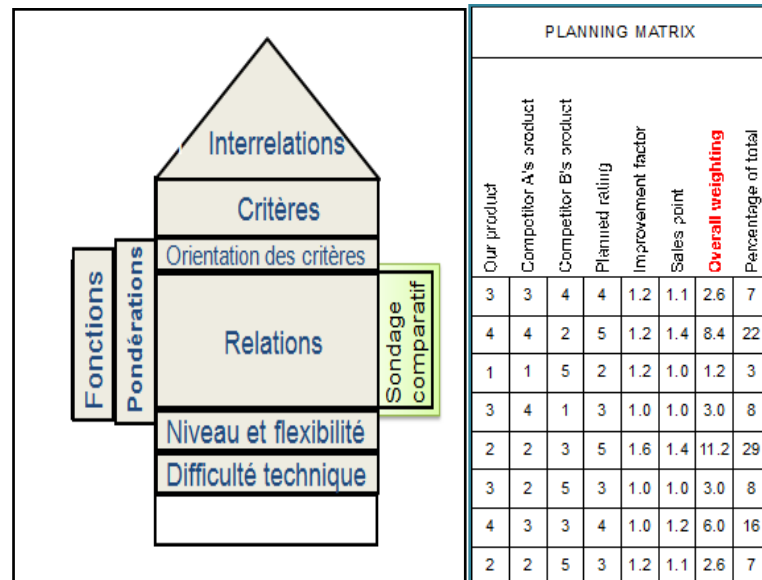


Figure 18 : 6^{ème} étape de construction de la maison de qualité ; construction de la zone du sondage comparatif

- **Évaluation comparative des COMMENT par rapport à la concurrence** : Il s'agit dans cette zone de réaliser une étude comparative et de l'inscrire dans la matrice (Figure 19).

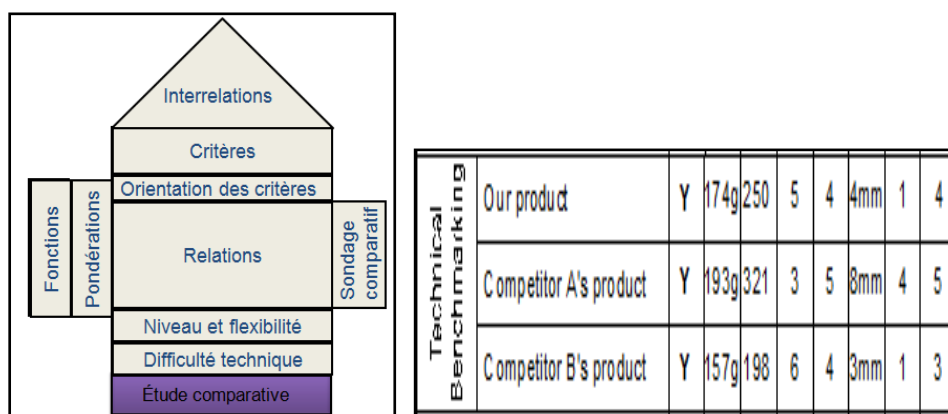


Figure 19 : 7^{ème} étape de construction de la maison de la qualité ; construction de la zone de l'étude comparative

A la fin de la réalisation de la maison de qualité, il faut identifier les critères de conception :

- importants pour la satisfaction du client ;
- techniquement difficiles à réaliser ou risqués pour l'entreprise.

Cette identification des critères critiques peut se faire selon :

- le niveau d'importance absolu.
- le niveau de difficulté technique.
- la nouveauté technologique.
- les liens forts établis avec des fonctions où on doit :
 - innover (action de type C) ;
 - copier et innover (action de type B).

Annexe 2

Photos du projet *Enjoyeering Freshman*

Cette annexe présente la 1^{ère} édition du projet Enjoyeering Freshman qui a eu lieu en 2014. La figure 34 montre les groupes d'étudiants de 1^{ère} année pendant la 1^{ère} séance du projet, où ils sont en train de construire un premier robot avec le kit Mindstorms et essayent de faire une première programmation du robot sur le logiciel NXT-G. Après avoir passé des semaines à travailler sur leurs propres projets (Figures...), les étudiants ont finalement pu présenter leurs réalisations le jour de la compétition.



Figure 34 : Première prise en main avec Lego Mindstorms



Figure 35 : Les étudiants en train de travailler sur leurs projets durant l'activité *Enjoyeering Freshman*

Le projet Garbage Collector est un robot qui collecte les objets se trouvant dans un espace bien défini. Il se base sur un capteur de couleurs pour identifier la zone où il doit se trouver, et par la suite commence à collecter les objets qui se trouvent dans cette zone - en se basant sur un bras identique à celui d'une grue - pour ensuite les mettre dans un panier positionné dans un endroit bien précis en dehors de la zone. Les étudiants pensent que ce projet peut être utilisé pour ranger une simple chambre, comme il peut servir dans un contexte industriel pour nettoyer une zone des objets qui peuvent tomber par inadvertance (Figure 36).



Figure 36 : Démonstration du robot « Garbage collector »

Le projet Clean Stairs est un robot destiné pour le nettoyage des escaliers. Il est constitué d'un bras contenant un torchon pour le nettoyage de la face verticale de la marche. De même, en montant la marche, le robot parvient à nettoyer la face horizontale de la marche grâce à un torchon de dépoussiérage se trouvant à l'arrière du robot. Les étudiants pensent que leur robot serait d'un grand usage domestique pour le nettoyage des escaliers (Figure 37).

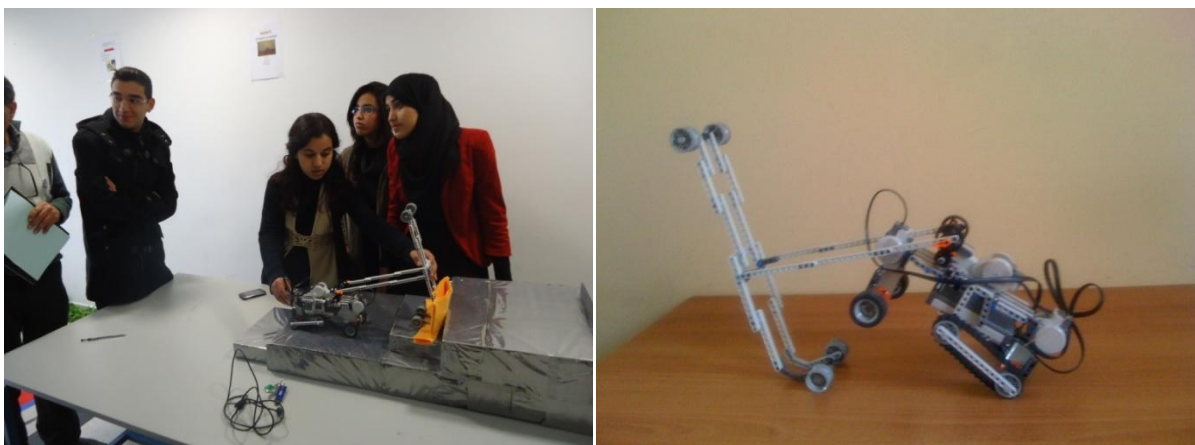


Figure 37 : Démonstration du robot « Clean Stairs »

Le projet Green Plants est un robot qui est destiné à l'arrosage automatique de certains fruits d'une plantation en se basant sur leur couleur. Constitué d'un détecteur de couleurs, le robot n'exécute l'arrosage que si la couleur du fruit est jaune ou verte. Le robot est capable aussi de connaître sa position par rapport aux plantes et peut passer d'une plante à une autre. Les étudiants pensent que ce robot serait d'une grande utilité pour réduire la tâche des cultivateurs dans les grandes plantations (Figure 38).



Figure 38 : Démonstration du robot « Green plants »

D'autres prototypes de robots ont été réalisés par d'autres équipes d'étudiants (Figure 39).

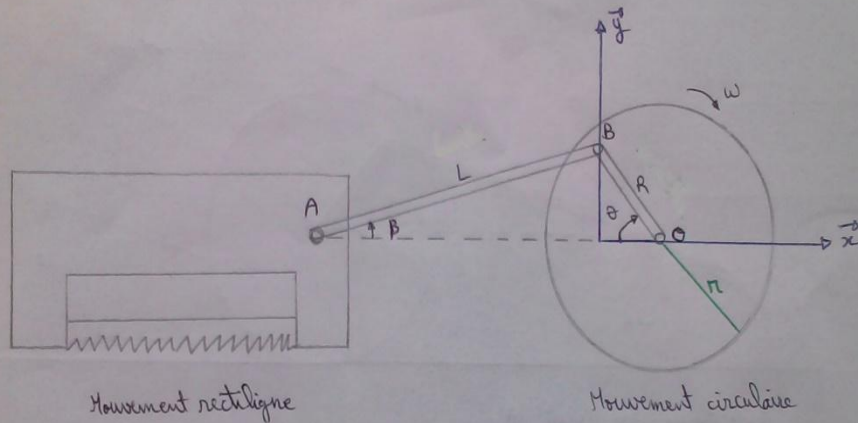


Figure 39 : Prototypes de robots réalisés dans le projet *Enjoyeering Freshman*

Annexe 3

Etapes suivies par les étudiants lors du projet *Enjoyeering Junior*

Etude mécanique Calcul de la vitesse du point A



Détermination de sens de β et θ :

- $\theta \in [0, \frac{\pi}{2}]$, θ et β ont des sens opposés.
- $\theta \in [\frac{\pi}{2}, \pi]$, θ et β ont même sens.
- $\theta \in [\pi, \frac{3\pi}{2}]$, θ et β ont même sens.
- $\theta \in [\frac{3\pi}{2}, 2\pi]$, θ et β ont des sens opposés.

Détermination des vitesses pour la position $\theta = 60^\circ$:

$$\theta = \frac{\pi}{3} \in [0, \frac{\pi}{2}]$$

$\Rightarrow \theta$ et β ont des sens opposés.

La vitesse angulaire de la barre AB:

- on a d'après la loi des sinus:

$$L \sin \beta = R \sin \theta \quad \text{avec } (R = \pi - \theta \beta)$$

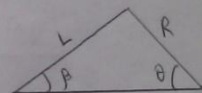
$$\Rightarrow \sin \beta = \frac{R}{L} \sin \theta$$

$$\Rightarrow \beta = \sin^{-1} \left(\frac{R}{L} \sin \theta \right)$$

- on dérivons la relation précédente on trouve

$$L \dot{\beta} \cos \beta = R \dot{\theta} \cos \theta$$

$$\Rightarrow \dot{\beta} = \frac{R \dot{\theta} \cos \theta}{L \cos \beta}$$



- La vitesse du point A:

$$\vec{V}(A) = \vec{V}(B) + \vec{\omega}_{B/A} \wedge \vec{BA}$$

avec $\vec{V}(B) = \vec{V}(O) + \vec{\omega}_{B/O} \wedge \vec{OB}$

$$= 0 - \dot{\theta} \vec{g} \wedge (-R \cos \theta \vec{x} + R \sin \theta \vec{y})$$

D'où $\vec{V}(A) = (R \dot{\theta} \cos \theta \vec{y} + R \dot{\theta} \sin \theta \vec{x}) + \dot{\beta} \vec{g} \wedge (L \cos \beta \vec{x} - L \sin \beta \vec{y})$

$$= (R \dot{\theta} \cos \theta \vec{y} + R \dot{\theta} \sin \theta \vec{x}) - \dot{\beta} L \cos \beta \vec{y} + L \dot{\beta} \sin \beta \vec{x}$$

$$= (R \dot{\theta} \sin \theta + L \dot{\beta} \sin \beta) \vec{x} + (R \dot{\theta} \cos \theta - L \dot{\beta} \cos \beta) \vec{y}$$

on a $R \sin \theta = L \sin \beta \Rightarrow L \dot{\beta} \cos \beta = R \dot{\theta} \cos \theta$

$$\Rightarrow \vec{V}(A) = (R \dot{\theta} \sin \theta + L \dot{\beta} \sin \beta) \vec{x}$$

$$= (R \dot{\theta} \sin \theta + R \dot{\beta} \sin \beta) \vec{x}$$

$$\boxed{\vec{V}(A) = R \sin \theta (\dot{\theta} + \dot{\beta}) \vec{x}}$$

Figure 51 : Calculs théoriques réalisés par les étudiants pour la détermination de la vitesse de déplacement de la scie

Simulation sur Working Model



SCIE MECANIQUE.wm2d

Matériel utilisé

Arduino	
Capteur ultrasons	
Moteur DC	
Potentiomètre	

Breadboard + Driver L293D + Fils



Table 24 : Liste de matériel utilisé par les étudiants pour la réalisation du projet de la scie mécanique

Code de programmation sur Arduino

```

motorpotentio
char PWM_ENABLE = 3; // Pin 1 du L293D
char DO_MOTOR_1 = 2; // Pin 2 du L293D
char DO_MOTOR_2 = 4; // Pin 7 du L293D
char AN_POTENTIOMETRE = 0;
int valeurPotentiometre = 0;
int vitesseDuMoteur = 0;
void setup() {
  pinMode(DO_MOTOR_1, OUTPUT);
  pinMode(DO_MOTOR_2, OUTPUT);
  pinMode(PWM_ENABLE, OUTPUT);
  digitalWrite(DO_MOTOR_1, LOW);
  digitalWrite(DO_MOTOR_2, LOW);
  digitalWrite(PWM_ENABLE, LOW);
  analogWrite(PWM_ENABLE, 0);
  Serial.begin(9600);
}
void loop(){
  valeurPotentiometre = analogRead(AN_POTENTIOMETRE);
  if(valeurPotentiometre > 512)
  {
    /*rotation horaire*/
    digitalWrite(DO_MOTOR_2, LOW);
    digitalWrite(DO_MOTOR_1, HIGH);
    /*conversion proportionnelle*/
    vitesseDuMoteur = map(valeurPotentiometre, 512, 1023, 0, 255);
    Serial.print("+");
  }
}

motorpotentio
}
void loop(){
  valeurPotentiometre = analogRead(AN_POTENTIOMETRE);
  if(valeurPotentiometre > 512)
  {
    /*rotation horaire*/
    digitalWrite(DO_MOTOR_2, LOW);
    digitalWrite(DO_MOTOR_1, HIGH);
    /*conversion proportionnelle*/
    vitesseDuMoteur = map(valeurPotentiometre, 512, 1023, 0, 255);
    Serial.print("+");
  }
  else
  {
    /*rotation anti_horaire*/
    digitalWrite(DO_MOTOR_2, LOW);
    digitalWrite(DO_MOTOR_1, HIGH);
    /*conversion inversement proportionnelle*/
    vitesseDuMoteur = map(valeurPotentiometre, 0, 512, 255, 0);
    Serial.print("-");
  }
  analogWrite(PWM_ENABLE, vitesseDuMoteur);
  Serial.println(vitesseDuMoteur);
  delay(20);
}

```

Figure 52 : Codes de programmation sur Arduino réalisés par les étudiants pour la programmation de la scie mécanique

Annexe 4

Photos du projet *Enjoyeering Junior*

Cette annexe présente les différentes éditions du projet *Enjoyeering Junior* qui a eu lieu en 2014, 2015 et 2016.

➤ **Edition 2016 :**

D'excellents projets ont été réalisés durant l'édition 2016 du projet *Enjoyeering Junior*. En s'inspirant des mécanismes illustrés dans les différents livres de mécanique de solides, et en suivant les étapes citées précédemment, les étudiants ont réalisé différents systèmes mécatroniques.

Parmi les systèmes assez fréquents se trouvent des bras robotiques destinés pour diverses utilisations telles que l'arrosage automatique de plantes et la collecte d'objets (Figure 55) et des ponts automatiques (Figure 56).

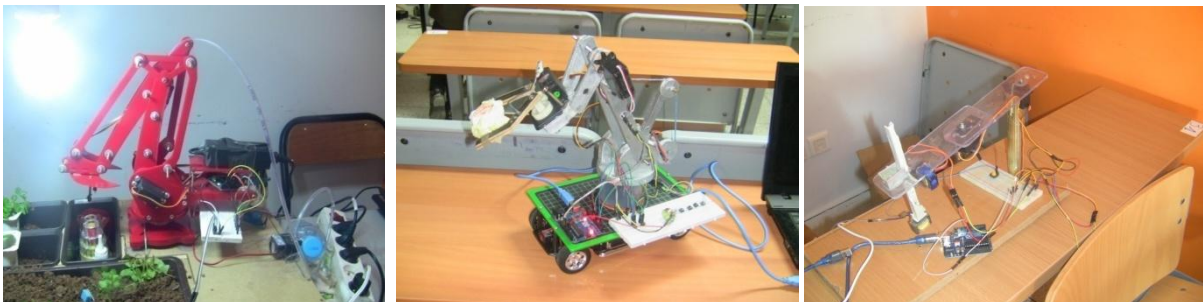


Figure 55 : Enjoyeering Junior 2016-Exemples de bras robotiques réalisés par les étudiants



Figure 56 : Enjoyeering Junior 2016-Exemples de ponts réalisés par les étudiants

- Autres projets :

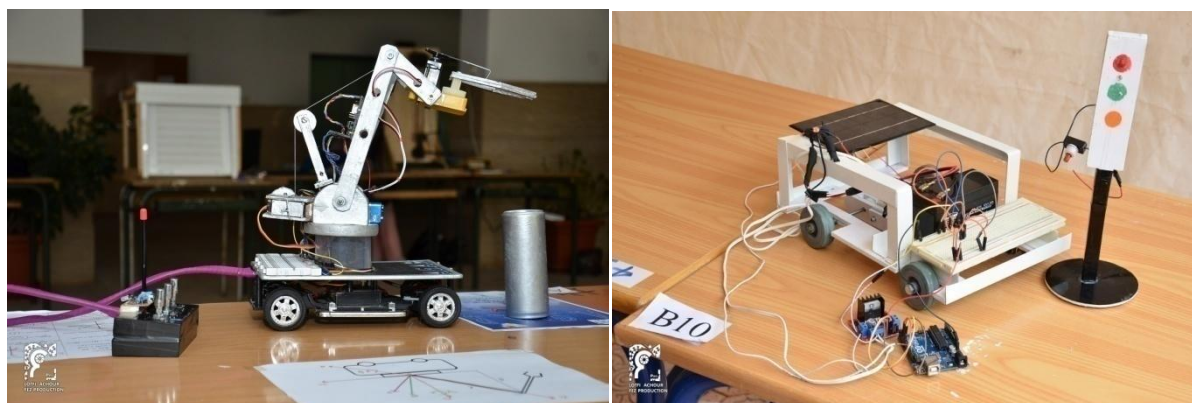


Figure 57 : Autres photos de projets de l'édition 2016 d'Enjoyeering Junior

Les éditions 2015 et 2014 ont connu des projets divers, où les étudiants se sont inspirés de mécanismes se basant sur des engrenages, des crémaillères et des poulies pour transmettre le mouvement, afin de réaliser des systèmes mécatroniques créatifs.

➤ Edition 2015 :

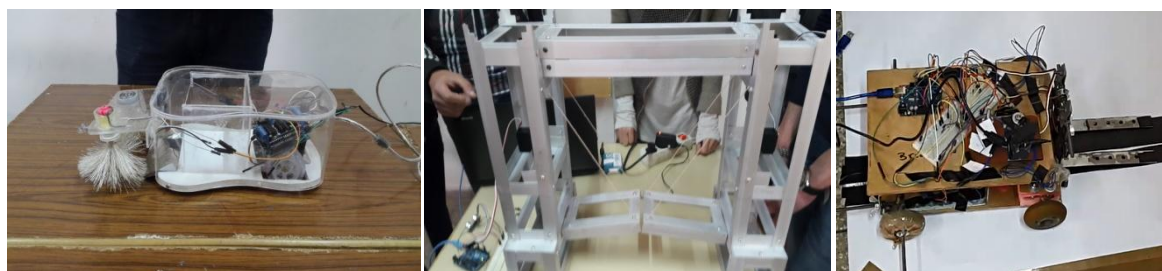


Figure 58 : Enjoyeering Junior 2015-Autres exemples de projets réalisés par les étudiants

➤ Edition 2014 :



Figure 59 : Enjoyeering Junior 2014-Autres exemples de projets réalisés par les étudiants

Annexe 5

Questionnaire destiné aux étudiants pour l'évaluation de l'acquisition des compétences durant le projet *Enjoyeering Junior*

Section I : Cette section évalue les compétences que vous avez acquises en matière de conception de produits tout au long du projet.

- Capacité à bien définir un problème	1	2	3	4
- Capacité à générer des idées	1	2	3	4
- Capacité à choisir la bonne solution	1	2	3	4
- Capacité à prototyper la solution choisie	1	2	3	4
- Capacité à évaluer la solution et l'améliorer	1	2	2	4

Section II : Cette section évalue les compétences que vous avez acquises en matière de résolution de problèmes tout au long du projet.

- Capacité à chercher et collecter les informations	1	2	3	4
- Capacité à décomposer un problème en sous-problèmes	1	2	3	4
- Capacité à voir le problème sous différentes perspectives	1	2	3	4
- Capacité à considérer différentes alternatives	1	2	3	4
- Capacité à prioriser des solutions et converger vers une seule solution	1	2	2	4

Section III : Cette section évalue les compétences techniques que vous avez acquises tout au long du projet.

- Compréhension des mécanismes et leur fonctionnement	1	2	3	4
- Capacité à appliquer les concepts de l'analyse cinématique et cinétique	1	2	3	4
- Capacité à effectuer des schémas et des dessins pour visualiser le système	1	2	3	4
- Capacité à modéliser le système mécanique et simuler son mouvement sur un logiciel de conception assistée par ordinateur	1	2	3	4
- Capacité à choisir le bon matériel pour construire le prototype	1	2	2	4
- Capacité à contrôler le prototype avec la plateforme Arduino				

Section IV : Cette section évalue les compétences transversales que vous avez acquises tout au long du projet.

- Capacité à décrire un problème oralement et par écrit	1	2	3	4
- Capacité à présenter un projet en public	1	2	3	4
- Capacité à travailler collaborativement avec les autres membres du groupe	1	2	3	4
- Capacité à accepter les idées des autres	1	2	3	4
- Capacité à prendre des décisions seul ou en groupe concernant le projet	1	2	2	4

Annexe 6

Cette annexe a pour objectif principal de retracer les étapes principales suivies par les étudiants durant le projet *Enjoyeering Senior*. Deux projets réalisés respectivement en 2015 et 2014 seront présentés, à savoir le projet « Porte endoscope pour la chirurgie laparoscopique » et le projet « Centrifugeuse et automate d'analyse du sang ».

➤ Edition 2015 :

Après élaboration des groupes du projet et découverte d'opportunité, les équipes ont commencé par réaliser une analyse des besoins. Des focus groupes, des interviews et des réunions ont été réalisés avec des clients afin de préciser leurs besoins relatifs au produit. Les besoins ont été identifiés et pondérés selon 3 classes : besoins de base (B), besoins de performance (P) et besoins de contrainte (C).

Pour le projet « porte-endoscope pour la chirurgie laparoscopique » réalisé par une équipe d'étudiants en collaboration avec le CHU de Fès, les besoins relevés ont été les suivants :

Edition d' <i>Enjoyeering Senior</i>	Opportunité	Nom du projet	Besoins identifiés
2015	Eviter au chirurgien de se préoccuper de l'endoscope lors d'une opération de célioscopie	Porte-endoscope pour la chirurgie laparoscopique	- Supporter l'endoscope. - Orienter l'endoscope selon le besoin de l'opérateur. - Positionner l'optique dans l'abdomen. - Réaliser des mouvements et des rotations très précises de l'optique. - Déplacer l'endoscope d'une incision à une autre. - Zoomer quand c'est nécessaire.

Table 25 : Besoins identifiés dans le projet « Porte-endoscope pour la chirurgie laparoscopique »

Une fois que les besoins sont déterminés, les étudiants passent à la conversion de ces besoins en fonctions du produit à développer. Ils font appel donc à l'analyse fonctionnelle et les fonctions sont déterminées soit par recherche intuitive soit à travers un examen de l'environnement (Table 26 et Figure 66).

Edition d'Enjoyeering Senior	Nom du projet	Fonctions relevées par recherche intuitive
2015	Porte-endoscope pour la chirurgie laparoscopique	-Avoir une performance de contrôle et de souplesse. -Être simple à installer. -Être léger. -Être facile à placer. -S'adapter aux compétences du chirurgien. -Être simple à régler. -Minimiser les ajustements en cours d'opération. -Avoir un encombrement minimum. -Garantir une image vidéo stable et de qualité. -Respecter la sécurité du patient et la sensibilité des incisions. -Respecter les liaisons de l'endoscope. -Détecter les collisions -S'arrêter lors d'une collision -Maintenir la position de l'endoscope lors d'un changement de position de la table. -Être léger.

Table 26 : Fonctions relevées par recherche intuitive dans le projet « Porte-endoscope pour la chirurgie laparoscopique »

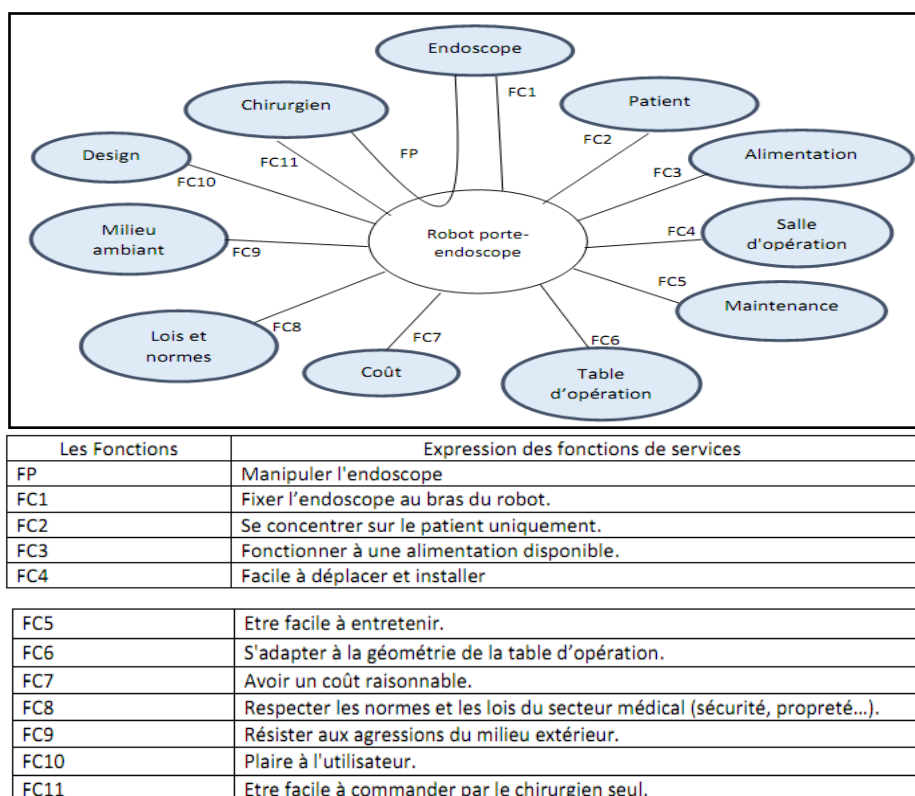


Figure 66 : Fonctions relevées par examen d'environnement dans le projet « Porte-endoscope pour la chirurgie laparoscopique »

Une fois que toutes les fonctions sont identifiées, les étudiants préfèrent toujours les organiser dans un diagramme FAST pour une meilleure visualisation de la fonction principale, les fonctions élémentaires ainsi que les solutions techniques.

La figure 67 montre une partie de l'arbre fonctionnel, principalement une décomposition fonctionnelle des fonctions « S'adapter à la géométrie de la table d'opération » et « Manipuler l'endoscope ».

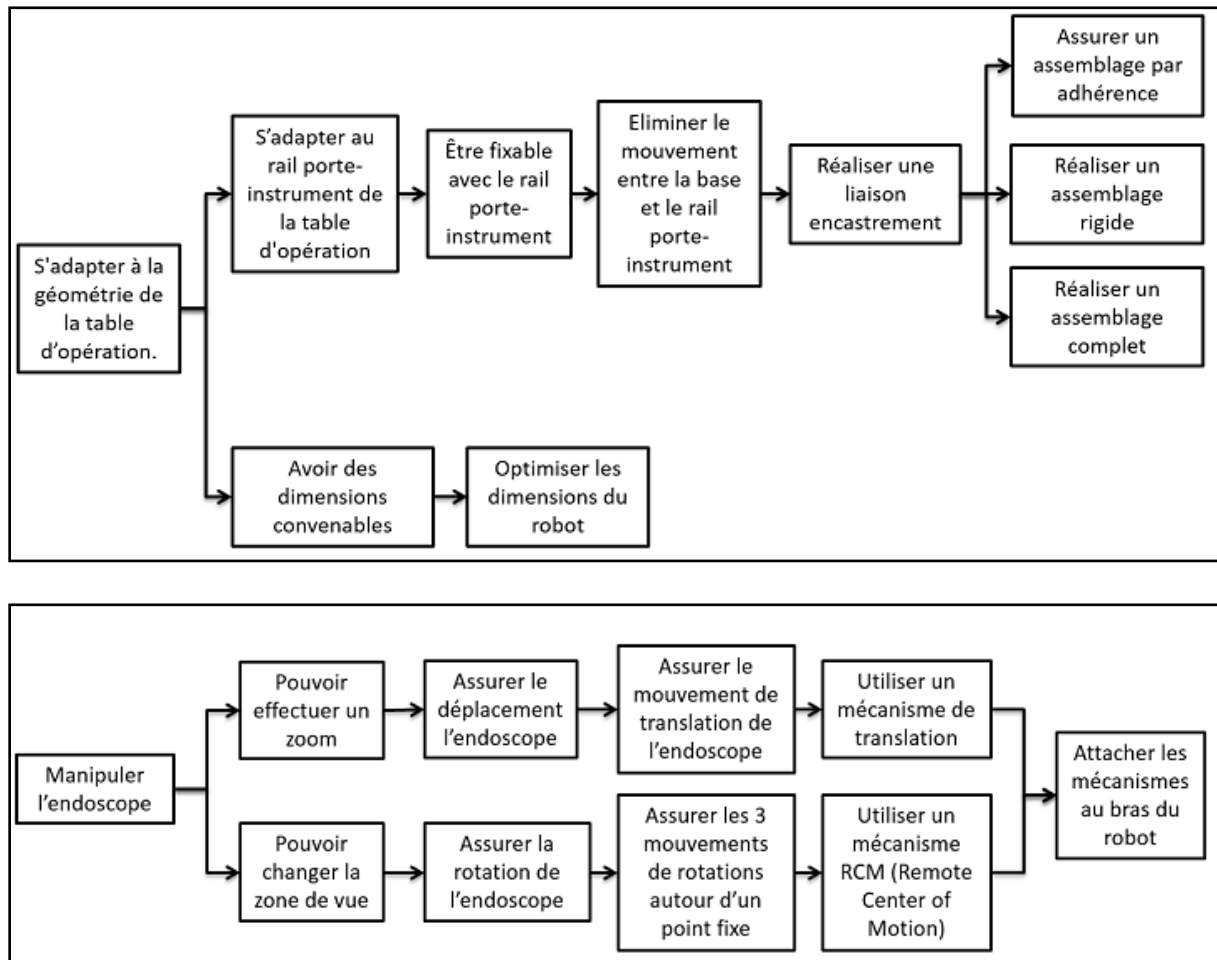


Figure 67 : Partie du diagramme FAST pour le projet « Porte-endoscope pour la chirurgie laparoscopique »

La prochaine étape pour les étudiants est de caractériser les fonctions en établissant les critères de chaque fonction, ainsi que leurs niveaux et flexibilités (Figure 68).

Fonctions	Critères	Niveaux
Monter et démonter l'endoscope.	- Forme et dimensions de l'endoscope. - Durée de montage.	- Endoscope cylindrique de diamètre : 10 mm < 20 seconde
Assurer le mouvement de rotation de l'endoscope.	- Angle de lacet - Angle de tangage	[23, 60] 360 degrés
Assurer le mouvement de translation de l'endoscope.	Course	103 mm
Arrêter la machine dès l'appui sur le bouton d'arrêt d'urgence.	Temps de réponse	< 1 seconde
S'intégrer dans le laboratoire	- Largeur - Hauteur - Masse	< 800 mm < 1500 mm < 40 kg
Ne pas engendrer de danger pour les personnes travaillant dans le laboratoire.	- Formes de la machine - Norme de sécurité en vigueur	- Pas de formes vives - Respect total
Ne pas engendrer de perturbations dans le laboratoire.	Rigidité de la liaison au bâti	Hors étude.

Figure 68 : Partie du cahier de charges pour le projet « Porte-endoscope pour la chirurgie laparoscopique »

La matrice morphologique est ensuite utilisée par les étudiants pour la présentation des différentes solutions techniques afin de générer les concepts possibles (Figure 69).

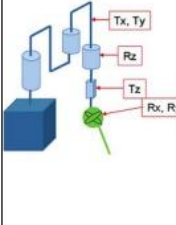
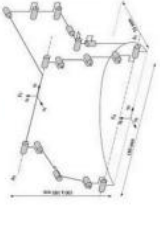
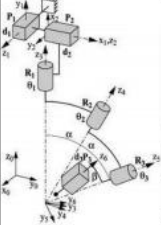
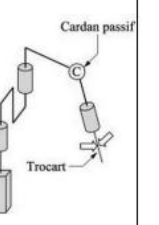
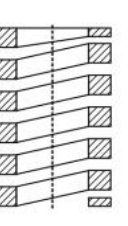
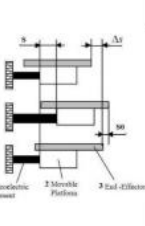
	Fixer au plafond	Fixer au chirurgien	Fixer au rail de la table	Placer au sol	Fixer au patient
Effectuer la rotation de l'endoscope					
	Bras manipulateurs classiques à cinématique sérielle	Bras manipulateurs à architecture parallèle	Architectures cinématiques avec centre de rotation déporté	Bras manipulateur à architecture redondante	
Effectuer la translation de l'endoscope					

Figure 69 : Partie de la matrice morphologique pour le projet « Porte-endoscope pour la chirurgie laparoscopique »

Après génération de concepts et utilisation de la matrice de PUGH pour le choix du meilleur concept, les étudiants ont finalement opté pour un dispositif qui sera fixé au rail latéral de la table d'opération, et qui sera composé d'un mécanisme de positionnement et d'un mécanisme d'orientation. La figure 70 montre les prototypes des deux mécanismes réalisés sous Catia V6.

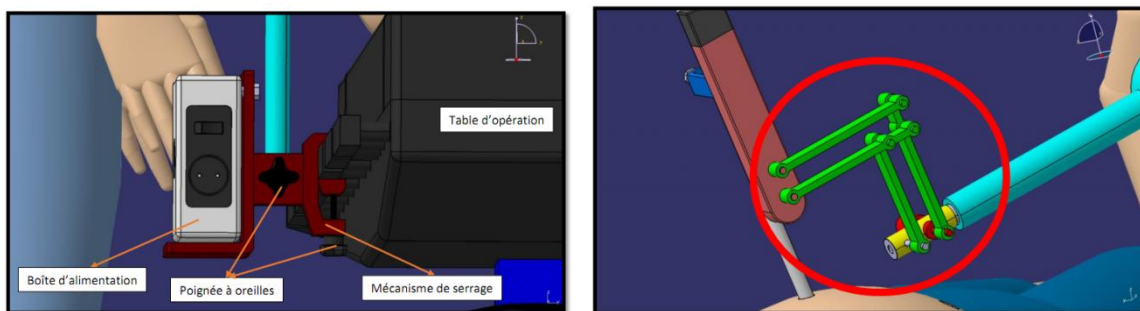


Figure 70: Prototypage des mécanismes sous Catia pour le projet « Porte-endoscope pour la chirurgie laparoscopique »



Figure 71 : Prototype numérique final pour le projet « Porte-endoscope pour la chirurgie laparoscopique »

➤ Edition 2014 :

Pour le projet « Centrifugeuse et automate d'analyse du sang » destiné aux laboratoires de biologie au sein même de la Faculté des Sciences et Techniques de Fès, les mêmes étapes ont été suivies par les étudiants. Quelques étapes clés seront présentées dans cette annexe.

- Analyse fonctionnelle :

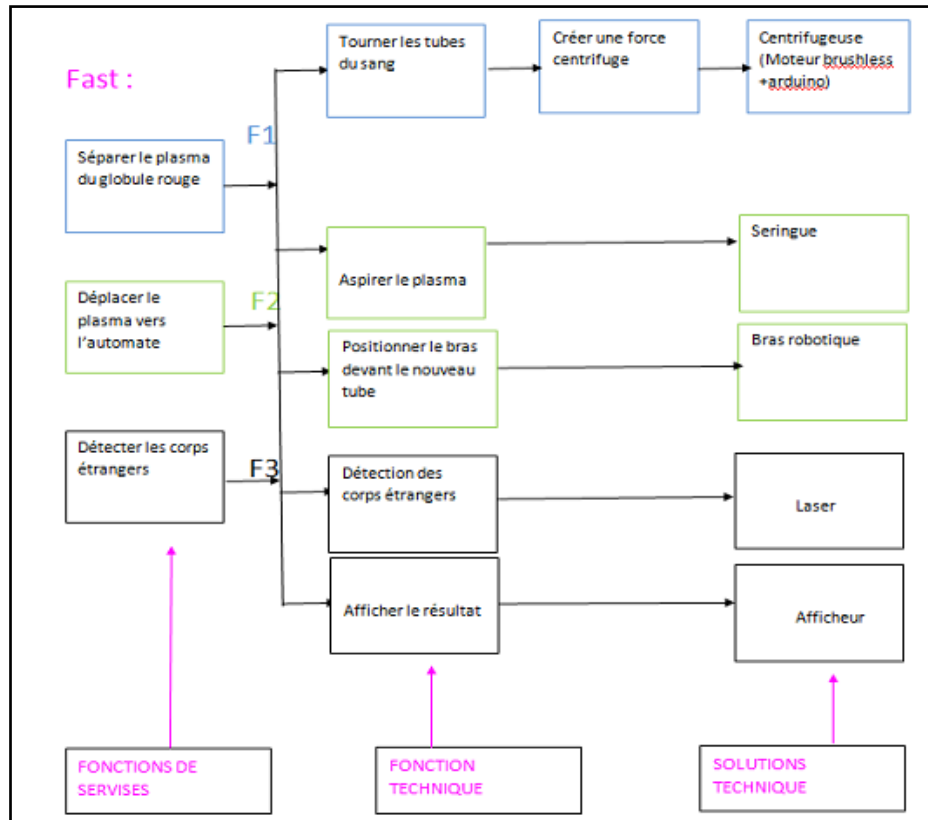


Figure 72 : Partie d'un diagramme FAST du projet « Centrifugeuse et automate d'analyse du sang ».

<u>N</u>	<u>désignation</u>	<u>K</u>	<u>Critères</u>	<u>niveau</u>	<u>Flexibilité</u>	<u>F</u>
1	Créer une force centrifuge	5	Vitesse de rotation du moteur Broshless	1000 tr/min/V	+ou- 50 tr/min de flexibilité	1
				$F=1.18 \cdot 10^{-5} \cdot r \cdot n^2$		
			Force Centrifugerelative	1000 tr	Max 10000 Min 130 N	1
			Diamètre des Tubes	8mm		
			Longueur des tubes	100mm	Max 98mm Min 6mm	1
					Max 130mm Main 20mm	1
			Poids des Tubes	1.6 g	Max 750 ml Min 2 ml	1
			Nombres Des Tubes.	4 tubes		
			Volume Des tubes	5 ml	Max 48 tubes Min 4 tubes	1
			Temps de centrifugation	15 min à 30 min	+ ou - 30 min	2

Figure 73: Partie du cahier de charges du projet « Centrifugeuse et automate d'analyse du sang ».

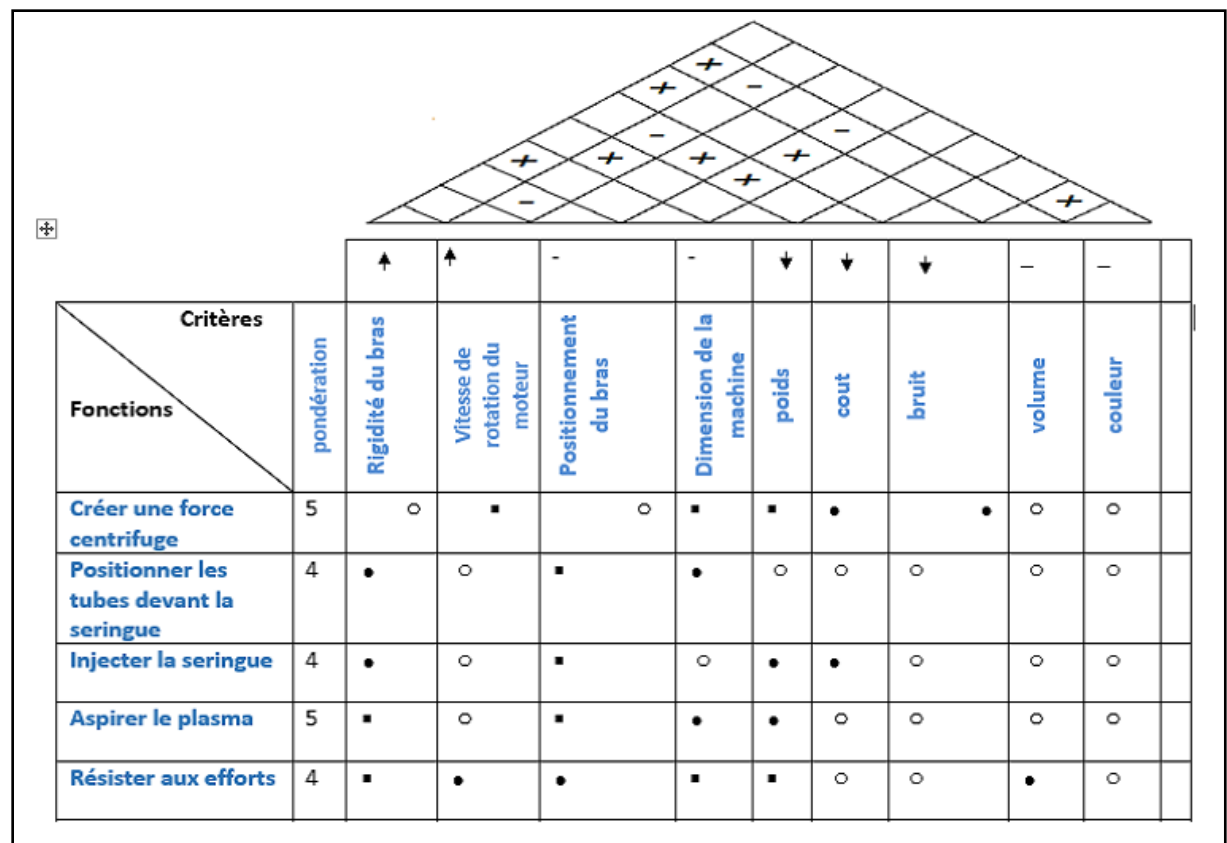


Figure 74: Partie de la maison qualité du projet « Centrifugeuse et automate d'analyse du sang ».

- Design conceptuel :

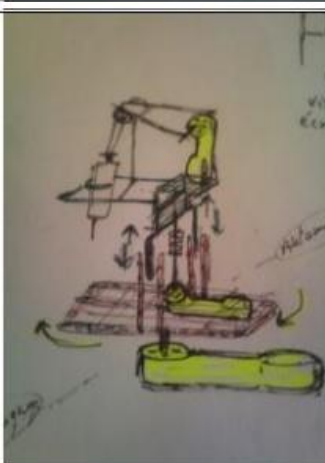
Déplacement De la seringue (du haut vers le bas)			
La combinaison des différents concepts individuels nous a permis d'obtenir deux solutions différentes.			Pour le rappel du mouvement il est possible d'utiliser les deux concepts car ils sont valables pour les deux solutions obtenues.

Figure 75: Partie de la matrice morphologique du projet « Centrifugeuse et automate d'analyse du sang ».

- Développement du prototype sous Solidworks :

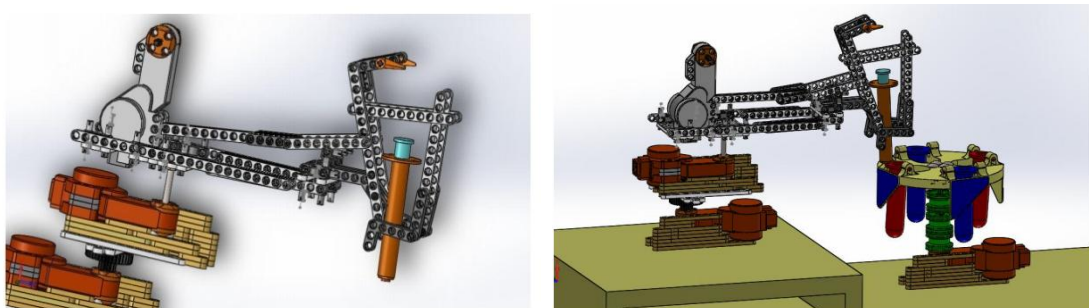


Figure 76 : Prototypage sous Solidworks du projet « Centrifugeuse et automate d'analyse du sang ».

- Programmation du prototype sous Matlab :

Rotation de centrifugeuse

```
COM_SetDefaultNXT(COM_OpenNXT())
NXT_PlayTone( 440, 100 )
m=NXTMotor(MOTOR_A);
m.Power=75;
m.TachoLimit=3600;
m.SendToNXT();
m.WaitFor();
m.Power=30;
m.TachoLimit=90;
m.SendToNXT();
m.WaitFor();
    m.TachoLimit=90;
    m.SendToNXT();
    m.WaitFor();
    m.TachoLimit=90;
m.SendToNXT();
m.WaitFor();
m.TachoLimit=88;
m.SendToNXT();
m.WaitFor();
```

Figure 77 : Partie d'un programme sous Matlab du projet « Centrifugeuse et automate d'analyse du sang ».