



ECOLE
POLYTECHNIQUE
DE BRUXELLES

Pierre LAMBERT
Portfolio d'enseignement
Novembre 2017

Année académique 2017-2018

TABLE DES MATIERES

1. Projet pédagogique: former des ingénieurs, former des scientifiques	6
1a. Liens avec le référentiel de compétences	6
1b. Aperçu synthétique des enseignements	6
1c. De la recherche à l'enseignement, et le contraire	8
1d. Conséquences sur les formes d'enseignement.....	13
1e. Projet pour les années à venir.....	14
2. Plans de cours	16
3. Supports de cours	18
3a. Exemple de syllabus très structurant	18
3b. Exemple d'exploitation d'un livre de référence	19
3c. Exemple d'exploitation de l'université virtuelle	20
3d. Utilisation d'un portefeuille de lectures	20
3e. Utilisation de transparents.....	21
4. Encadrement de mémoires et thèses de doctorat	22
5. Activités pédagogiques hors cours	24
6. Responsabilité de gestion/expertise liée à l'enseignement	24
7. Evaluations de l'enseignement	25
8. Formation pédagogique et didactique	26
9. Recherches et publications à caractère pédagogique ou didactique	27
10. Le projet BA1 Meca²r	28
10a. Objectifs du projet et genèse du sujet proposé	28
10b. Sujet : conception et modélisation d'une voiture à à énergie mécanique à l'échelle du jouet	30
10c. Objectifs poursuivis	31
10d. Attentes pédagogiques	33
10e. Retour à mi-parcours.....	36
10f. Retour sur le jury de fin d'année.....	37
10g. Gestion du projet.....	38
11. Annexes	39

TABLE DES FIGURES

Figure 1: Vue synthétique de mes enseignements	8
Figure 2 : Enseignement des sciences de base : concepts abstraits, modélisation et réalité	9
Figure 3 : Des sciences de base vers l'application : modélisation de machines et limites des modèles	9
Figure 4 : Conception mécanique et recherche : une application dans les microtechniques	10
Figure 5 : Conception mécanique et recherche : une application en microfluidique, les micro-aiguilles en polymère injectées	10
Figure 6 : Conception mécanique et recherche : une application biomédicale.....	11
Figure 7 : Exemples de sujets de MFE, groupés autour de mes 3 axes de recherche.....	12
Figure 8 : Séminaires de méthodologie expérimentale	12
Figure 9 : Liens entre recherche industrielle, recherche fondamentale, recherche de base en ingénierie et enseignement.....	13
Figure 10 : Articulation des concepts dans le cours de mécanique appliquée pour architectes.....	17
Figure 11 : Illustration des sens de rotation lévo- et dextrogyre : la grande colonnade d'Apamée en Syrie	18
Figure 12 : Illustration des concepts de compression et traction sur des roues de chariot et de vélo	18
Figure 13 : Concevoir une nouvelle porte de garage pour remplacer (a) : on pense généralement à (b-c)	19
Figure 14 : Solutions alternatives obtenues par abstraction du besoin.....	19
Figure 15 Exemple de question d'examen posée dans le cours meca-h-500 Procédés de microfabrication	20
Figure 16 : Encadrements annuels (nombre de chacun des projets, à l'exception des doctorats, pour lesquels on donne le nombre de doctorants)	22
Figure 17 : Liens possibles au sein d'une équipe de doctorants : partage de dispositifs expérimentaux, de modèles physiques, d'outils numériques (2010)	22
Figure 18 : Liste de mes co-auteurs, autant de collaborations élargissant l'horizon des doctorants (2010)	23
Figure 19 : Eclaté d'une montre automatique	29
Figure 20 : Concepts mécaniques dans une montre automatique	29
Figure 21 : But du projet : concevoir, fabriquer, et modéliser un véhicule à énergie mécanique pour gravir un plan incliné (Prototype de l'équipe technique)	30
Figure 22 : Modèle sommaire du véhicule : un châssis et deux paires de roues. Ceci permet d'écrire les conditions de démarrage et de non glissement des roues motrices.....	33
Figure 23 : Mise en évidence d'une inertie équivalente, composée des inerties de translation et de rotation : c'est sur cette dernière que l'on pourra jouer pour ralentir le véhicule. En effet, une augmentation de l'inertie de translation (i.e. la masse) entraîne inévitablement une augmentation de la force motrice	34
Figure 24 : Expression mathématique de la condition de démarrage (1) et de non glissement (2).....	34
Figure 25 : Diagramme force-déplacement utilisable pour le dimensionnement (à adapter pour des ressorts présentant une précontrainte). Les courbes d'iso-énergie prennent la forme de branches d'hyperboles ($F \cdot d = \text{constante}$), et la force du ressort est donnée par une droite $F = kd$. On a donc trois limites : une supérieure $F < F_{\text{max}}$ correspondant à une condition de non-glissement, une inférieure $F > F_{\text{min}}$ correspondant à une condition de démarrage et une condition sur l'encombrement $d < d_{\text{max}}$.	35

Figure 26 : Statistiques des 23 prototypes à mi-parcours..... 36

1. Projet pédagogique: former des ingénieurs, former des scientifiques

Comment former des ingénieurs ? Comment former des scientifiques ? Comment former des jeunes qui soient des ingénieurs dominant la méthode scientifique ? Comment définir les objectifs ? Comment atteindre les objectifs ? Comment mesurer le chemin parcouru ?

Ces quelques questions donnent la mesure du travail à accomplir¹ !

1a. Liens avec le référentiel de compétences

Le projet pédagogique que je poursuis dans mes enseignements dépend essentiellement des étudiants auxquels ils s'adressent : donner les bases abstraites et techniques² (cours de mécanique rationnelle et cours de technologies), apprendre à mobiliser les apprentissages mécaniques (cinématique et dynamique des machines, organes des machines) dans un processus de conception de nouveaux produits³ (design methodology), développer une démarche rationnelle chez l'ingénieur⁴ (choisir d'une technologie dans le cours de procédés de microfabrication), associer mes étudiants à mes travaux scientifiques pour les confronter par la pratique à la démarche scientifique⁵ (composants microtechniques), les mettre en situation d'acteurs de leur formation^{6,7} (gestion d'un contact industriel et conduite d'une discussion technique avec celui-ci dans le cours de procédés de microfabrication).

1b. Aperçu synthétique des enseignements

Je commence par donner un rapide aperçu des cours enseignés ces 5 dernières années.

- MECA-H-200 Mécanique rationnelle, depuis le 15/09/2016, BA2 (2-2-1)

Enseignement ex-cathedra des concepts de mécanique du solide (cinématique, théorèmes généraux, équations de Lagrange, systèmes à masse variable, chocs), prestation d'une partie des TP, supervision des laboratoires (gyroscope, pendule balistique et inertie) et du projet de prise en main d'un logiciel de calcul scientifique (Matlab, Python, Octave) illustrant le chaos déterministe.

- MECA-H-501 Composants microtechniques, depuis février 2007, MA2 (2-0-2)

Cours issu de mes recherches (qui s'intitulera à l'avenir « Soft Microrobotics »), illustrant la conception de systèmes microtechniques et microrobotique fluide (capillarité, tension de surface) et flexible (guidages flexibles, matériaux actifs, structures à raideur variable). Le cours illustre également deux méthodologies de recherche : analyse dimensionnelle et plans d'expériences. Le cours prend la forme de séminaires, et d'un projet personnel mené par les étudiants.

¹ Référentiel de compétences de l'Ecole Polytechnique :

<http://www.ulb.ac.be/facs/polytech/docs/ReferentielComp.pdf>

² Compétence SAVOIR/polyvalence dans le domaine des sciences et techniques (référentiel de l'EP)

³ Compétence RESOUDRE DES PROBLEMES MULTIDISCIPLINAIRES/Innover

⁴ Compétence RESOUDRE DES PROBLEMES MULTIDISCIPLINAIRES/Mettre en œuvre des solutions

⁵ Compétence RESOUDRE DES PROBLEMES MULTIDISCIPLINAIRES/Adopter une démarche scientifique adaptée

⁶ Compétence GERER DES PROJETS

⁷ Compétence MAITRISER LA COMMUNICATION

Ce cours s'appuie sur des cours donnés à Technifutur (« Introduction aux microtechniques), à la Fondation Suisse pour la Recherche en Microtechnique (FSRM, capillary forces in microassembly), durant un cours d'été à l'université Aalto (2013), et récemment en consultation pour la société suisse Cohuseg. La partie sur les plans d'expériences a fait l'objet d'une mission de formation pour la société ABB.

- MECA-H-500 Procédés de microfabrication, depuis février 2007, MA2 (2-0-1)

Cours partiellement en « classe inversée », dans lequel les étudiants préparent un séminaire sur une technique de fabrication de leur choix, en se documentant et en visitant une entreprise du secteur, avant d'interagir avec moi et de finalement présenter un séminaire à leurs condisciples. Trois demi-journées sont dédiées à la visite d'entreprises.

- MECA-H-409 Design Methodology, du 15/09/2011 au 15/09/2016 (2-2-1)

Cours ex-cathedra portant sur la présentation de la méthodologie de conception de produit, reposant sur a) l'analyse fonctionnelle et le cahier des charges, b) le design conceptuel, c) le design d'embodiment, d) le design détaillé (plans de fabrication et d'assemblage, liste des matériaux). Illustration par des séminaires invités sur l'ergonomie, la conception de dispositifs médicaux, la propriété intellectuelle.

- TRAN-H-101 Projet multidisciplinaire, année 2012-2013
Définition et pilotage du projet BA1 sur les véhicules mécaniques à l'échelle du jouet, propulsés par de l'énergie mécanique stockée dans des ressorts.
- Supervision de projets MA1, stages et MFE
3 projets MA1 chef d'équipe, 4 projets MA1 techniques, 8 stages, 19 MFE, 4 stagiaires IN du Politecnico di Milano

On voit donc que le spectre de mes enseignements est très large, allant de l'enseignement des connaissances fondamentales à l'exposé de méthodologies de recherche scientifique. A la Figure 1, j'ai regroupé les différentes formes d'enseignements auxquels j'ai contribué en cinq groupes :

1. (Physique et mathématique avant l'université)
2. Sciences de base
Connaissances fondamentales, mécanique appliquée pour architectes, mécanique rationnelle I et II
3. Cours liés à l'enseignement de la conception mécanique
Technologies, cinématique et dynamique des machines, organes des machines, composants microtechniques, procédés de microfabrication, design methodology
4. Cours méthodologiques
Design of experiments, analyse dimensionnelle
5. Projets

Pour chacun de ces enseignements, on indique en synthèse trois types d'information :

1. Le type d'activités d'enseignement organisés : cours ex-cathedra, séminaires, exercices, laboratoires, travail individuel ou en groupe, stage ou visite industrielle

- La confrontation des étudiants avec une réalité de recherche : les étudiants du cours de composants microtechniques (MECA-H-501, microtechnics elements) sont ainsi confrontés à la conception de bancs de mesure pour valider certains modèles issus de mes recherches. Les projets de MA1 et de MFE sont quant à eux très fortement colorés par mes activités scientifiques.
- Le type de support d'enseignement disponible : livre de référence, syllabus, transparents.

Enfin, lorsque je prends une part active à une forme d'enseignement ou lorsque j'ai moi-même contribué à la rédaction des supports d'enseignement, la case est grisée. Lorsque l'activité (par exemple de tp dans le cours de meca-h-200) est assurée par un assistant ou lorsque j'utilise des supports de cours existant, le fond de case est blanc.

LEGEND												
	Ex-cathedra	Seminar	Exercises	Practical work (labos)	Individual project	Collective project	Internships / Industrial visits	Teaching	Research	Textbook	Lecture notes	Slides
v = colleagues's contribution v = my contribution												
Physics and mathematics	v		v	v				v		v	v	
BA1 - Basics	v		v					v			v	v
BA1 - Statics for architects	v		v					v		v	v	v
BA1 - Mechanics for engineers I	v		v					v		v	v	v
BA2 - Mechanics for engineers II	v		v	v	v			v		v	v	v
BA2 - Technologies (partim)	v		v	v			v	v			v	v
BA3 - Machines kinematics and dynamics	v			v				v			v	v
MA1 - Machines elements	v		v					v			v	v
MA2 - Microtechnics elements	v		v	v	v			v	v		v	v
MA2 - Microfabrication	v						v	v			v	v
MA1 - Design methodology	v		v				v			v	v	v
PhD - Design of experiments		v							v		v	v
BA1 - project							v					
MA1 - project						v		v	v			
MA2 - project (master thesis)						v		v				

Figure 1: Vue synthétique de mes enseignements

1c. De la recherche à l'enseignement, et le contraire

Les quelques transparents reproduits ci-après essaient de rendre compte des liens que j'essaie de tisser entre enseignement, science, ingénierie et applications industrielles.

L'enseignement des sciences de base (comme la mécanique rationnelle) est une première occasion, chronologiquement dans le cursus des étudiants, de faire des liens (voir la Figure 2) entre concepts abstraits (par exemple le principe des travaux virtuels), une réalité quotidienne (l'exemple du tire-bouchon), et le médiateur entre les deux qu'est l'exercice de modélisation (diagramme du corps libre représentant les forces ou modèle CAO).

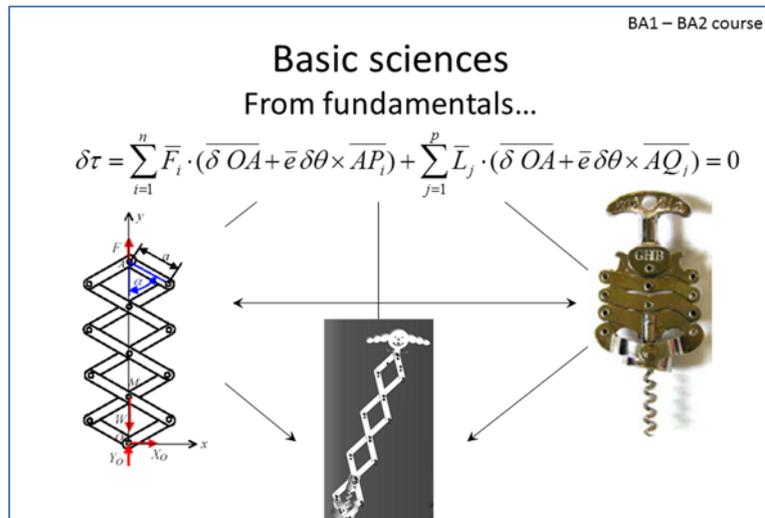


Figure 2 : Enseignement des sciences de base : concepts abstraits, modélisation et réalité

S'appuyant sur les concepts acquis dans ces cours de mécanique rationnelle, on peut ensuite (Figure 3) aborder les applications dans les cours de mécanique plus appliquée (modélisation et utilisation du frottement dans un frein à disque ou à bande), et renforcer la démarche scientifique en discutant avec les étudiants la limite de validité des modèles (l'appui représenté ci-dessous doit-il être représenté comme un rouleau ou bien une rotule ? Imaginez par exemple les effets de la dilatation thermique...), mais aussi leur généralisation (la structure métallique ci-dessous est la généralisation des concepts de liaison rouleau et rotule sous la forme d'une fine lame flexible et d'un pivot à lames croisées).

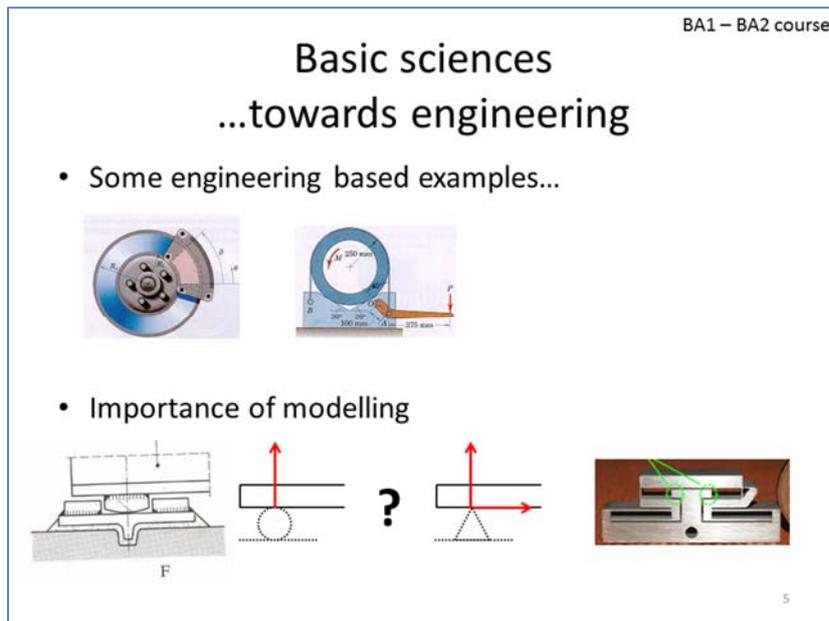


Figure 3 : Des sciences de base vers l'application : modélisation de machines et limites des modèles

Ces connaissances de base et les compétences associées peuvent alors être renforcées par l'enseignement de cours de conception mécanique dans lesquels on peut solliciter des compétences de plus haut niveau et associer partiellement les étudiants à nos activités de recherche. Citons par exemple:

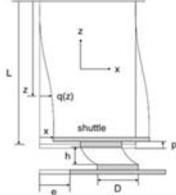
- La conception de bancs de mesure (cours de composants microtechnique, Figure 4), ayant donné lieu dans ce cas-ci à une publication dans le journal *Microfluidics and Nanofluidics* : il s'agissait d'un banc de mesure de la force développée par le cisaillement d'un pont liquide (modélisation du phénomène de centrage de composants électroniques lors de la phase dite de reflow, étudiée dans le projet européen HYDROMEL).

MA1-MA2 course

Mechanical design

Microengineering components

- Lectures
 - Scaling laws, dimensional analysis, surface tension effects, guiding, force measurement, electrostatic actuation...
- Student project
 - Example: design a set up for lateral capillary forces (μN)



Microfluid Nanofluid
DOI 10.1007/s10404-010-0595-2

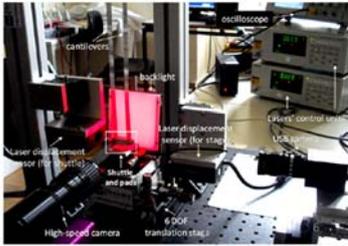


Figure 4 : Conception mécanique et recherche : une application dans les microtechniques

- L'apprentissage et la sélection d'un procédé de fabrication adapté à un problème, càd à un produit et une taille de lot de fabrication. La Figure 5 présente les différentes techniques et produits étudiés dans le cours meca-h-500 sur les procédés de microfabrication. Le cas d'étude de l'injection de micro-aiguilles en polymère est lié au projet first spin-off REMAID.

MA1-MA2 course

Mechanical design

Manufacturing (project & lectures)

- Goal: study physical principles, technology, typical performances and limitations, competing techniques, cost...
- Production techniques
 - Injection (collab. Simonis plastics, Procoplat)
 - Investment casting (collab. Précimétal)
 - Laser cutting (collab. Garnimétal, Laserflash)
 - Electro-Discharge Machining (collab. Mecasoft)
 - Excimer laser (collab. Optec)
 - Water jet cutting (collab. MecanicSystem, Laserflash)
 - Sputtering (collab. Centre spatial de Liège)
 - Photolithography (collab. IMEC)
 - Rapid prototyping (collab. Sirris Gosselies)
 - Metal etching (collab. Adenco)
- Products
 - Polymer microneedles injection (collab. Sirris Liège)
 - Stents (collab. Cardiatis)
 - Carbon Nano Tubes (collab. Nanocyl)

<http://beams.ulb.ac.be/beams/teaching/meca-h-500.html>

7

Figure 5 : Conception mécanique et recherche : une application en microfluidique, les micro-aiguilles en polymère injectées

- La pratique d'une méthodologie de conception, telle que proposée par Pahl et Beitz⁸. Le cas d'étude proposé aux étudiants avait trait l'an dernier à la conception d'un dispositif esclave (au sens d'un système à retour de force) permettant l'insertion automatisée d'un cathéter dans un endoscope (cas d'étude tiré du projet de recherche Région Wallonne SENSENDO).

MA1-MA2 course

Mechanical design

Design methodology (project & lectures)

- Year project
 - Background:
 - MI surgery and endoscopic surgery
 - Surgical tool is linked to a catheter
 - Catheter is inserted manually by the surgeon into the endoscope
 - Information from the end-user:
 - Need for motorized insertion of a catheter into an endoscope, for instance with a continue current motor. Insertion range is large (>2m). Friction force to overcome during insertion is unknown, and the catheter cannot be curved too much. We think to a device such as depicted in the next figure [...]



<http://beams.ulb.ac.be/beams/teaching/meca-h-409.html>

8

Figure 6 : Conception mécanique et recherche : une application biomédicale

L'ensemble des acquis est ensuite mis en pratique dans le master de fin d'études. La Figure 7 présente 9 exemples de sujets, regroupés autour de mes trois axes de recherche : les applications médicales, le domaine des microtechniques et celui de la microfluidique. A travers ces exemples, on voit que l'étudiant est amené à développer une approche scientifique de problèmes industriels ou à contribuer à notre effort en recherche fondamentale dans ces domaines⁹.

MA2 program

Master Thesis Projects

Examples (9/38)

- Medical field
 - Design and production of a device for microneedles transdermal injection (Grant from BIR&D Belgian industrial Research and Development)
 - Feasibility study of a reservoir drug eluting stent concept (collaboration Medpole)
 - Design of a stereotaxy frame (collaboration Hôpital Erasme)
- Micro-engineering field
 - Design and characterization of a stick and slip piezo actuator
 - Design and manufacturing of an AFM based nanoforce sensor (collaboration Paris 6-ISIR)
 - Microcomponents handling with capillary forces: gripper design (collaboration ISMECA)
- Microfluidic field
 - Experimental study of electrosprays (collaboration UCB)
 - Study of capillary forces: application to microsystems dynamics
 - Capillary effects on the mechanical behaviour of granular media

9

⁸ Pahl et Beitz, Engineering Design, Springer

⁹ Les 3 axes cités ne sont pas équivalents de ce point de vue, le domaine médical étant plus riche en applications, celui des microtechniques et de la microfluidique étant plus riche en questions scientifiques. Ceci n'est pas lié à ces domaines, mais plutôt à la réalité de mes collaborations

Figure 7 : Exemples de sujets de MFE, groupés autour de mes 3 axes de recherche

Certaines questions scientifiques ou industrielles ne peuvent toutefois pas être résolues par la modélisation. Il convient alors de se tourner vers une méthodologie expérimentale, que je présente à mes étudiants de MFE et à mes collaborateurs scientifiques (Figure 8). Par le passé, la méthodologie des plans d'expériences a été mise en œuvre par Eric Shek, pour le développement du procédé électrospinn pour le centre de recherche CENTEXBEL (centre de recherche de l'industrie textile) et par Florence Allé, pour le développement d'un instrument d'application de poudre pour le service de gastro-entérologie de l'hôpital Erasme. A ce stade, on est au plus près de la production de résultats scientifiques, qui peuvent alors être publiés comme cela l'a été pour Bruno Daunay dans le journal Lab on a Chip ou Grégory Tortissier dans le Journal of Micromechanics and Microengineering.

PhD course

Methodology

Design of experiments

- Methodology seminars
 - Université libre de Bruxelles
 - Experimental design for electrostimulators implantation (PhD thesis Laurent Lonys)
 - Experimental design for design of drug eluting stents (Master thesis Sven De Roeck)
 - Tokyo University
 - Experimental design for liquid dielectrophoresis characterization (Daunay'12)
 - Experimental design for CF4 plasma treatment-assisted inkjet printing for color flexible display (Tortissier'11)
 - Aalto University
 - Seminar on DOE as invited professor

10

Figure 8 : Séminaires de méthodologie expérimentale

En conclusion de cette section sur les liens entre enseignement et recherche, on voit à la Figure 9 les différents chemins entre recherche industrielle, recherche de base en ingénierie, recherche fondamentale et enseignement.

A titre illustratif, le projet de recherche que j'ai effectué en 2008 pour l'association suisse de recherche horlogère (recherche industrielle) m'a permis de développer à l'EPFL un capteur de force deux axes (recherche de base en ingénierie), qui a été modifié par les étudiants du cours de composants microtechniques (ULB) afin de répondre à une question fondamentale sur les forces développées par le cisaillement d'un pont liquide. Cette question de base était soulevée dans le cadre d'un projet de recherche européen portant sur l'assemblage hybride de composants (projet

HYDROMEL, combinant placement robotique haute cadence de composants et auto-alignement de précision par des ponts liquides).

L'expertise acquise au sein de ce cheminement a pu également être valorisée en 3^{ème} mission à travers des formations dispensées pour Technifutur (2010, 2012) et la Fondation Suisse de Recherche en Microtechnique (2010). Elle a permis à l'été 2013 le placement d'un stagiaire de l'EPB auprès du centre de R&D de Swatch, à Granges (CH).

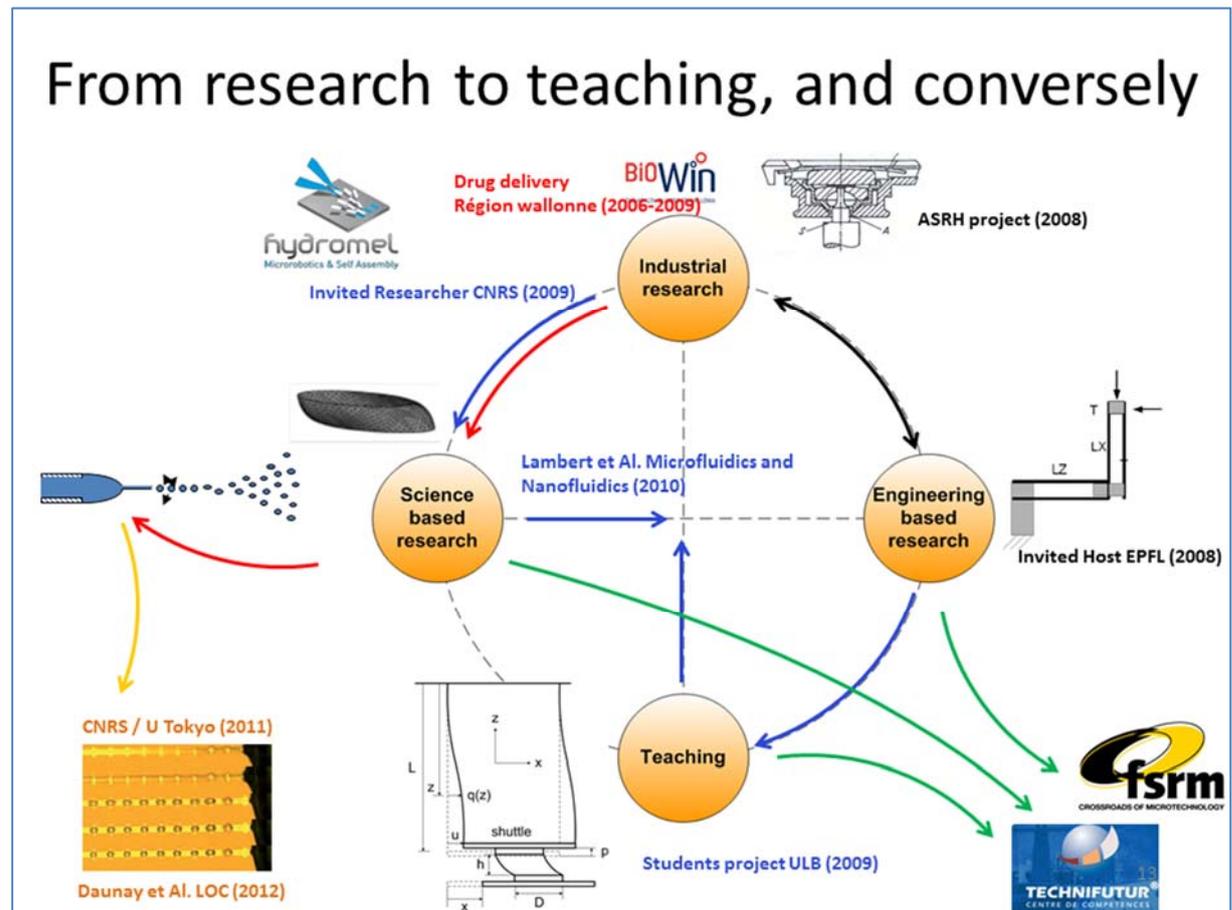


Figure 9 : Liens entre recherche industrielle, recherche fondamentale, recherche de base en ingénierie et enseignement

1d. Conséquences sur les formes d'enseignement

Les formes et supports d'enseignement sont donc adaptés à chaque public.

Ainsi, mon cours de mécanique appliquée destiné à des étudiants en architecture de BA1 s'appuyait sur un syllabus¹⁰, un nombre limité d'ouvrages de référence et un ensemble de supports de cours (présentations) et d'exercices corrigés disponibles au format électronique. Ce cours bien structuré était destiné à des étudiants en phase d'adaptation à l'enseignement supérieur : on doit y donner les bases nécessaires à ce qui suivra, à savoir la résistance des matériaux. Au contraire, les cours que je développe actuellement pour mes enseignements de microtechniques

¹⁰ Cours de mécanique appliquée pour architectes: <https://164.15.80.101:5001/fbsharing/nafCHo7G>

(composants microtechniques et procédés de microfabrication) impliquent davantage les étudiants dans leur apprentissage, par des projets personnels, des visites d'industrie qu'ils rapportent ensuite par des séminaires qu'ils animent ainsi qu'une synthèse d'informations provenant de sources pédagogiques (livres de référence), scientifiques (articles de revues) et technologiques (outils de veille technologique, brevets).

Ainsi, dans le cadre du cours de microfabrication, les étudiants sont amenés à présenter un travail sur une méthode de fabrication¹¹ ou un produit microtechnique¹² : ils présentent la technique du point de vue de l'ingénieur utilisateur, pas du spécialiste, ce qui les amène à aborder les questions traitant des principes scientifiques, constituants technologiques, règles de conception, avantages et inconvénients, procédés concurrents de la technique. Le travail est impérativement accompagné d'une visite chez un industriel, dans le but d'aborder la question des coûts de production. Les étudiants sont interrogés sur une pièce qui leur est donnée, et dont on demande la méthode de production ainsi que le coût de fabrication pour une série d'une taille donnée.

Dans le cadre du cours de composants microtechniques, un projet collectif prend de plus en plus d'importance. Les heures de cours à ma disposition sont utilisées pour présenter le problème à traiter, la méthodologie du projet et les bases scientifiques nécessaires. Les leçons restantes sont utilisées pour des revues de projet avec les étudiants. Par le passé, nous avons traité la conception et le dimensionnement d'un actionneur électrostatique, la conception d'un banc expérimental pour la mesure des forces de capillarité en micro-assemblage et la conception d'un dispositif de mesure de forces de capillarité entre deux grains millimétriques. Ainsi, je peux directement impliquer les étudiants dans mes préoccupations de recherche¹³. Des heures de cours sont également consacrées à la tenue de séminaires spécialisés, donnés ces dernières années par de nombreux conférenciers extérieurs (Prof. M. Tichem, TUD, Prof. S. Régner, Paris VI, Dr M. Boukallel, CEA, Dr X. Rottenberg, IMEC).

Enfin, le cours Design Methodology créé pour Bruface s'appuie sur les relations de recherche développées avec le monde médical et la collaboration avec Jean Patternotte, designer industriel.

Ces aspects seront redéveloppés au point 3 sur les supports de cours.

1e. Projet pour les années à venir

Pour les prochaines années, je me donne les objectifs suivants, essentiellement pour le cours de mécanique rationnelle MECA-H-200 :

- rédaction de nouvelles notes de cours,
- illustration des liens avec les cours amont (connaissances fondamentales, analyse, géométrie, mécanique rationnelle 1, physique générale, informatique) et aval (analyse numérique, cinématique et dynamique des machines, mécatronique, résistance des matériaux, phénomènes de transport, calcul des variations, physique quantique...);

¹¹ On a déjà traité par exemple la micro-injection plastique, la découpe laser, la découpe par jet d'eau, les techniques de salle blanche, l'électro-érosion, la découpe chimique, le prototypage rapide, le moulage

¹² Production des nanotubes de carbones, des stents multicouches, des matrices d'aiguilles pour l'électro-physiologie

¹³ Les travaux réalisés en 2011-2012 et 2012-2013 ont permis la préparation d'un projet FNRS PDR qui vient d'être accepté.

- réalisation de nouvelles expériences pour les laboratoires (nécessaires en raison de leur âge, du déménagement à la Plaine et/ou de l'installation d'un laboratoire d'enseignement à Charleroi),
- organisation de rencontres pédagogiques sur l'enseignement de la mécanique avec les collègues en charge en communauté française (formation mutuelle de nos assistants),
- introduction de séances en classe inversée,
- participation à l'enseignement de la mécanique à Charleroi,
- prise de contact avec l'Experimentarium pour exploiter leurs expériences en vue de constitution de films expliquant les phénomènes de la mécanique du solide (pendules, brachystochrone, énergie, forces de coriolis...)

Pour le cours de composants microtechniques MECA-H-501, je souhaite démarrer une réflexion pour augmenter le nombre d'étudiants qui le suivent. Il s'agit d'un cours très actuel, enseigné avec succès à l'étranger ou en cours avancé. Une discussion a été entamée avec les filières biomédicale et électromécanique afin de lui donner plus de visibilité.

Le cours de microfabrication a trouvé un équilibre. Il est suivi par un nombre raisonnable d'étudiants pour un cours à option (entre 5 et 15 étudiants), est constamment et automatiquement réactualisé par la forme d'enseignement mise en place (cas industriel), et permet aux étudiants, quand cela se présente, de s'appuyer sur ces heures pour développer une partie de leur mémoire de fin d'études.

J'ai l'intention de continuer à encadrer des stages et des MFE.

Enfin, j'aimerais m'impliquer plus dans la vulgarisation de l'enseignement : AJI, printemps des sciences, université des enfants... Les manip développées pour le cours de mécanique le seront avec l'idée qu'elles puissent être transportées et présentées facilement. Je manque malheureusement de temps pour y consacrer l'énergie que je voudrais, et notamment la concrétisation d'un projet remontant à avant ma thèse lorsque j'enseignais la physique à l'école, consistant à développer une structure itinérante pour l'enseignement des expériences de physique à l'école. Un tel projet gagnerait à s'appuyer sur l'expertise de l'Experimentarium.

2. Plans de cours

De manière générale, j'essaie de fournir pour chaque cours, outre l'information parfois sommaire des fiches de cours¹⁴, un plan de cours présenté lors de la première leçon qui précise les concepts qui seront vus au cours (parfois avec le calendrier précis), l'articulation des travaux pratiques avec le cours (voir le plan du cours MECA-H-200), l'organisation des tp et des labos, les ressources à disposition des étudiants (professeur, assistants, permanences, supports de cours...), l'organisation des examens et la ventilation des notes.

Cinq plans de cours enseignés récemment sont repris annexe 2.2.

A titre de mémoire, je souhaite présenter ici le plan de cours de mécanique appliquée préparé pour les étudiants architectes, et en particulier l'articulation des concepts (Figure 10). On y lira la progression des concepts, illustrant les connaissances et compétences à enseigner (dans les cadres rectangulaires) pour permettre aux étudiants de résoudre des problèmes de plus en plus avancés. Par exemple, la résolution d'un problème de statique du point nécessite les concepts de diagramme de corps libre, les conditions d'équilibre, la vérification de l'isostaticité du problème posé et la capacité à résoudre les équations d'équilibre. Si l'on veut ensuite que l'étudiant puisse résoudre des problèmes de statique du solide, il conviendra de lui présenter les éléments structuraux (câbles, poutres, barres...) et les liaisons de ces solides au monde extérieur (appui simple, rouleau, rotule, encastrement). L'introduction des concepts de jeu et frottement permet ensuite de traiter le cas des appuis non idéaux, comme discuté à la Figure 3 (rouleau ou rotule : cela dépend de l'importance relative du jeu et de l'éventuelle dilatation). Le plan complet est donné à l'annexe 2.3.

¹⁴ Ci-joint en annexe 2.1 pour 4 de mes cours

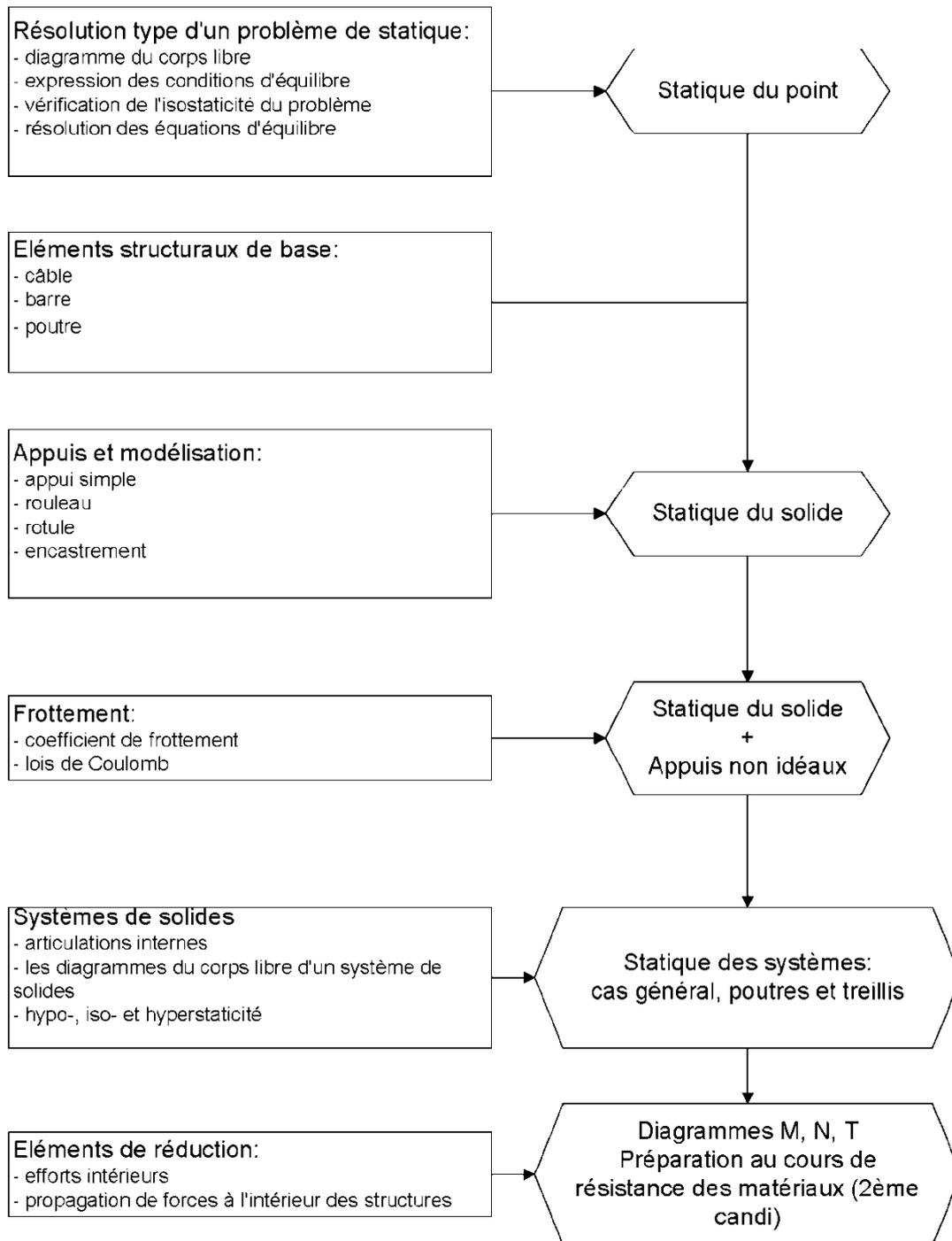


Figure 10 : Articulation des concepts dans le cours de mécanique appliquée pour architectes

3. Supports de cours

Les supports de cours développés sont liés au public (BA1 vs MA2), aux contenus (concepts théoriques vs. actualité technologique), aux compétences visées (développement d'aptitude à la modélisation vs. choix d'une technique de fabrication). Il est donc naturel d'utiliser la palette d'outils à disposition.

3a. Exemple de syllabus très structurant

La nécessité pour un enseignant d'écrire son propre support de cours ou syllabus peut être discutée, voire discutable, tant il est vrai qu'il existe de très nombreux ouvrages de références particulièrement bien faits. Néanmoins, j'ai pris le parti par deux fois de rédiger complètement un nouveau syllabus, pour le cours de mécanique appliquée enseigné aux BA1 architectes (Horta) et pour le cours de méthodologie de conception enseigné aux MA1 électromécaniciens (Bruface).

Le cours écrit pour les étudiants architectes¹⁵ m'a permis d'y développer une vision de l'enseignement de la mécanique rationnelle basée sur l'expérience acquise comme assistant : construction d'un édifice cohérent de concepts (voir l'annexe horta-concepts), présentation expurgée d'outils mathématiques non maîtrisés par ce public (calcul de déterminants et de produits vectoriels par exemple), cadre d'étude structuré particulièrement bien adapté à un public très hétérogène en termes de formation mathématique et scientifique. L'ensemble des documents rassemblés dans ce syllabus en justifie la centralisation dans un ouvrage de référence pour les étudiants : rappels mathématiques idoines, éléments historiques, ancrage et modélisation de la réalité (Figure 11, Figure 12), utilisation de normes...

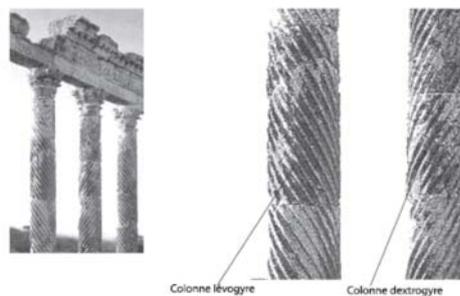


Figure 11 : Illustration des sens de rotation lévo- et dextrogyre : la grande colonnade d'Apamée en Syrie

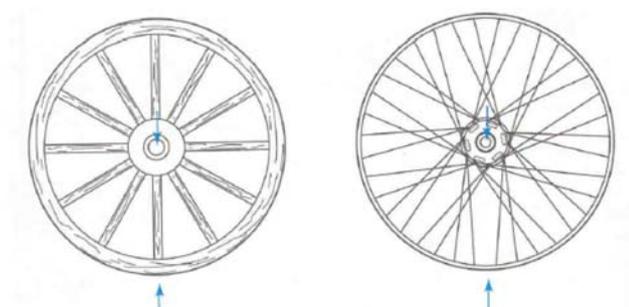


Figure 12 : Illustration des concepts de compression et traction sur des roues de chariot et de vélo

¹⁵ Cours accessible à l'adresse : <https://164.15.80.101:5001/fbsharing/cljqo76o>

3b. Exemple d'exploitation d'un livre de référence

Le cours MECA-H-409 Design Methodology s'adresse aux étudiants MA1 électromécanique du programme BRUFACE. J'ai donc jugé nécessaire de m'appuyer sur un ouvrage de référence dans cette langue¹⁶. J'ai néanmoins élargi le spectre des documents à disposition des étudiants, en leur fournissant des notes de cours « provisoires »¹⁷, sorte de document-valise aussi bien à l'usage des étudiants qu'à l'usage du professeur. Ce document maître permet en effet d'archiver la synthèse de mes lectures dans un document plus structurant que des transparents de cours. Il m'a ensuite servi à construire plus facilement un ensemble de transparents. Un exemple d'illustration de cette interaction entre ouvrage de référence et transparents est donné à l'annexe 3.1, qui illustre une des étapes du processus de conception, à savoir l'étape d'abstraction du besoin. L'exemple choisi met l'étudiant dans la peau d'un ingénieur de conception à qui le client demande une porte de garage pour remplacer celle représentée à la Figure 14a.

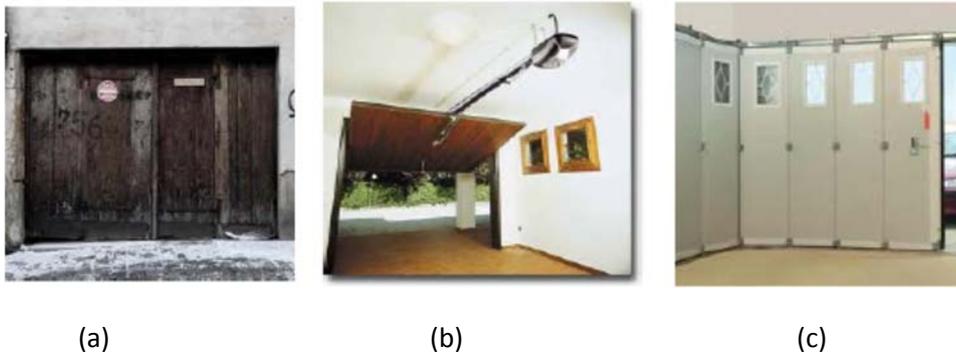


Figure 13 : Concevoir une nouvelle porte de garage pour remplacer (a) : on pense généralement à (b-c)

La plupart des étudiants reconnaît alors penser immédiatement à des solutions du type Figure 13 b-c, alors qu'une abstraction du besoin formulé permet de concevoir la porte de garage comme un moyen de protéger le véhicule des intempéries et des voleurs, ce qui conduit alors naturellement à des solutions telles que représentées à la Figure 14 ci-dessous. L'ensemble de ces documents est accessible sur le site université virtuelle du cours meca-h-409.



Figure 14 : Solutions alternatives obtenues par abstraction du besoin

¹⁶ Pahl et Beitz, Engineering Design, Springer, e-book accessible depuis CIBLE, et également à disposition des étudiants via l'université virtuelle

¹⁷ Design methodology, notes de cours : <https://164.15.80.101:5001/fbsharing/KMH9EIlv>

3c. Exemple d'exploitation de l'université virtuelle

Depuis 2012, l'ensemble de mes supports de cours est disponible sur le site de l'université virtuelle, à savoir :

- (Meca-h-200 : Mécanique rationnelle II)
- (Meca-h-201 : Technologies)
- Meca-h-409 : Design methodology
- Meca-h-500 : Procédés de microfabrication
- Meca-h-501 : Composants microtechniques

Le recours à l'UV a plusieurs motivations :

- Centralisation de l'information pour les étudiants
- Utilisation de certaines fonctions de l'uv comme les tests d'auto-évaluation (utilisés pour l'analyse des préconceptions, voir infra), ou la remise de travaux (meca-h-409).

3d. Utilisation d'un portefeuille de lectures

Le cours MECA-H-500 procédés de microfabrication est un bon exemple de cours sans syllabus. L'objectif principal du cours est de donner aux étudiants un panorama des techniques de production microtechniques, et de leur apprendre à choisir une technique pour un produit donné, ainsi que d'estimer le coût de production associé à une série de taille donnée. La question d'examen typique est illustrée à la Figure 15 ci-dessous :

La société Metal-Cut souhaite réaliser une filière d'extrusion en acier inoxydable, dont on voit la chute ci-dessous. L'épaisseur de cette pièce est de 114 mm. La rugosité attendue de la surface est de $1.4\mu\text{m}$.

- (1) *Quel procédé de fabrication proposeriez-vous ?*
- (2) *Décrivez le principe de ce procédé ainsi que ses différents constituants technologiques.*
- (3) *Quel est d'après vous le temps nécessaire à la fabrication de cette pièce ?*
- (4) *Quel en serait le coût unitaire ?*

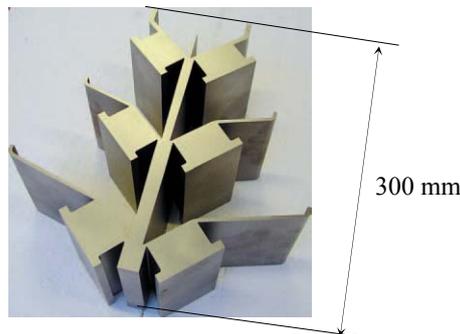


Figure 15 Exemple de question d'examen posée dans le cours meca-h-500 Procédés de microfabrication

Les étudiants se construisent donc un portefeuille de lectures disponible le jour de l'examen, notamment constitué des éléments suivants :

- Séminaires donnés par le professeur (voir par exemple le séminaire sur l'usinage par laser excimère en annexe 3.2)
- Ouvrages de référence mis à disposition par le professeur
- Articles de référence des techniques de l'ingénieur (accessible via le site des bibliothèques)
- Notes de visites d'entreprises (laboratoires du cours)
- Rapport individuel ou de groupe sur la technique choisie par le (groupe d') étudiant(s), basé notamment sur un rendez-vous personnalisé chez l'industriel choisi. Un exemple de rapport dans le domaine de la découpe par laser et jet d'eau est téléchargeable¹⁸ et consultable en annexe 3.3.

3e. Utilisation de transparents

Le recours aux transparents étant généralisé, je me suis limité à donner ici¹⁹ l'exemple de la leçon d'introduction du cours de composants microtechniques, illustrant les concepts de lois d'échelle (annexe 3.4).

¹⁸ <https://164.15.80.101:5001/fbsharing/aR8EHdb7>

¹⁹ <https://164.15.80.101:5001/fbsharing/7iPAxl2P>

4. Encadrement de mémoires et thèses de doctorat

Quantitativement, mes activités d'encadrement sont représentées schématiquement à la Figure 16 ci-dessous : organisation d'1 projet de BA1, supervision d'1 projet de BA2, de 28 projets de MA1, de 58 MFE, de 4 stagiaires IN, de 9 stagiaires OUT, de 7 DEA et de 11 doctorants (6 ont défendu, 5 y travaillent).

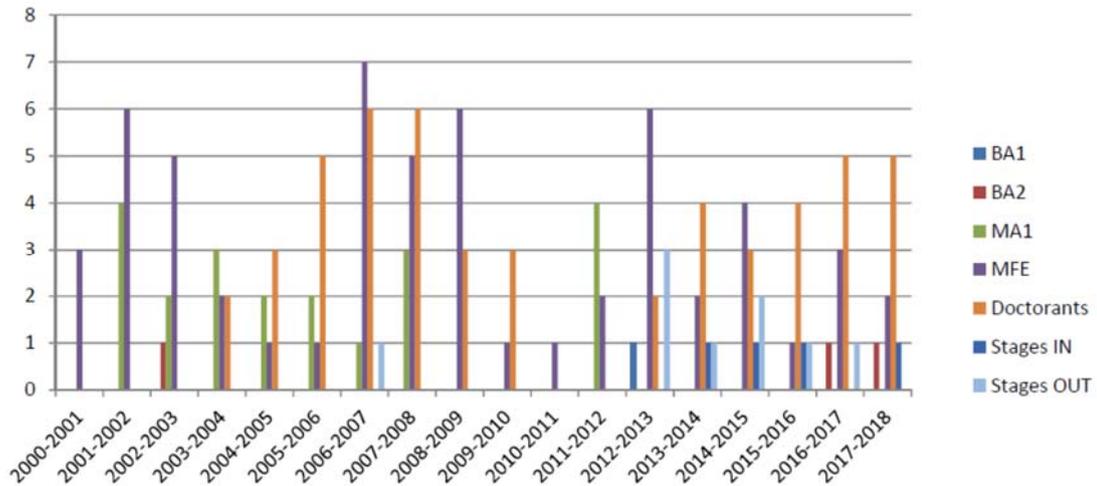


Figure 16 : Encadrements annuels (nombre de chacun des projets, à l'exception des doctorats, pour lesquels on donne le nombre de doctorants)

En ce qui concerne l'encadrement de mes doctorants, je suis particulièrement soucieux de leur créer un environnement intellectuel propice aux discussions scientifiques. Cela passe par la mise en contact avec des équipes internationales, des cotutelles de thèse et des redondances au sein de l'équipe, représentées par la Figure 17 ci-dessous, tirée de mon habilitation à diriger des recherches (obtenue le 7 septembre 2010 à l'Université de Franche-Comté) : on y voit les liens qui se sont tissés entre mes doctorants : partage de dispositifs expérimentaux, de modèles physiques, d'outils numériques.

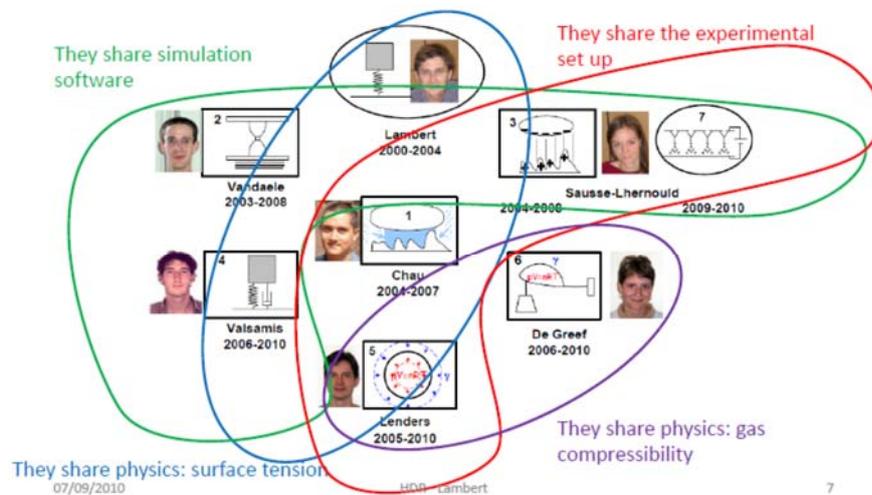


Figure 17 : Liens possibles au sein d'une équipe de doctorants : partage de dispositifs expérimentaux, de modèles physiques, d'outils numériques (2010)

Les collaborations internationales que j'ai pu tisser en recherche (voir la figure ci-dessous présentant mes différents co-auteurs) ont bénéficié à mes doctorants, en particulier Cyrille Lenders, qui a été encadré en cotutelle par les Prof. Nicolas Chaillet et Dr Michaël Gauthier (cotutelle Université de Franche Comté) et moi, Marion Sausse-Lhernould, encadrée en cotutelle par la Prof. Stéphane Régnier (cotutelle Paris VI), ainsi que Ronald Terrazas (cotutelle avec l'Université de Franche-Comté). Ces cotutelles permettent aux doctorants de l'ULB d'accéder à des équipements scientifiques par toujours disponibles à l'ULB, mais surtout de leur donner un horizon scientifique aussi large que possible.

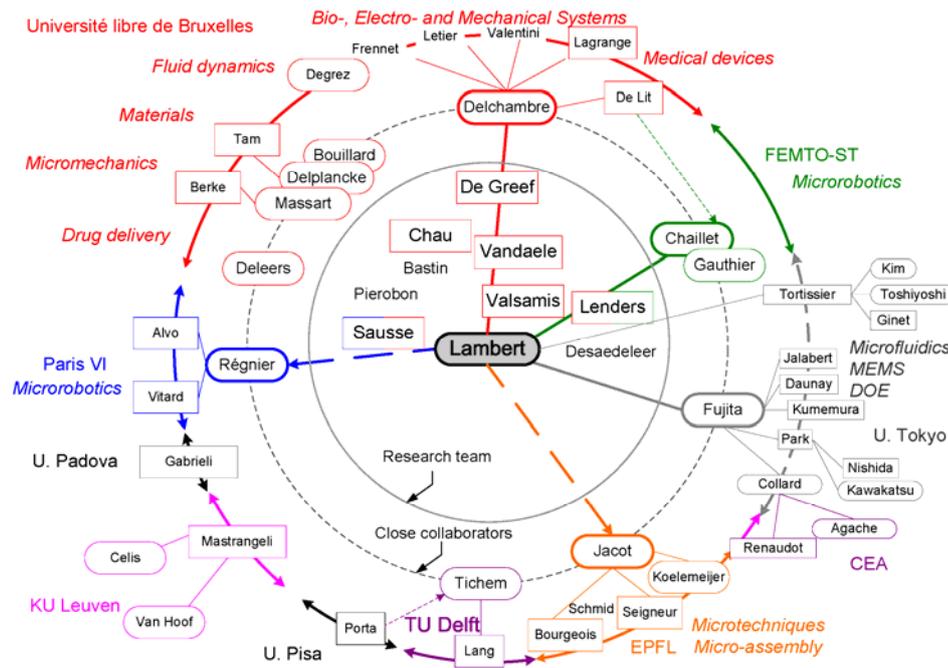


Figure 18 : Liste de mes co-auteurs, autant de collaborations élargissant l'horizon des doctorants (2010)

Ces encadrements se sont bien déroulés (pas ou peu de retard à la soutenance, pas d'abandon, publications raisonnables des résultats obtenus). Toutefois, mes préoccupations dans les thèses à venir seront nourries par les éléments suivants :

- Comment assurer des conditions de recherche satisfaisantes en termes de disponibilité d'esprit aux candidats assistants ?
- Comment développer une recherche exploratoire dans un contexte de plus en plus tendu (contexte international des thèses en 3 ans, compétition féroce pour l'obtention des bourses...) ?
- Comment développer une ambiance collaborative dans un contexte de compétition accrue ?
- Comment garder moi-même le contact avec l'actualité scientifique de mes doctorants, dans un environnement extrêmement sollicitant ?

5. Activités pédagogiques hors cours

J'ai commencé mon parcours d'enseignant à l'ULB comme étudiant (membre, puis responsable de la cellule Préexpo en 1996-1998), puis élève-assistant en mécanique rationnelle (1997-1998), et enfin assistant (2000-2005), avant d'occuper successivement les charges de suppléant (2005-2006), maître de conférences (2006-2007) et enfin premier assistant (depuis 2007).

Hors cours universitaire, notons également les activités de professeur de physique et mathématique (1999-2000), la tenue de permanences hebdomadaires (2000-2005), l'animation d'ateliers printemps des sciences et jeune ingénieur (2011-2012), ainsi que la vulgarisation de la lévitation acoustique²⁰ à la Fête de la science à Lille en octobre 2007 et à l'exposition sur la physique dans la bande-dessinée organisée en 2008 à Parentville (annexe 5.1).

6. Responsabilité de gestion/expertise liée à l'enseignement

J'ai exercé des responsabilités de gestion liées à l'enseignement dans les domaines suivants :

- A l'international :
 - o Expert extérieur de la commission académique de la filière d'enseignement microtechnique de l'EPFL (Avril 2013, Novembre 2013, Novembre 2014)
- Au niveau de l'école :
 - o Membre de la commission pédagogique depuis 2015
 - o Groupe de travail sur la réforme de l'avis pédagogique (2003, Doyen Raymond Hanus) ;
 - o Contribution à l'élaboration du référentiel de compétences de l'EP ;
 - o Visites d'école, représentation aux salons étudiants
- Au niveau des filières
 - o Membre des filières Tronc commun (et coordinateur pédagogique de cette filière en 2006-2007), électromécanique, biomed ;
- Au niveau du service
 - o coordination pédagogique de l'enseignement de la mécanique et de leurs chargés d'exercices (examen d'admission, connaissances fondamentales, mécanique rationnelle I et II, technologies, cinématique et dynamique des machines, méthodologie de conception ...)
- Au niveau des cours : gestion de l'équipe du cours MECA-H-200 (2AEX, 1ASS)

²⁰Lévitation de 3 composants simultanément (<https://164.15.80.101:5001/fbsharing/qMfR4y2q>) et lévitation d'une goutte d'eau (<https://164.15.80.101:5001/fbsharing/dway5p0R>)

7. Evaluations de l'enseignement

Le retour sur ma pratique d'enseignant s'est fait par quatre canaux.

1. La prise d'avis pédagogiques ;
Les derniers avis pédagogiques ont traduit ma surcharge de l'an dernier, ainsi que la charge trop lourde pour les étudiants de méca-h-500 et méca-h-501 (rien n'a pourtant été modifié dans ces cours).
A partir de cette année, j'ai donc renoncé à donner les cours de technologies et mécanique rationnelle II.
La critique des étudiants concernant méca-h-500 et méca-h-501 a été entendue : le rapport de visites d'entreprises est supprimé, ainsi que la préparation d'un article scientifique.
2. Le retour du terrain, par les nombreuses discussions avec les étudiants à l'occasion des TP et des permanences proposées. Ce mode de retour est moins efficace pour les cours ex-cathedra ;
3. La supervision des équipes de chargés d'exercices pour les cours MECA-H-100 et MECA-H-200, ainsi que la supervision des assistants de MECA-H-201, MECA-H-409, MECA-H-500, MECA-H-501... ;
4. L'analyse serrée des erreurs commises par les étudiants lors des examens : je donne en annexe 7.1 un exemple de dépouillement des erreurs (examen de MECA-H100).

8. Formation pédagogique et didactique

J'ai acquis ma formation pédagogique initiale à la fois par la pratique du métier d'enseignant de physique et mathématique dans l'enseignement secondaire supérieur de la Ville de Bruxelles (enseignement général, technique et artistique) et par l'obtention du diplôme d'agrégation de l'enseignement secondaire supérieur (orientation physique), obtenu en juin 2000 à l'ULB.

Devenu chargé d'exercices, assistant puis premier assistant, j'ai suivi également plusieurs des séminaires proposés aux enseignants de l'ULB :

- Initiation à l'apprentissage par projet : le rôle du tuteur (4h), N. Postiaux ;
- Introduction à la dynamique de groupe dans une situation d'apprentissage en équipe (théorie et pratique, 4h), N. Postiaux ;
- Séminaire sur les difficultés d'apprentissage des étudiants (2h), B. Rey ;
- Séminaire sur les formes d'apprentissage (2h), A. Lammé ;
- Compilatio, un outil de détection du plagiat (2012) ;

J'ai également pris part activement comme formateur au cycle de formation « Des outils et des profs », pendant l'année 2005-2006. Ces travaux sont décrits au point 9 ci-dessous.

De nombreuses lectures ont nourri ma réflexion pédagogique^{21,22} et didactique, notamment une liste bibliographique fournie en annexe 8.1, ainsi que des lectures sur les liens entre créativité et ingénierie.

Finalement, ma culture didactique s'est aussi développée par la fréquentation de musées des sciences et/ou de techniques (Maison de la science à Liège, exposition à Parentville, experimentarium de l'ULB, musée du Pass Frameries, Cité des sciences, Palais de la découverte, et Conservatoire des Arts et Métiers à Paris, Musée des technologies de Milan, Exposition sur la physique à Neuchâtel, musée du temps à Besançon, musée d'histoire du fer à Nancy), et également par de nombreuses discussions sur l'enseignement de la mécanique avec des enseignants suisses, dont les Prof. Jacques Jacot et Dr. Jean-Marie Fürbringer à l'EPFL et le Prof. Jean-Daniel Lüthi à la haute école ARC au Locle. Dans le domaine de la mécanique, nos collègues romands peuvent être considérés un peu comme des allemands francophones, ce qui donne un regard fort différent de celui offert par la tradition française dont est²³ inspiré l'enseignement dispensé à l'ULB. Ma manière d'enseigner le cours sur les techniques de microfabrication (MECA-H-500) est directement inspirée de ces échanges (voir plus haut).

Mon séjour en Finlande a été l'occasion de lire l'ouvrage de Pasi Sahlberg (<http://pasisahlberg.com/>): Finnish lessons, sur le système d'enseignement finlandais²⁴.

Autre lecture :

Marco Guibault, Anabelle Viau-Guay, La classe inversée comme approche pédagogique en enseignement supérieur : état des connaissances scientifiques et recommandations, in Revue internationale de pédagogie de l'enseignement supérieur, 33-1 (2017) - URL : <http://ripes.revues.org/1193>

²¹ Richard Prégent, L'encadrement des travaux de mémoire et de thèse : conseils pédagogiques aux directeurs de recherche

²² Préfaces des nombreux ouvrages d'Henri Bouasse, professeur à la faculté des sciences de Toulouse dans les années 1910-1920, portant un regard critique sur les étudiants et les pratiques de son époque

²³ Je devrais sans doute dire « était », tant nous remettons nos programmes sur le métier

²⁴ <http://pasisahlberg.com/finnish-lessons/about-finnish-lessons/>

9. Recherches et publications à caractère pédagogique ou didactique

A l'occasion du cycle de formation « Des outils et des profs » tenu pendant l'année académique 2005-2006, j'ai pu approfondir le concept de préconceptions dans l'apprentissage de la mécanique.

Étudiée largement par Laurence Viennot, les préconceptions représentent le savoir de l'apprenant qui est antérieur à la pensée scientifique qu'on essaye de lui inculquer. Certaines préconceptions sont historiques (représentation aristotélicienne du mouvement antérieure à l'énoncé du principe d'inertie par Galilée) ou bien liées à la manière dont on a présenté antérieurement le concept à l'apprenant (la notion de moment de force par exemple est traditionnellement introduite à l'école avec l'exemple d'une balance dont on équilibre le fléau. Cette manière de faire, si elle a le mérite de mettre de côté la question de la réaction de liaison au niveau de l'appui, induit néanmoins l'idée²⁵ qu'un moment de force ne peut se calculer qu'en une articulation).

Un ensemble de questions a donc été rédigé, pour comparer nos étudiants aux étudiants de la littérature avant de leur soumettre de nouvelles questions relatives aux préconceptions en matière de moment de force et de frottement. Elles sont annexées à la fin du syllabus d'exercices de mécanique rationnelle MECA-H-100 et certaines d'entre elles sont accessibles sous la forme d'une évaluation en ligne, sur le site université virtuelle du cours MECA-H-200.

Le document repris en annexe 9.1 présente l'analyse des réponses fournies, par les étudiants de BA1 lors de leur examen de mécanique rationnelle I du 2 juin 2006, à un questionnaire qui leur était soumis dans le but d'identifier certaines préconceptions et d'avancer des propositions d'explications sous-jacentes. Certaines questions ont été simplement reprises d'enquêtes existantes, dans le but d'évaluer notre « modèle d'étudiant moyen », c'est-à-dire de comparer les réponses apportées par nos étudiants aux résultats que l'on trouve dans la littérature (questions du pendule [4], de la trajectoire dans le vide [12], du ressort oscillant [12], de l'avion et de Pierre et Marie [2]). Certaines de ces questions ont été formulées sous différentes variantes ou ont fait l'objet d'une demande de justification (trajectoire dans le vide, ressort oscillant, avion, Pierre et Marie) dans le but d'enrichir les résultats par rapport à la littérature pour des préconceptions déjà connues. Enfin, les questions du moment et du frottement ont été posées pour valider l'existence de préconceptions identifiées intuitivement de par notre expérience d'enseignement des travaux pratiques du cours de mécanique rationnelle I. Nous proposons d'ailleurs dans chacun des cas une hypothèse pour expliquer l'origine de ces préconceptions. Et finalement, la question des trajectoires historiques permet de confirmer une fois de plus l'existence de la préconception aristotélicienne du mouvement, montrant explicitement l'intérêt d'une démarche d'étude des préconceptions basées sur l'histoire des sciences.

Ces travaux ont été publiés à la conférence de pédagogie universitaire AIPU :

F. Robert, V. Duchâteau, V. Raman, C. Boey, P. Lambert, Détecter les préconceptions pour corriger les représentations erronées des étudiants: application à la mécanique et à l'électronique 24e congrès de l'Association internationale de pédagogie universitaire (AIPU), Montréal, mai 2007

²⁵ A la question posée à 171 étudiants de BA1 testés en juin 2006 de savoir en quel point écrire la condition d'équilibre de rotation d'un solide, 51 seulement ont répondu correctement (à savoir en n'importe quel point, qu'il appartienne ou non au solide), 71 ont répondu en un point du solide seulement et 46 en une articulation uniquement

10. Le projet BA1 Meca²r

Ce projet a été mené en 2012-2103, principalement avec l'aide de mes assistants Nicolas Julémont, Nicolas Cauche et Benjamin Mertens, ainsi que par le mécanicien de BEAMS Salvo Mele. Qu'ils ne soient pas oubliés dans l'attribution des mérites.

« Les étudiants de 1ère année de Polytechnique, encadrés par leurs aînés de MA, ont cette année conçu, fabriqué et testé en direct des véhicules à énergie mécanique... »

<http://www.youtube.com/watch?v=gQLK5j71sY0&feature=youtu.be>

Cette partie aborde les objectifs et la genèse du projet proposé (un sujet proche en termes de concepts avait déjà été proposé), la présentation du sujet proposé (10b), les objectifs poursuivis (10c) et les attentes pédagogiques (10d), les retours à mi-parcours (10 e) et au jury final (10f) ainsi que quelques mots sur la gestion de projet (10g).

10a. Objectifs du projet et genèse du sujet proposé

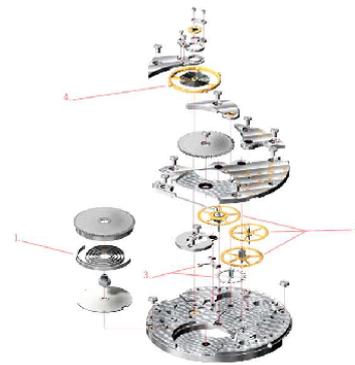
Les objectifs du projet sont les suivants (source : guide BAPP) :

- mener à terme un projet concret lié à la pratique de l'ingénieur en respectant un cahier des charges déterminé,
- faire des liens entre le projet, les matières pré-requises, et les cours de BA1,
- faire des liens entre la théorie et la pratique
- apprendre à travailler en équipe,
- établir un rapport et présenter un exposé selon des critères définis, en utilisant un langage de niveau scientifique,
- apprendre à exploiter des données bibliographiques avec un objectif déterminé (en l'occurrence le projet) :
 - compléter adéquatement les références de départ,
 - sélectionner les informations pertinentes de manière critique (notamment celles provenant d'internet),
 - respecter la déontologie scientifique en matière de citation d'auteur,
 - rédiger correctement la bibliographie et les renvois (en bas de page ou dans le texte).

Il apparaît donc qu'un cours de bachelier se prête particulièrement bien à l'exercice du projet BA1 : le cours de mécanique rationnelle. Dès 2009, j'ai donc proposé un sujet pour le projet, qui avait pour sujet la mécanique des montres : stockage d'énergie, transmission, échappement et oscillateur (Figure 19). Ce projet faisait donc déjà intervenir les concepts de stockage d'énergie sous forme mécanique (gravitation et ressorts) et présentait de nombreux liens avec les cours de mécanique rationnelle (Figure 20).

Fonctions

- 1 Stockage de l'énergie
- 2 Transmission
- 3 Echappement
- 4 Oscillateur



ULB



Figure 19 : Eclaté d'une montre automatique

- Stockage de l'énergie
 - énergie potentielle de gravitation
 - énergie potentielle des ressorts (spiral)
- Transmission
 - engrenages
 - courroies
- Echappement
- Oscillateur

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (1)$$

- pendule simple
- système masse-ressort

ULB



Figure 20 : Concepts mécaniques dans une montre automatique

10b. Sujet : conception et modélisation d'une voiture à à énergie mécanique à l'échelle du jouet

Cette proposition initiale a dû un peu mûrir, et s'est finalement concrétisée sous la forme d'un autre sujet faisant appel aux mêmes concepts mécaniques : la conception et la modélisation d'une voiture à énergie mécanique à l'échelle du jouet (Figure 21).



Figure 21 : But du projet : concevoir, fabriquer, et modéliser un véhicule à énergie mécanique pour gravir un plan incliné (Prototype de l'équipe technique)

Contexte du projet (Source : guide du BAPP)

Déjà utilisé dans les années 1950 puis abandonné, le recours au stockage d'énergie mécanique dans des volants d'inertie a été utilisé dans les gyrobuses. Ces bus ont par exemple roulé à Gand (voir l'exemplaire G3 exposé au musée des trams et bus de De Lijn (Vlatam)²⁶). Plus récemment, cette technologie de volant d'inertie a été remise au goût du jour par Porsche²⁷, pour le stockage de l'énergie récupérée au freinage et sa restitution à l'accélération. Cette solution est également à l'étude chez Volvo²⁸. Des projets semblent également dans les cartons pour propulser des véhicules urbains à l'air comprimé²⁹. Ces techniques de stockage mécanique de l'énergie semblent pourtant plus adaptées à l'échelle des jouets qu'à l'échelle réelle, permettant de multiples solutions : ressorts, volants d'inertie, air comprimé. C'est à cette échelle du jouet que se place ce projet, qui inclut de nombreux concepts mécaniques : stockage de l'énergie sous différentes formes mécanique (ressort, volant d'inertie...), dynamique du véhicule, transmission de puissance, etc. On se propose de concevoir, modéliser et tester un prototype de véhicule à quatre roues propulsé à l'énergie mécanique. L'énergie stockée sera restituée pour gravir un plan incliné. Comment stocker cette énergie ? Comment minimiser les pertes dans la chaîne de transmission ? Comment évaluer ces pertes ? Comment améliorer l'adhérence de notre véhicule ? Quelles seront les lois d'échelle de notre prototype ? Fonctionnera-t-il toujours s'il est dix fois plus grand ? Dix fois plus petit ? Comment surtout prédire ses performances ?

²⁶ <http://www.delijn.be/over/vlatam/index.htm?init=true>

²⁷ http://www.lemans.org/fr/courses/24h/Technologies-hybrides-le-volant-d-inertie_2432.html

²⁸ <http://www.volvocars.com/fr/top/about/news-events/pages/default.aspx?itemid=125>

²⁹ <http://www.mdi.lu/>

10c. Objectifs poursuivis

Au-delà des objectifs génériques poursuivis par le dispositif du projet BA1, le sujet proposé permet de mener les étudiants à travers deux activités principales de l'ingénieur :

1. **Concevoir et fabriquer** un véhicule à énergie mécanique pour étudier les concepts mécaniques de base et prendre part au concours de fin d'année dont le règlement sera décrit plus loin dans ce document.
2. **Développer une modélisation** du véhicule permettant d'en prédire les performances dans une série de tests qui seront décrits ci-après.

Le processus est intrinsèquement itératif, et intimement lié à la démarche de conception: s'il est difficile de construire rationnellement sans avoir modélisé, il est tout aussi difficile de modéliser un dispositif dont on n'a arrêté aucune des options de conception.

Nous avons donc fourni deux cahiers des charges aux étudiants : l'un pour le prototype, l'autre pour le modèle.

Cahier des charges du prototype (évaluation en décembre 2012)

- Géométrie / encombrement : Longueur : max. 50 cm, Largeur : max. 40 cm, Hauteur : non spécifiée
- Poids : masse maximale à vide (càd sans la masse embarquée décrite ci-après au point 3): 1.5kg
- Charge embarquée : le véhicule sera capable d'embarquer un volume d'eau compris entre 0 et 200mL.
- Autonomie / Portée : le véhicule sera capable de parcourir jusqu'à 2,50 m en remontant un plan incliné jusqu'à 15° par rapport à l'horizontale
- Cinématique / Ralentissement freinage : le véhicule sera muni d'un dispositif débrayable ou amovible modifiant l'inertie, et permettant de le ralentir dans un parcours en pente.
- Technologies : Nous conseillons d'utiliser une base VEX, mais toute autre possibilité est envisageable (Lego technique, fisher technik...)
- Coût < 100 euros

Le(s) modèle(s) développés par les étudiants pourront être théoriques, expérimentaux, analytiques ou numériques, basés sur une étude énergétique ou sur l'utilisation des équations du mouvement, ou toute combinaison de ces ingrédients. Ils permettront d'effectuer le réglage du véhicule en prévision de l'un des tests suivants et/ou de prédire ses performances lors de ces tests :

Cahier des charges du modèle (évaluation en mars 2013)

- Test de devers
On demandera une prédiction du passage de devers, c'est-à-dire l'angle de basculement du véhicule autour de son axe longitudinal, à la fois à vide et rempli d'une quantité d'eau entre 0 et 200mL.
- Test de démarrage en montée
On demandera de faire démarrer le véhicule pour qu'il remonte un plan de plus en plus incliné. On demandera de prédire si le véhicule atteint ses limites par glissement des roues sur le plan incliné ou par immobilisation.

- Test de portée à la montée
On demandera de régler le véhicule pour qu'il remonte le plan incliné de pente par rapport à l'horizontale comprise entre 0 et 15° sur une distance imposée au plus égale à 2.50m.
- Test de vitesse à la descente

On demandera de prédire le temps de parcours pour une descente en roue libre³⁰ de 2m le long du plan incliné. On demandera ensuite d'ajuster l'inertie du véhicule pour augmenter ce temps de descente de deux secondes.
- Test d'arrêt
Sur un sol horizontal, on demandera de régler le véhicule pour qu'il s'approche au plus près d'un piéton sans le toucher.

Cahier des charges de l'événement de fin d'année (évaluation en juin 2013)

- Epreuve préliminaire : apparence et cahier des charges
- Course de vitesse : les voitures devront parcourir une distance de 5 mètres en un temps le plus court possible.
- Course de garçons de cafés : chaque voiture doit parcourir 10 mètres en transportant un gobelet rempli de bière en en perdant le moins possible (gobelets type réutilisable disponible dans les cercles).
- Test du piéton : les voitures doivent s'arrêter le plus proche possible d'un piéton placé au bout d'une certaine distance.
- Saut du tremplin : les voitures doivent sauter le plus loin possible en démarrant d'un tremplin incliné.

Chaque manche donne lieu à un classement des équipes. Les points sont ensuite attribués suivant la grille de la FIA (1^{er} : 25pts, 2^{ème} : 18 pts, ...)

³⁰ Entendre par roue libre la source d'énergie déconnectée (ressorts ôtés, roues d'inertie initialement à l'arrêt et/ou débrayées)

10d. Attentes pédagogiques

A travers le double objectif défini plus haut, nous espérons amener les étudiants à mettre en pratique de nombreux concepts tels que :

- Energie : Comment évaluer l'énergie nécessaire pour remonter la pente? Comment évaluer l'énergie embarquer? Comment évaluer les pertes et le rendement du véhicule?
- Forces : Quelles sont les forces en jeu? Dans la structure du véhicule?
- Ressorts : Comment choisir leur raideur? Leur précontrainte? Leur longueur libre? Quel allongement maximal? Comment choisir le nombre de spires? La taille d'une spire?
- Inertie : Quelles sont les inerties du véhicule? Quel est le rôle d'un volant d'inertie?
- Transmission : Quelle chaîne cinématique? Quel rapport de réduction? Quels organes de transmission? Quel diamètre de roues?
- Adhérence
- Frottement
- Aspects expérimentaux: Vos tests sont-ils répétables? Vos tests sont-ils modélisables?

Ces concepts pourront être manipulés à l'aide de modèles tels que celui représenté à la Figure 22, dont les équations correspondantes sont indiquées à la Figure 23 et à la Figure 24. On peut alors visualiser les conditions à respecter dans un diagramme force-déplacement (Figure 25).

Modélisation sommaire du véhicule

Soit:

- un véhicule posé sur un plan d'angle α avec l'horizontale, fait d'une paire de roues motrices et de deux roues libres de rayon R . L'entraxe des roues, p , est partagé en les deux distances $(p - q)$ entre l'axe moteur et le centre de gravité et q entre le centre de gravité et l'axe des roues libres. Chaque paire de roues présente une masse m et une inertie I . Le châssis sans les roues a une masse M ;

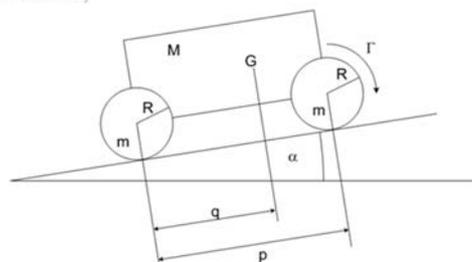


Figure 22 : Modèle sommaire du véhicule : un châssis et deux paires de roues. Ceci permet d'écrire les conditions de démarrage et de non glissement des roues motrices

- une inertie équivalente $\tilde{M} = (M + 2m)/(M + 2m + 2I/R^2)$;
- un couple moteur $\Gamma = NrF = Nrk\Delta l$, N est la démultiplication, F la force motrice, r le bras de levier de F ;
- une condition de non glissement des roues $T_B \leq f_0 N_B$ exprimée au point de contact B des roues motrices
- les équations de dynamique des solides

Figure 23 : Mise en évidence d'une inertie équivalente, composée des inerties de translation et de rotation : c'est sur cette dernière que l'on pourra jouer pour ralentir le véhicule. En effet, une augmentation de l'inertie de translation (i.e. la masse) entraîne inévitablement une augmentation de la force motrice

Modélisation sommaire du véhicule

On trouve (après quelques calculs quand même):

- une expression de l'accélération j :

$$j = -g \sin \alpha \tilde{M} + \frac{\Gamma}{R} \frac{\tilde{M}}{\tilde{M} + 2m} \quad (1)$$

- une expression du couple moteur maximal:

$$\Gamma_{\max} = \frac{f_0 g \cos \alpha R (Mq/p + m) - I g \tilde{M} \sin \alpha / R}{1 - \frac{I \tilde{M}}{R(M+2m)}} \quad (2)$$

Il faut $j \geq 0$ pour démarrer, $\Gamma \leq \Gamma_{\max}$ pour éviter le patinage (ou limiter les efforts internes qui induisent contraintes et frottements), et $\Delta l \leq \Delta l_{\max}$ (encombrement, limite des ressorts). Ces contraintes peuvent être représentées graphiquement sur la figure ci-attachée: on voit donc qu'il existe un optimum: le choix de la raideur qui conduit à la plus grande énergie (i.e. plus grande portée). Ceci ne prend bien sûr pas en compte les pertes d'énergie.

Figure 24 : Expression mathématique de la condition de démarrage (1) et de non glissement (2).

Choix des ressorts et de la transmission

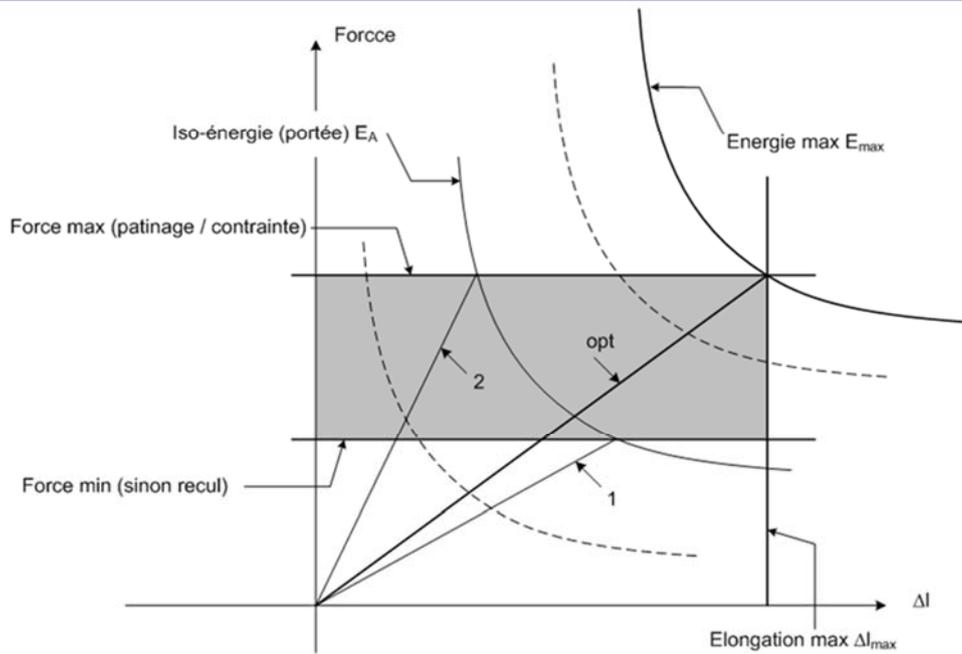


Figure 25 : Diagramme force-déplacement utilisable pour le dimensionnement (à adapter pour des ressorts présentant une précontrainte). Les courbes d'iso-énergie prennent la forme de branches d'hyperboles ($F \cdot d = \text{constante}$), et la force du ressort est donnée par une droite $F = kd$. On a donc trois limites : une supérieure $F < F_{max}$ correspondant à une condition de non-glisement, une inférieure $F > F_{min}$ correspondant à une condition de démarrage et une condition sur l'encombrement $d < d_{max}$.

10e. Retour à mi-parcours

L'examen des 23 prototypes à mi-parcours a conduit aux observations suivantes.

1. En ce qui concerne les prototypes, les problèmes suivants ont été relevés:

- absence ou problème de mise en place du ralentisseur inertiel
- non-respect du poids et des cotes maximales
- manque de force motrice (peu de groupes montent 2.5m sur 15°, et en même temps peu patinent)
- absence de réservoir d'eau sur le véhicule

2. En ce qui concerne les aspects théoriques, on relève les améliorations possibles suivantes:

- pas de prise en compte de la précontrainte dans les ressorts
 - réflexion à approfondir sur l'effet de la raideur, de l'allongement, de la démultiplication...
- modélisation statique pour s'assurer que véhicule peut démarrer!
- modélisation dynamique, au moins sans les frottements!

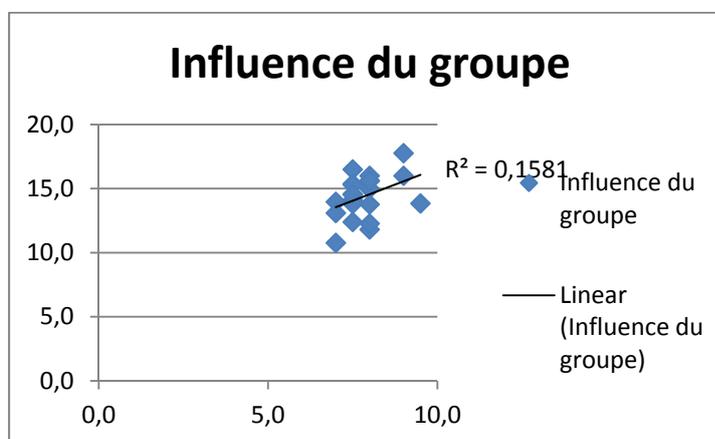
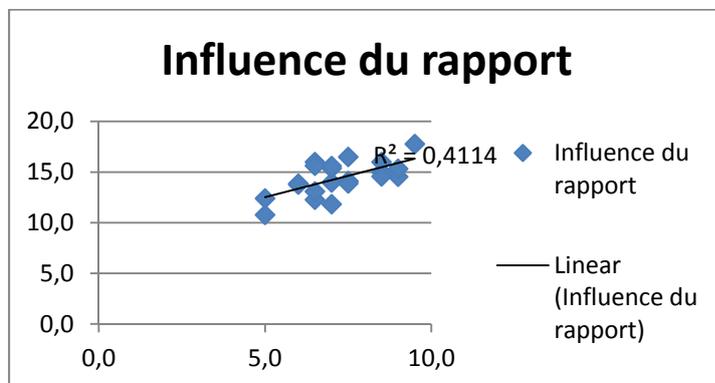
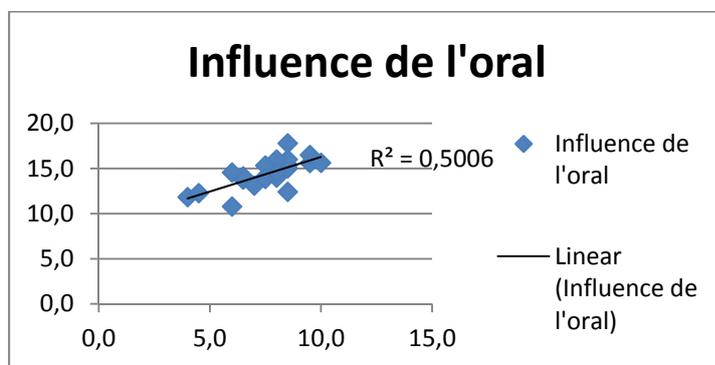
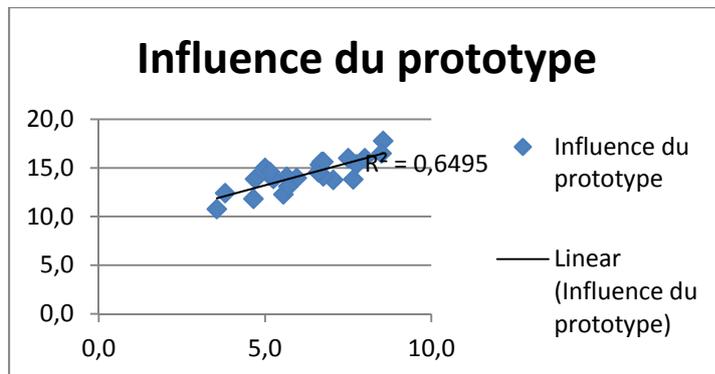
Les statistiques de l'examen de mi-parcours sont données à

	oui	non	average	std
Le véhicule est-il construit?	23	0		
Le véhicule peut-il stocker une réserve d'énergie mécaniquement?	23	0		
Le véhicule dispose-t-il d'un mécanisme inertiel permettant d'augmenter le temps de descente?	10	13		
Masse (kg)			1,4	0,2
Longueur (cm)			45,8	6,6
Largeur (cm)			30,3	6,1
Le véhicule peut-il parcourir une distance d'au moins 2 m sur le plat?	19	4		
Le prototype peut-il monter une côte de 15° sur une distance d'au moins 2.5m?	4	19		
Le véhicule patine-t-il sur plan caoutchouc ?	1	20		
Le véhicule patine-t-il sur plan bois ?	3	19		
Temps roue libre à vide (environ 2 m à 15°)			1,6	0,1
Temps roue libre sans eau et avec ralentisseur inertiel (environ 2 m à 15°)			3,0	1,7
Le véhicule est capable d'embarquer un volume d'eau compris entre 0 et 200mL	17	6		
Temps roue libre avec 200 mL eau (environ 2 m à 15°)			1,6	0,2

Figure 26 : Statistiques des 23 prototypes à mi-parcours

10f. Retour sur le jury de fin d'année

Les 4 graphiques ci-dessous illustrent les corrélations entre chacune des notes partielles (prototype, oral, rapport écrit, fonctionnement de groupe) et la note finale obtenue.



10g. Gestion du projet

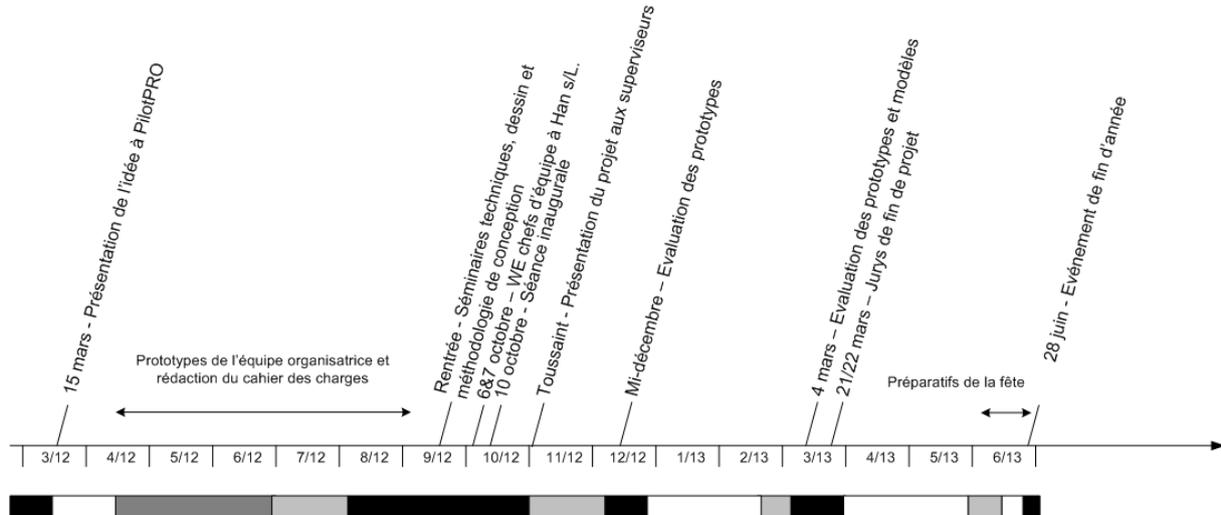


Fig. : Ligne du temps du projet, et indication de la charge pour l'équipe (blanc : rien, noir : fort chargé)

Communication

- Vers le GT pilotPro : présentation de l'idée du projet
- Vers les étudiants : conférence inaugurale, création de l'espace tran-h-101 sur l'université virtuelle, liste de FAQ
- Vers la presse : dossier de presse, interview radio, capsule sur la page facebook ulb
- Vers notre parrain : interview Jérôme d'Ambrosio
- Vers les alumni : photos du projet pour G-square
- Vers les chefs d'équipe : séminaires lors du WE chefs d'équipe
- Vers les superviseurs : séminaire pour expliquer le CDC et les difficultés identifiées

Avant la rentrée académique

- Rédaction de la partie du guide des BA1 spécifique au projet (essentiellement le cahier des charges)

Au démarrage du projet

- Accès au matériel (VEX) en vue de sa répartition entre les étudiants
- Fournir à Jenny et Mathew Langley (cours d'anglais) un article en anglais en rapport avec le projet
- Conférence de lancement du projet : présentation du projet aux étudiants, invité de la société Verhaert pour présenter la conception mécanique
- WE chefs d'équipe

Les phases d'évaluation

- Mi-parcours, évaluation sans attribution de note, contrôle d'avancement des prototypes
- Fin de projet, attribution d'une note pour le prototype et la qualité prédictive du modèle
- Evénement de fin d'année

11. Annexes

Les annexes sont numérotées par section.