

Pierre LAMBERT
15/11/2023



Pierre LAMBERT

Projet et portfolio d'enseignement

Novembre 2023

Année académique 2023-2024

Table des matières

1. Projet pédagogique.....	3
2. Conception et prestation des enseignements (cinq dernières années).....	6
• Cours de mécanique rationnelle MECA-H200 (2-2-1), depuis le 15/09/2016	6
• Cours de procédés de microfabrication MECA-H500 (2-0-1), depuis le février 2007	15
• Cours de Soft Microrobotics MECA-H501 (2-0-2), depuis le février 2007	16
• Cours de mécanique rationnelle MECA-H202 (2-2-1), du 15/09/2020 au 14/09/2022.....	17
• Projets multidisciplinaires de première année TRAN-H-101	18
• Encadrement de projets, mémoires et thèses des cinq dernières années	21
• Éléments mis en œuvre pour favoriser les apprentissages et la réussite des étudiants	22
• Synthèse et perspectives générales	22
3. Evaluation des apprentissages	24
4. Gestion d'une équipe pédagogique	29
5. Développement professionnel.....	30
• Activités pédagogiques hors cours ULB	30
• Formation pédagogique et didactique.....	30
• Recherches à caractère didactique	31
6. Implication en termes de responsabilité de gestion liée à l'enseignement.....	33
7. Annexes.....	34
• Plan du cours de mécanique appliquée (statique pour architectes à Horta).....	34
• Fiche du cours de mécanique rationnelle MECA-H200.....	35
• Fiche du cours « Microfabrication techniques » MECA-H500.....	36
• Fiche du cours de « soft microrobotics » MECA-H501.....	37
• Table des matières du cours de mécanique rationnelle MECA-H200	38
• Références générales pour la formation en mécanique	46

1. Projet pédagogique



Elever les jeunes vers un niveau supérieur d'autonomie et de pensée critique, en leur donnant de nouveaux outils et de nouvelles méthodes pour leur permettre de jouer pleinement leur rôle de citoyen. Logique, rhétorique, grammaire : apprendre à penser, à convaincre et à communiquer. Voilà depuis longtemps¹ la trame poursuivie par l'enseignement « supérieur ». Mon projet pédagogique n'y déroge pas, et fait également pleinement écho aux objectifs du référentiel de compétences adopté par l'Ecole polytechnique : **comment former des ingénieurs, dotés d'une solide méthode scientifique ?**

Il n'y a pas de réponse unique à ces questions. Il s'agit donc de donner les bases d'un **savoir**² abstrait et technique (par exemple dans les cours de mécanique rationnelle ou le cours de technologies), d'encourager les étudiants à **innover** en leur apprenant à mobiliser les apprentissages mécaniques (cours de cinématique et dynamique des machines, cours d'organes des machines) dans un processus de conception de nouveaux produits (cours de méthodologie de conception), de leur apprendre à **mettre en œuvre des solutions** dans une démarche rationnelle et quantifiée d'ingénieur (choisir d'une technologie dans le cours de procédés de microfabrication), ou encore de les associer à mes travaux scientifiques pour les initier à la **démarche scientifique et à la planification expérimentale** (comme dans le cours de « soft microrobotics »). Il est également essentiel de les mettre en situation d'acteurs de leur formation en **communiquant et gérant des projets** (gestion d'un contact industriel et conduite d'une discussion technique avec celui-ci dans le cours de procédés de microfabrication).

Il est essentiel de confronter les étudiants à la **modélisation du réel** (voir Figure 1), ainsi qu'à **l'expérimentation**, pour ne pas les confiner dans un univers conceptuel déconnecté de leur réalité quotidienne.

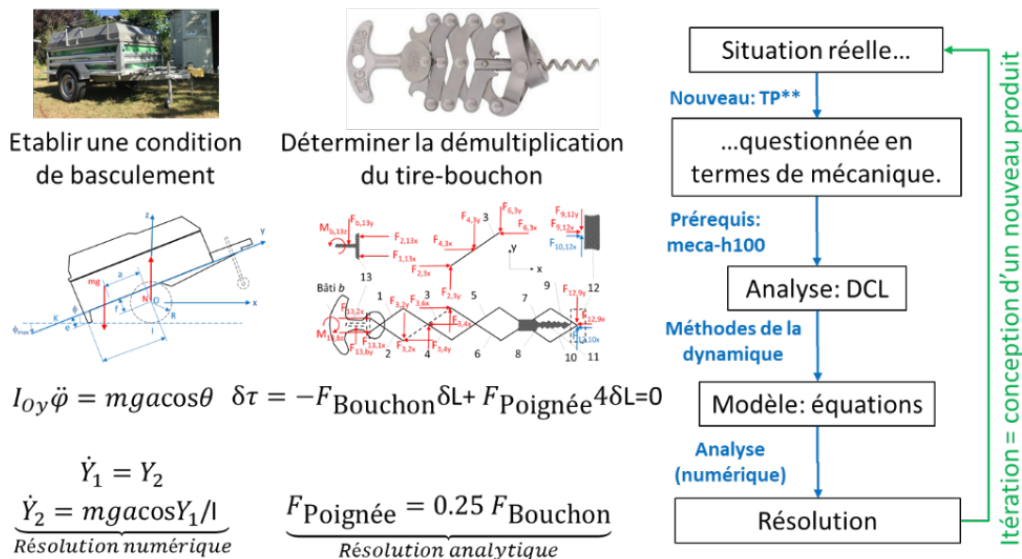


Figure 1 : Enseignement des sciences de base : l'occasion de faire un premier lien de modélisation entre la réalité et les concepts abstraits sous-tendant une mise en équation de cette réalité

¹ Trivium ou « premier cycle de l'université médiévale » : grammaire, rhétorique et logique

² Savoir, innover, mettre en œuvre des solutions, adopter une démarche scientifique, communiquer, gérer un projet : voilà quelques idées maîtresses du référentiel de compétences facultaire

L'enseignement des sciences de base (comme la mécanique rationnelle) est une première occasion, chronologiquement parlant dans le cursus des étudiants, de faire des liens (voir Figure 1) entre concepts abstraits (par exemple le principe des travaux virtuels en statique ou les théorèmes généraux en dynamique), une réalité quotidienne (une remorque qui bascule, un tire-bouchon), et le médiateur entre les deux qu'est l'exercice de modélisation (diagramme du corps libre représentant les forces).

Ces connaissances de base permettent ensuite 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 deux exemples:

- ✓ la conception d'un banc de mesure de force de l'ordre de $10\mu\text{N}$, pour la 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). Les étudiants du cours de Soft Microrobotics ont ici réalisé le modèle CAO du banc de mesure et produit les plans d'usinage nécessaires. Les résultats ont été publiés dans la revue Microfluidics et Nanofluidics ;
- ✓ la sélection d'un procédé de fabrication adapté à un problème, c'est-à-dire à un produit et une taille de lot de fabrication. Les étudiants du cours de Procédés de microfabrication ont ainsi étudié le procédé d'injection de micro-aiguilles en polymère dans le cadre du projet First Spin-off REMAID.

A la fin de leur parcours à l'université, les étudiants peuvent alors mettre en pratique l'ensemble de leurs acquis grâce à leur projet de fin d'études. Ces cinq dernières années, j'ai proposé de nombreux sujets se regroupant autour de mes principales activités de recherche ou centres d'intérêt :

- ✓ Thème de la soft microrobotique : systèmes à raideur variables, polymères actifs, capteurs en verre.
- ✓ Thème de l'administration de médicament par la voie nose-to-brain : modèle de nez instrumenté pour l'étude du dépôt de médicaments ou la validation de simulations numériques d'écoulement nasal, simulateur de respiration.
- ✓ Thème de la capillarité : préhenseurs capillaires, bancs de mesures.
- ✓ Thème du développement durable : conception d'un four solaire pour les cantines de l'ULB

On voit donc apparaître une première originalité de mon profil d'enseignement, à savoir une **grande diversité de méthodes** : cours ex-cathedra, pratique de laboratoire, projets personnels, contacts avec l'industrie, contact avec la recherche actuelle...

Une autre de ses caractéristiques est probablement de **privilégier la réflexion et la mise en pratique** qui, si elles sont sous-tendues par des raisonnements rigoureux et mathématiques, sont évaluées exclusivement sans faire appel à la mémorisation : questions ouvertes d'exercices en mécanique, mise en pratique à cours et ordinateur ouverts dans les cours de fabrication et de « Soft Microrobotics ».

Cette mise en pratique, quand c'est possible, s'ancre dans le **contexte des questions actuelles** : enjeux énergétiques (stockage gravitaire ou cinétique en mécanique du solide), analyse critique du coût du travail ou de l'empreinte écologique dans le cours de fabrication, nouveaux instruments biomédicaux dans le cours de « soft microrobotics »...

En termes de **supports de cours**, si comme beaucoup j'ai profité de l'exercice imposé par la crise COVID pour réaliser des **capsules vidéos** mises depuis à disposition des étudiants, j'accorde préférentiellement mon attention à l'écriture de syllabi. La nécessité pour un enseignant d'écrire son

propre support de cours ou syllabus peut être discutée, tant il est vrai qu'il existe de très nombreux ouvrages de références particulièrement bien faits. Néanmoins, je suis un grand défenseur du côté artisanal de mon métier (artisanal par opposition à standardisé). En particulier, les ouvrages de référence, aussi soignés soient-ils, sont rarement exploitables tels quels : la langue n'est pas adéquate, le niveau de rigueur mathématique pas en accord avec les attentes de notre formation ou au contraire les applications pas assez mises en avant, ils manquent d'éléments d'histoire des sciences, de présentation du rôle des femmes dans la discipline, etc.

J'ai donc pris le parti par trois fois de **rédigé complètement un nouveau syllabus** : pour le cours de mécanique appliquée enseigné aux BA1 architectes (Horta ISAB012, dont on donne le plan en annexe), pour le cours de mécanique rationnelle MECA-H200 et pour le cours de méthodologie de conception enseigné aux MA1 électromécaniciens (MECA-H409).

Le cours écrit pour les étudiants architectes 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, expurgé des outils mathématiques non maîtrisés (calcul de déterminants et de produits vectoriels par exemple) par 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 2), utilisation de normes...

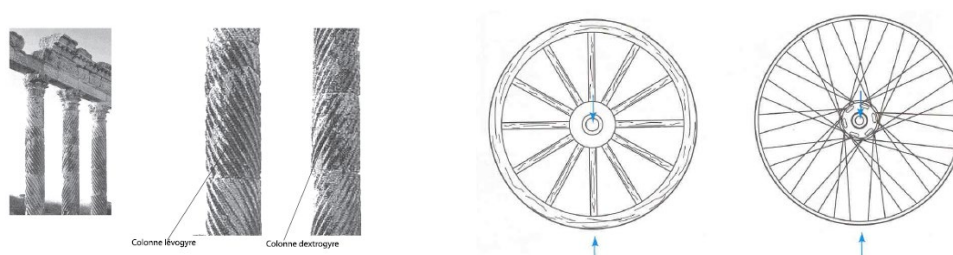


Figure 2 : Illustration des sens de rotation lévo- et dextrogyre : la grande colonnade d'Apamée en Syrie ; Illustration des concepts de compression et traction sur des roues de chariot et de vélo

L'écriture du syllabus de méthodologie de conception était elle motivée par une volonté de synthèse entre de nombreux ouvrages. N'enseignant plus ce cours depuis 2016, je n'en donne pas plus de détails.

Finalement, le syllabus de mécanique rationnelle a été complètement refondu, complété d'un nouveau syllabus d'exercices et d'un supplément contenant les énoncés de laboratoires (voir ci-après).

Quand il le faut, je n'hésite néanmoins pas à utiliser un **ouvrage de référence**, notamment le célèbre Pahl et Beitz, Engineering Design, Springer, e-book accessible depuis CIBLE, et également à disposition des étudiants via l'université virtuelle (cours de Design methodology MECA-H409).

Je suis rattaché au service TIPs principalement pour la recherche, et si mes enseignements ont finalement peu de points communs avec le génie des procédés ou la microfluidique, je m'y inscris pleinement par le souci de contribuer à l'enseignement des bases (cours de mécanique rationnelle en BA2) ou de familiariser les étudiants aux équipements de pointe du service.

J'enseigne donc actuellement le cours de mécanique rationnelle (MECA-h200) dans le bachelier ingénieur civil et les cours procédés de microfabrication (MECA-H500) et soft microrobotics (MECA-H501) dans les masters d'ingénierie biomédicale (MA-IRCB) et d'ingénierie électromécanique (MA-IREM), ainsi que dans le master complémentaire en nanotechnologie (MS-NATE).

2. Conception et prestation des enseignements (cinq dernières années)

Ces cinq dernières années, j'ai enseigné quatre cours, et encadré de nombreux projets. Dans le volume donné ci-dessous de mes prestations personnelles actuelles (2023-2024), je ne reprends pas le cours de mécanique à Charleroi MECA-H202 que j'ai cessé d'assurer en prenant ma charge de Vice-Doyen aux Relations Internationales en octobre 2022.

- ✓ Mécanique rationnelle MECA-H200 : enseignement des deux crédits de cours (200 à 250 étudiants)
- ✓ Procédés de microfabrication MECA-H00 : enseignement des deux crédits de cours et du crédit de « laboratoire » (trois visites d'entreprises), 10 à 15 étudiants
- ✓ Soft microrobotics MECA-H501 : enseignement des deux crédits de cours, 5 à 15 étudiants
- ✓ Projet multidisciplinaire 1 TRAN-H-101 : conception et supervision des aspects techniques du projet, en collaboration avec le Prof. Axel Coussement

Dans la conception de mes nombreux enseignements, j'ai toujours accordé une attention particulière au niveau d'enseignement (bachelier vs master), au bagage initial des étudiants, à l'injection d'une dimension de recherche plus ou moins prononcée.

Pour illustrer mon propos par deux extrêmes, citons tout d'abord mon cours de mécanique appliquée destiné aux étudiants de BA1 en architecture (Horta), présentant des bagages très hétéroclites : environ une moitié d'étudiants attirés par la dimension artistique de l'architecture, et une autre moitié préparée à des études scientifiques. Le cours s'appuyait donc sur un syllabus détaillé, 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.

A l'opposé du spectre, le cours de Procédés de microfabrication implique 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).

- Cours de mécanique rationnelle MECA-H200 (2-2-1), depuis le 15/09/2016

Positionnement entre histoire, didactique et sciences de l'ingénieur (Introduction au cours, références non reprises ici)

L'enseignement d'un cours de mécanique rationnelle est un grand classique d'une formation scientifique. Fruit de la révolution scientifique qui marque, avec Galilée, la rupture de la physique aristotélicienne, la mécanique classique culmine aux 17^{ème} et 18^{ème} siècles, avant de céder le pas aux découvertes qui fonderont la mécanique relativiste du 20^{ème} siècle. Tout au long de sa formalisation, les savants les plus réputés ont forgé les concepts auxquels sont confrontés les étudiants actuels. Citons pêle-mêle la composition vectorielle des forces (Stévin), le principe d'inertie (Descartes, Galilée), la force centripète (Huygens), la loi fondamentale de la dynamique (Newton), la prise en main des concepts de calcul différentiel (initié par Leibniz, et appliqué aux Principia de Newton par Varignon 1), le formalisme des travaux virtuels (Stévin, d'Alembert, Lagrange), le calcul des perturbations pour le problème des trois corps (Laplace), les bases du calcul variationnel, ou encore l'émergence du concept

de chaos (Poincaré). La contribution des femmes à cette aventure scientifique s'est faite malgré des obstacles quasi insurmontables (accès limité ou inexistant à l'éducation scientifique, cantonnement au rôle de mère et d'épouse), quand elles ne sont pas simplement invisibilisées (effet Matilda). Certaines contributions majeures à l'histoire de la mécanique rationnelle nous sont néanmoins parvenues. Citons Emilie du Chastelet, qui dans la première moitié du 18^{ème} siècle traduit les Principia de Newton en français [du Chastelet, 1759] et formule l'idée d'énergie cinétique proportionnelle au carré de la vitesse, ou Sofia Kovalevskaya, qui dans la deuxième moitié du 19^{ème} siècle, obtient un doctorat et devient une des premières femmes d'université. Elle contribue, entre autre, au problème de la dynamique d'un solide en mouvement autour d'un point fixe. Du côté de l'astronomie, citons Caroline Herschel (1750-1848) qui a découvert plusieurs comètes, et "les femmes de science et d'astronomie avant elle" dont Maria Cunitz (1610-1664), contemporaine de Kepler, dont elle adopte le modèle héliocentrique et corrige les Tables rudolphines permettant le calcul de la position des planètes. Nicole-Reine Stabile de la Brière Lepaute (1723-1788) contribuera elle au calcul de la date précise du retour de la comète de Halley, calcul si compliqué à établir d'après [Reser and McNeill, 2023] que ni Edmond Halley lui-même ni Isaac Newton n'y parviennent. Les femmes de cette période contribueront en outre à la diffusion des idées scientifiques de leur temps par leurs traductions du savoir depuis le latin vers les langues de l'époque : en allemand pour Maria Cunitz, en français pour Emilie du Chastelet, en italien pour Maria Gaetana Agnesi. Cette dernière plaidera la cause de l'éducation des femmes auprès de Marie-Thérèse d'Autriche.



On mesure donc à quel point ces difficultés historiques n'ont pas été levées du jour au lendemain, et le voyage accéléré que doit faire l'étudiant à travers ces concepts n'est pas aisé non plus. Il est surtout très formateur dans l'objectif d'une formation scientifique, tant il jette les bases des outils de très nombreuses disciplines de l'ingénieur :

- ✓ la cinématique permet de construire un mécanisme
- ✓ la statique permet de comprendre les mécanismes d'amplification ou de réduction des forces, ainsi que la stabilité des ouvrages d'art
- ✓ la dynamique jette les bases de l'étude des éléments des machines, des mécanismes, des vibrations
- ✓ au-delà de la mécanique du solide indéformable, l'apprentissage de la mécanique classique est un pont vers la mécanique des milieux continus, pour l'étude des solides déformables (résistance des matériaux en génie civil, guidages flexibles en construction mécanique) ou des fluides (microfluidique, aéronautique, acoustique)
- ✓ les formalismes de Lagrange et d'Hamilton sont la porte d'entrée vers la mécanique quantique
- ✓ l'apprentissage de grands principes tels la conservation de l'énergie, la quantité de mouvement, les principes variationnels sont applicables à d'autres domaines. Les bilans de quantité de mouvement par exemple permettent d'analyser la force exercée par un liquide sur un turbine, mais trouve son application dans des domaines inattendus comme l'optique : le concept de piège optique pour lequel Ashkin a obtenu le prix Nobel de physique en 2018 peut ainsi se comprendre comme la force exercée par un rayon lumineux sur une bille en réaction à la force exercée par la bille sur le rayon lumineux suivant les lois de la réfraction.

Par un clin d'oeil à l'histoire, on voit ainsi des ponts s'établir entre mécanique et optique, là où l'histoire du calcul variationnel a commencé avec le principe de Fermat (optique) appliqué au problème (mécanique) de la brachistochrone. Si très naturellement une bonne compréhension des concepts de mécanique est favorisée par une bonne compréhension des mathématiques sous-jacentes (cours d'algèbre, d'analyse, de physique générale), la pratique et l'enseignement de la mécanique pro_tent de la généralisation des outils numériques : méthodes numériques, solveurs d'ODE (Matlab, Octave, Python) voire boîte à outil numérique (Comsol).

Au-delà de son rôle historique central dans le développement de la révolution scientifique et des révolutions industrielles (machine à vapeur, moteur à combustion interne), la contribution des sciences mécaniques aux problèmes actuels reste incontournable. On parle ici de la mécanique au sens large, dont la mécanique rationnelle enseignée dans ce cours n'est qu'une première étape. Un rapport de l'Académie des sciences en France résume ainsi plusieurs raisons de soutenir les sciences mécaniques :

- ✓ elles constituent une filière importante en termes de production et d'emploi ;
- ✓ elles restent au cœur de la compétition scientifique mondiale, et de nouvelles questions émergent à leurs frontières avec d'autres disciplines. Les défis pour le futur sont nombreux. Ils tiennent aux échelles considérées (échelle spatiale d'une part, échelle micrométrique d'autre part), aux couplages avec la biologie et la chimie, à la gestion des risques qu'ils soient environnementaux ou industriels, à la révolution numérique.
- ✓ elles jouent un rôle dans la compréhension et la résolution des grands problèmes actuels : climat, transition énergétique, mobilité, production, santé ;

Objectifs initiaux au démarrage du cours

Lorsque j'ai repris le cours de mécanique rationnelle en 2016, je m'étais fixé de nombreux objectifs:

- rédiger un nouveau syllabus de cours;
- expliciter les 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...). A titre d'exemple, le chapitre sur les systèmes à masse variable (basé sur des équations de bilan de quantité de mouvement) permet de jeter des ponts d'une part vers le cours d'analyse (théorème de Leibnitz donnant la dérivée d'une intégrale dont les bornes varient avec la variable) et d'autre part vers le cours de mécanique des fluides (théorème de transport de Reynolds définissant le taux de variation de la quantité de mouvement dans un système ouvert) ;
- intégrer les deux chaînons habituellement manquant dans l'enseignement de la mécanique, focalisé sur l'écriture d'équations du mouvement : d'une part la phase de modélisation indispensable lien entre la réalité et l'équation, et d'autre part la résolution – le plus souvent numérique – des équations du mouvement, indispensable lien pour fermer la boucle et interpréter le résultat mathématique à la lumière du problème posé initialement (idée déjà abordée à la Figure 1) ;
- aborder les outils du chaos (plan des phases, section de Poincaré, diagramme de bifurcation), qui depuis vingt ans étaient enseignés par la pratique d'un projet ne permettant qu'à une minorité d'étudiants d'en saisir l'essence ;
- développer de nouveaux dispositifs expérimentaux pour les laboratoires et pour le cours (notre gyroscope du 19^{ème} siècle a fini par tomber en panne définitive) ;
- illustrer le cours avec des éléments d'application, y compris dans des domaines a priori hors du champ de la mécanique (application de la diagonalisation de la matrice d'inertie – recherche des axes principaux – à la reconnaissance automatique de l'orientation d'un objet dans un image) ;
- illustrer le cours avec des éléments d'histoire, et replacer les idées dans leur chronologie ou mieux, leur contexte : on détaille par exemple les développements de Newton dans ses Principia, magnifique exemple illustrant l'évolution des outils mathématiques (Newton construit sa démonstration à l'aide de la géométrie et des coniques (voir Figure 4), l'analyse différentielle et la fameuse de Binet ne venant que plus tard !), le rôle passé sous silence des femmes dans

l'aventure des idées (en l'occurrence les Principia sont traduits en français par Emile du Châtelet), et les outils numériques actuels permettant l'accès aux archives et à la connaissance scientifique (Gallica) ;

- animer les mécanismes de manière interactive grâce au logiciel Geogebra³

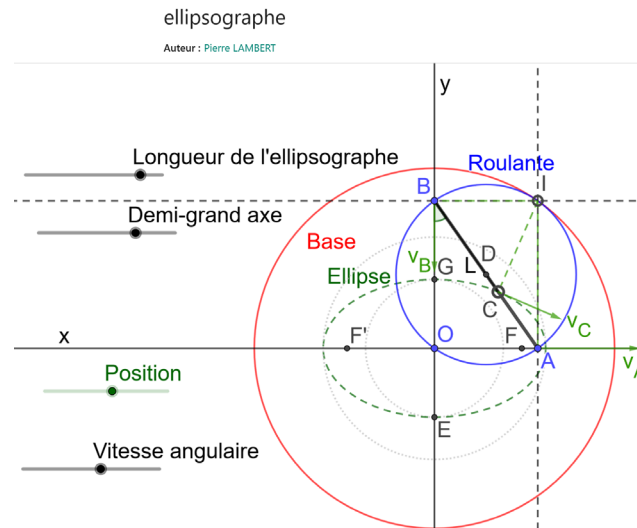


Figure 3 : Exemple d'animation Geogebra du mécanisme de l'ellipsographe : un point C d'une barre dont l'extrémité A translate le long de l'horizontale et dont l'extrémité B translate le long de la verticale décrit une ellipse. Les curseurs permettent à l'étudiant de changer la taille de la barre, le grand axe de l'ellipse (càd la position de C entre A et B), la position de la barre, et sa vitesse angulaire (qui définit la norme des vecteurs vitesses représentés en vert). <https://www.geogebra.org/m/q8hqb5mc>

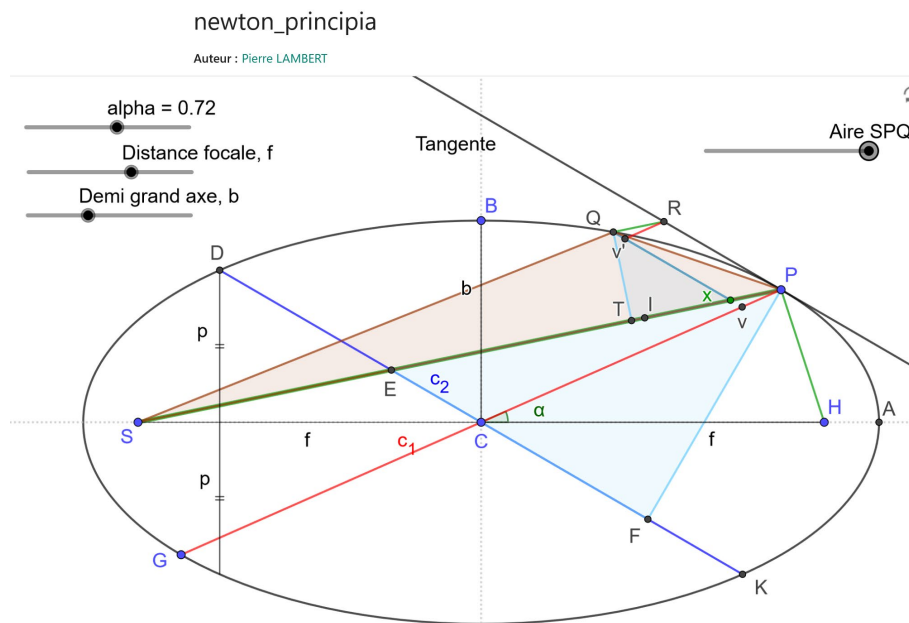


Figure 4 : Exemple d'animation Geogebra illustrant la démonstration de Newton des lois de la gravitation. L'aire de la surface grise SPQ représente le temps, puisque l'on sait depuis Kepler que les rayons-vecteurs balaient des aires égales en des temps égaux. Au cours de cet intervalle SPQ, la planète combine un mouvement inertiel PR et une attraction de norme Px dirigée vers S mais reportée en R : $\vec{PR} + \vec{RQ} = \vec{PQ}$. Les autres paramètres sont relatifs à la démonstration des Principia. Supposant une trajectoire elliptique, la démonstration conduit à une force de gravitation en $1/SP^2$. <https://www.geogebra.org/m/rekdce8n>

³ <https://www.geogebra.org/u/plambert>



En chemin, j'ai également introduit des séances en classe inversée à travers un laboratoire réalisé en grand auditorio, pris part au lancement du bachelier à Charleroi en enseignant ce cours deux ans et en laissant à mon collègue Charles Cuvelliez de nouveaux démonstrateurs expérimentaux.

L'équipe formidable qui travaille actuellement avec moi m'a en outre permis de développer un nouveau syllabus de tp et un syllabus de laboratoire. Les étudiants sont également impliqués dans cet exercice, grâce aux fonds de l'institution (Nathan Nascimento en 2022-2023, Dorian De Frenne en 2023-2024).

Cours actuel

Le cours se compose d'un contenu de base, enseigné chaque année, et d'un contenu optionnel qui varie d'année en année. Cette option a été retenue suite à un échange avec les étudiants pointant un volume de matière excessif (voir à ce sujet la section 3 sur l'évaluation des enseignements).

- ✓ Contenu de base : Cinématique du solide dans le plan et dans l'espace, travaux virtuels, moments, produits et tenseurs d'inertie, cinétique du solide et théorèmes généraux, équations de Lagrange, dynamique des systèmes de solides, systèmes à masse variable, résolution numérique d'équations du mouvement.
- ✓ Contenu optionnel : Théorie hamiltonnienne, principes variationnels, lois de Kepler, chocs dans les systèmes de solides, outils du chaos.

Les compétences visées sont somme toute assez restreintes : **établir le nombre de degrés de libertés d'un système, écrire ses équations du mouvement ou calculer les réactions de liaison, et résoudre numériquement une équation différentielle ordinaire d'ordre 2**. Bien sûr, pour y arriver, il faut passer par l'enseignement de très nombreux concepts : cinématique du solide (pour la compréhension des mouvements), travaux virtuels (en vue d'établir les équations de Lagrange), éléments d'inertie, théorèmes généraux, équations de Lagrange, bilans de quantité de mouvement (pour les systèmes à masse variable). L'agencement de tous ces concepts est proposé graphiquement aux Figure 5 et Figure 6.

Ce cours contribue donc au profil d'enseignement en adoptant une démarche scientifique appliquée, alliant rigueur et créativité : élaborer un raisonnement scientifique structuré en mettant en œuvre les langages et les outils propres aux sciences et sciences de l'ingénieur.

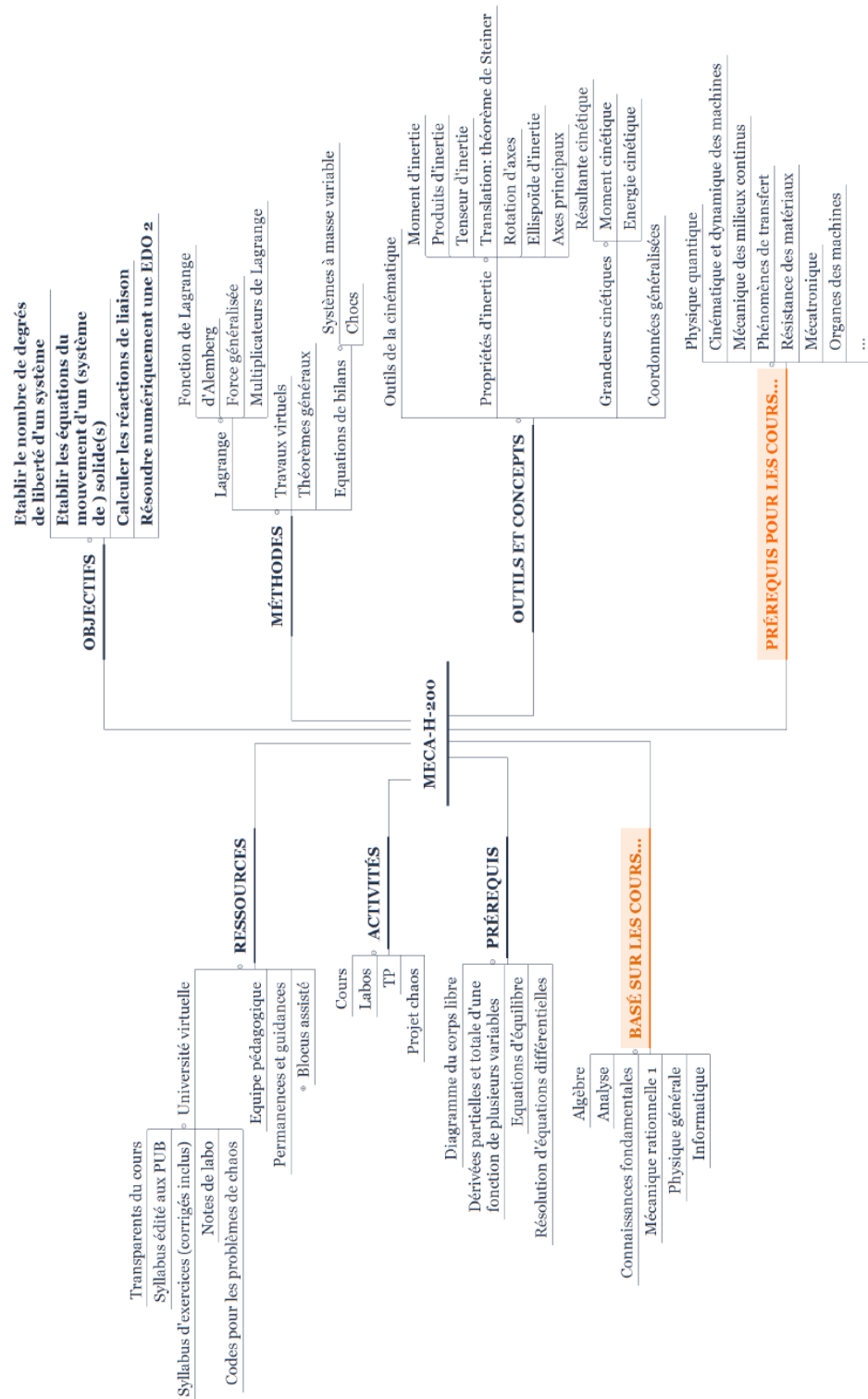


Figure 5 : Structure du cours de mécanique rationnelle MECA-H200 (ressources, activités, prérequis, objectifs, méthodes, outils et concepts, cours amont et aval)

	Statique	Dynamique
Méthode vectorielle (Théorèmes généraux)		
Translation	$\underbrace{\sum \bar{F}_h = 0}_{\text{Equilibre de translation (meca-h-100)}}$	$\underbrace{\sum \bar{F}_h = \frac{d(m\bar{v}_G)}{dt}}_{\text{Th.Rés.Cin. (Section 8.2)}}$
Rotation	$\underbrace{\bar{C}_A = \sum_h \overline{AP}_h \times \bar{F}_h = 0}_{\text{Equilibre de rotation (meca-h-100)}}$	$\underbrace{\bar{C}_A = \sum_h \overline{AP}_h \times \bar{F}_h = - (m\bar{v}_G \times \bar{v}_A) + \frac{d(\bar{M}_A)}{dt}}_{\text{Th.Mom.Cin. (Section 8.3)}}$
Méthode analytique		
Travaux virtuels	$\underbrace{\delta\tau = \sum_i \left(\sum_h \bar{F}_h \cdot \frac{\partial \bar{r}_h}{\partial q_i} \right) \delta q_i = 0}_{\text{Travaux virtuels (Chapitre 5)}}$	$\delta\tau = \sum_i Q_i \delta q_i = \sum_i \left(\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} \right) \delta q_i$ <p style="text-align: center;">Equations de Lagrange (Chapitre 9)</p>
Hamilton		$\underbrace{\dot{q}_i = \frac{\partial H}{\partial p_i}; \dot{p}_i = - \frac{\partial H}{\partial q_i}}_{\text{Equations de Hamilton (Chapitre 10)}}$
Méthode variationnelle		<p style="text-align: center;">Action S extrémale</p> $S = \int_{t_0}^{t_1} L(q_i, \dot{q}_i, t) dt \text{ avec } L = T - V$ <p style="text-align: center;">Principes variationnels (Chapitre 15)</p>

Figure 6 : Aperçu des méthodes de la mécanique rationnelle pour les problèmes de statique et de dynamique

Méthodes d'enseignement

Le cours varie les méthodes :

- ✓ enseignement ex-cathedra des concepts de mécanique du solide (cinématique, théorèmes généraux, équations de Lagrange, systèmes à masse variable, chocs) ;
- ✓ mise en pratique au TP de la démarche de modélisation (diagramme du corps libre) -> équation du mouvement -> interprétation physique du résultat obtenu
- ✓ démarche expérimentale (définition de l'objectif de l'expérience, mesure et calcul d'erreur)
- ✓ prise en main d'un logiciel de calcul scientifique (Matlab, Python, Octave) illustrant le chaos déterministe.

Pour la première fois en 2022-23, nous avons proposé une activité de laboratoire en grand auditoire, visant à déterminer expérimentalement l'inertie d'une roue de vélo. La période d'oscillation a été mesurée (Figure 7) directement avec le téléphone d'un étudiant (mesure individuelle) ou mesurée simultanément par 250 étudiants comptant le temps de 5 périodes et l'encodant en direct. La confrontation de 250 mesures toutes différentes permet ainsi de confronter les étudiants avec le concept d'erreur de mesure et jette un pont vers le cours de statistique.

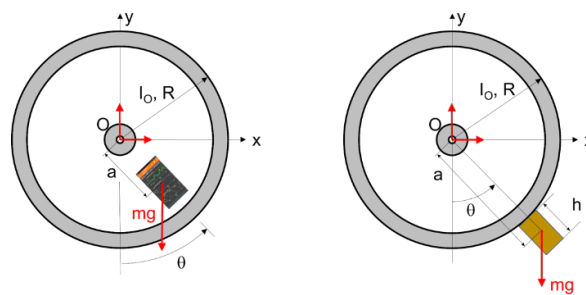


Figure 7 : dispositifs utilisés au cours oral pour la détermination expérimentale de l'inertie d'une roue de vélo : à gauche, un téléphone inséré entre les rayons joue le rôle de balourd transformant une roue de vélo (par définition équilibrée) en pendule ; à droite, un balourd est vissé à la roue en exploitant le trou laissant passer la pipette dans la jante

Le cours de mécanique se prête particulièrement bien à l'observation quotidienne : on a déjà évoqué le basculement d'une remorque ou la démultiplication d'un tire-bouchon à la Figure 1. Pourtant, l'enseignement classique de la mécanique démarre avec un énoncé, qui est déjà la traduction d'une situation réelle complexe en une simplification bien souvent détachée du sens réel (« une barre AB pivote autour d'un point fixe... »). Les deux étapes suivantes sont par contre enseignées intensément (analyse et écriture d'équations), quoique souvent les étudiants court-circuitent (à tort) la phase d'analyse pour se lancer dans les calculs et l'écriture d'équations. La dernière étape, la résolution de ces équations, est le plus souvent laissée au cours d'analyse numérique, ce qui empêche d'exploiter pleinement les résultats pour rétro-agir avec le système réel (conception, optimisation).

Un mot sur l'évolution du cours en phase avec les priorités facultaires

Tout d'abord, le cours participe à l'effort de la Faculté pour visibiliser les femmes, ici dans l'histoire de la mécanique : Maria Cunitz (correction des calculs de Kepler et première traduction du latin vers l'allemand), Emilie du Châtelet (énergie cinétique et traduction de Newton en français), Sophie Kovalevskaia (mécanique du solide)...

Ensuite, les liens entre mécanique et transition énergétique sont explicités par les exemples du stockage d'énergie sous forme gravitaire (exploitation de puits de mines ou de voies ferrées) et cinétique (stockage dans les véhicules avec le KERS, stockage domestique en remplacement des batteries, stockage industriel pour les applications de grande puissance).

L'apport de la période COVID

La crise sanitaire aura permis la conception et fabrication de nouveaux démonstrateurs ⁴, et l'organisation d'un laboratoire « à la maison ». On a donc ainsi demandé aux étudiants d'étudier le roulement d'un objet tronconique (gobelet, verre à vin) sur une planche inclinée (table de bureau, planche à découper, bande dessinée). Ce problème simplifié à l'extrême en termes de matériel expérimental se prête parfaitement à l'illustration des concepts du cours de mécanique du solide : calcul des propriétés d'inertie d'un objet tronconique, cinématique 3D, écriture des équations du mouvement, identification de celles-ci à un oscillateur harmonique permettant d'appliquer les formules du cours de physique pour la détermination de la période d'oscillation.

Une fois l'impulsion donnée, de nombreuses nouvelles manipulations ont été créées (Figure 8): pendule de Foucault, pendule roue de vélo, utilisation des capteurs d'un téléphone et recours à l'application phyphox pour la mesure de la vitesse de rotation d'une roue de vélo, objet conique (verre) roulant en oscillant sur un plan incliné, hémisphère en bois roulant entre deux rails, vidéo haute cadence de la déformation d'une balle de golf lors de l'impact avec le club, objet didactique « disque d'Euler », rampe de roulement de type skate-board adaptée au roulement d'une large gamme d'objets.

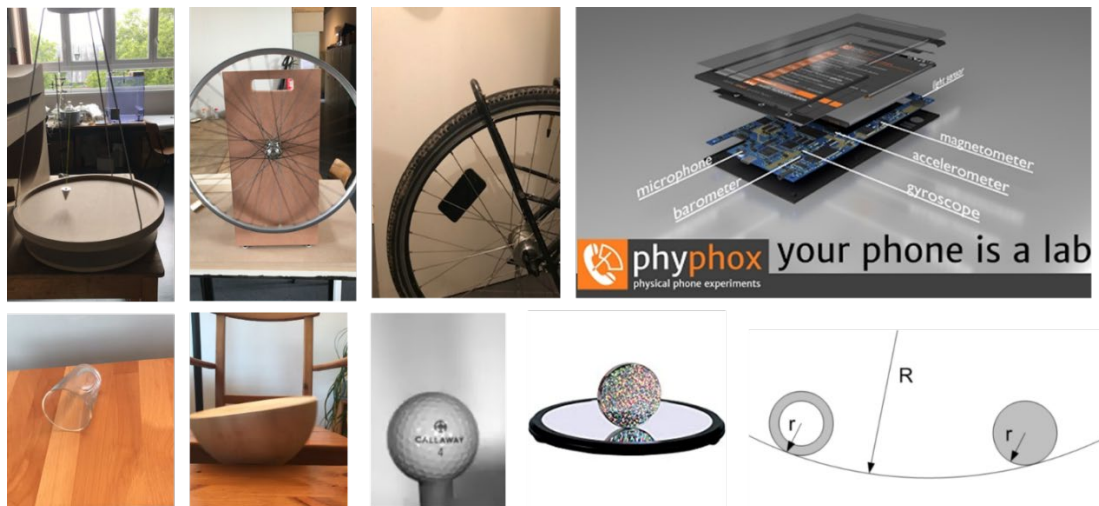


Figure 8 : démonstrateurs conçus pour ou exploités dans le cours. Première ligne : pendule de Foucault, pendule roue de vélo, utilisation des capteurs d'un téléphone et de l'application phyphox pour la mesure de la vitesse de rotation d'une roue de vélo. Deuxième ligne : objet conique (verre) roulant en oscillant sur un plan incliné, hémisphère en bois roulant entre deux rails, vidéo haute cadence de la déformation d'une balle de golf lors de l'impact avec le club, objet didactique « disque d'Euler », rampe de roulement de type skate-board adaptée au roulement d'une large gamme d'objets (cylindres pleins et creux, moyeux de roues de vélo...).

Perspectives

Beaucoup de nouvelles initiatives ont été menées à bien, il nous reste néanmoins quelques projets:

- collaboration avec l'Experimentarium pour la production de films expliquant les phénomènes de la mécanique du solide (pendules, brachistochrone, énergie, forces de Coriolis...)
- contribution à l'activité expérimentale mécanique dans les écoles secondaires par la mise à disposition des démonstrateurs réalisés ces dernières années (ou de leurs plans pour une collaboration via le Fablab)

⁴⁴ Les démonstrateurs en bois ont été réalisés en télétravail pendant le covid, par Hervé Baudine qui disposait d'un atelier à bois à domicile.

- utilisation d'outils de type ChatGPT/Perplexity pour d'une part pousser les étudiants à poser et raffiner leurs questions de mécanique par écrit, et d'autre part générer rapidement un grand nombre de réponses très plausibles (mais le plus souvent fausses⁵) et demander aux étudiants de repérer les erreurs.

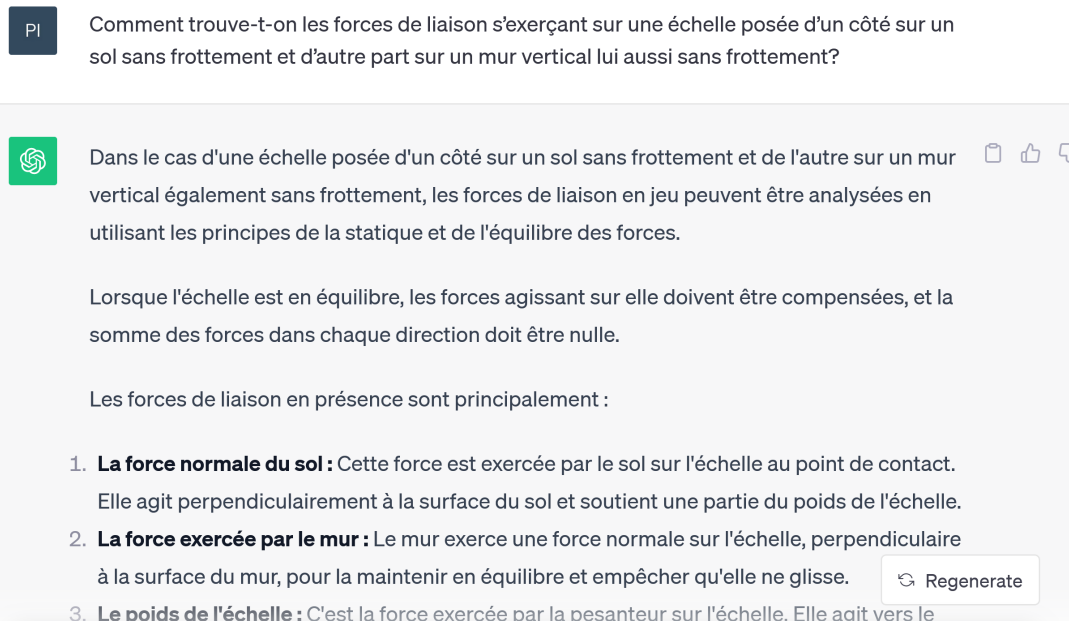


Figure 9 : ChatGPT comme sparring partner : tout à l'air plausible, sauf le présupposé que l'échelle est à l'équilibre.

- [Cours de procédés de microfabrication MECA-H500 \(2-0-1\), depuis le février 2007](#)

Positionnement

L'organisation de ce cours de fabrication est inspirée du cours du Prof. Jacques Jacot chez qui j'ai séjourné à l'EPFL en 2005 et en 2008. Plutôt que de donner un enseignement extrêmement pointu sur un nombre limité de techniques de fabrication, le cours est construit pour permettre aux étudiants de sélectionner de manière raisonnée une technique adaptée à un problème particulier. Cette façon de faire est sans doute très adaptée au paysage industriel belge, du moins dans les domaines de la mécanique et de l'ingénierie biomédicale, composé essentiellement de petites PME, dans lesquelles le jeune ingénieur ne bénéficie pas forcément d'installations pointues de fabrication, et se tourne donc vers la sous-traitance.

Cours actuel

Le contenu propose une série de séminaires, présentant chacun une technique de production microtechnique ou éventuellement un produit microtechnique en abordant les dimensions suivantes : les principes physiques de la technique (par exemple l'interaction lumière-matière en découpe laser), les constituants technologiques de la machine mettant en œuvre cette technique (pour rester avec l'exemple précédent : laser, transport et conditionnement du faisceau, axes déplaçant la pièce), les limitations de la technique et les règles de conception de produit en vue de leur fabrication, les

⁵ J'ai soumis les questions de l'examen de janvier 2023 à ChatGPT, qui obtient 3,5/20. La machine n'est jamais prise au dépourvu et propose des réponses toujours plausibles mais malheureusement souvent inexactes.

avantages et inconvénients, les techniques concurrentes, une étude de coût et une étude d'empreinte écologique.

On veut ainsi apprendre aux étudiants à choisir une technique en fonction des caractéristiques du produit (taille, matière, finition...) et de la taille de la série (qui conditionne le coût unitaire par le jeu du coût fixe, indépendant de la taille de la série, et du coût variable, proportionnel à la taille de la série) . L'introduction d'un modèle de coût et d'empreinte carbone prenant en compte la machine, l'énergie, la main d'œuvre et la matière permet de questionner avec les étudiants les affirmations que l'on entend tous les jours à propos du coût tantôt de l'énergie, tantôt de la main d'œuvre.

L'examen se fait à cahier et ordinateur ouvert : il s'agit de sélectionner une technique sur base d'un échantillon mis à disposition et d'un scénario de taille de série.

Méthodes d'enseignement

Le cours est essentiellement en « classe inversée » : 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. Les rapports des étudiants (après correction) constituent la base d'étude.

Trois demi-journées sont dédiées à la visite d'entreprises. Le cours est complété par un petit nombre de séminaires ex-cathedra que je donne.

Un mot sur l'évolution du cours en phase avec les priorités facultaires

La dimension d'étude de coût s'est étendue en 2022-2023 à l'étude de l'empreinte écologique du procédé étudié. On applique la même méthodologie que pour l'estimation des coûts : d'une part le coût fixe (indépendant de la taille de la série, comme par exemple l'empreinte CO₂ d'un moule d'injection), d'autre part le coût variable, défini comme la partie du coût unitaire proportionnel à la taille de la série : ceci inclut le coût de la machine (l'ADEME donne l'ordre de grandeur de 5.5kgCO₂/kg), le coût de l'énergie (concept de mix énergétique d'un pays), de la maintenance, de la main d'œuvre, de la matière (énergie grise donnée par le logiciel Granta Design).

On arrive ainsi à des questions quasiment d'ordre philosophique : s'il paraît évident d'imputer à un produit le coût en euros de la main d'œuvre, doit-on imputer à son bilan écologique une émission de CO₂ dépendant du mode de vie de l'opérateur qui l'a fabriqué ?

Perspectives

Le cours de microfabrication a trouvé un équilibre. Il est suivi par un nombre raisonnable d'étudiants pour un cours à option (entre 10 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.

- [Cours de Soft Microrobotics MECA-H501 \(2-0-2\), depuis le février 2007](#)

Positionnement

Ce cours est mon cours « recherche ». Issu de mes travaux portant sur la conception de systèmes microrobotiques fluidiques (capillarité, tension de surface) et flexibles (guidages flexibles, matériaux actifs, structures à raideur variable), ce cours illustre également deux méthodologies de recherche bien utiles: l'analyse dimensionnelle et les plans d'expériences.

Pierre LAMBERT
15/11/2023

Le lien avec la recherche y est très fort, et son niveau de spécialisation m'est également très utile dans mes collaborations de recherche ou mes missions de formation continue (cours Technifutur, cours à la Fondation Suisse pour la Recherche en Microtechnique – FSRM, formation aux plans d'expériences pour la société ABB). J'ai construit et enseigné ce cours pendant mes séjours de Professeur invité à l'université Aalto (2013) ou plus récemment à l'université Waseda (2023).

Ce cours est également l'occasion de présenter aux étudiants les travaux de mes doctorants ou ceux de mes visiteurs (IMEC, TU/d, Sorbonne, FEMTO-ST...).

La partie pratique et de travail personnel demandée aux étudiants est l'occasion de leur confier une (petite) question de recherche : un modèle, un banc d'essai, une campagne de mesures.

Cet enseignement doit être mis à jour très régulièrement pour suivre l'état de l'art. Mes collaborations européennes dans le domaine (j'ai coordonné par deux fois la rédaction d'un projet de recherche MSCA DN), les projets réalisés ou déposés en Belgique, mes contacts avec l'Université Waseda me permettent de proposer un regard actuel sur les développements en soft microrobotique. En novembre 2023, j'organiserai le 4^{ème} workshop international sur le sujet (<https://softrob.ulb.be/>), rassemblant des intervenants de nombreux pays (France, Japon, Italie, Israël, Belgique).

Cours actuel

Les objectifs en termes de contenu sont le suivi des avancées récentes de la recherche dans le domaine des matériaux souples actifs, des mécanismes compliants et mécanismes flexibles, ainsi que les effets de la tension de surface dans les microsystèmes. Ces objectifs disciplinaires sont complétés par deux objectifs méthodologiques : l'enseignement de l'analyse dimensionnelle et celui des plans d'expériences. Les étudiants sont donc confrontés à nos pratiques de recherche dont la consultation de la littérature scientifique.

Méthodes d'enseignement

Le cours se compose de séminaires et d'un projet. Les séminaires peuvent être assurés quand cela s'y prête par mes doctorants ou des visiteurs. Le projet donné en 2022-2023 consistait en la lecture d'un article de la littérature décrivant le fonctionnement d'une capsule endoscopique de biopsie et de son mécanisme d'ouverture/fermeture basé sur un mécanisme flexible instable. Les étudiants ont été invités à concevoir à échelle agrandie une telle structure, à l'imprimer en 3D, et à la caractériser (force vs déplacement) sur un banc de mesure mis à leur disposition. Quand cela s'y prête, on invite les étudiants à utiliser le temps de ce projet pour appliquer la méthode des plans d'expériences à leur mémoire de fin d'études.

Perspectives

Je souhaiterais également développer plus la partie plans d'expériences de ce cours, pour peut-être en tirer un enseignement indépendant, très transversal et qui pourrait être adopté par de nombreuses filières.

- [Cours de mécanique rationnelle MECA-H202 \(2-2-1\), du 15/09/2020 au 14/09/2022](#)

Ce cours est identique en termes de contenu au cours de mécanique enseigné à Bruxelles. Pendant sa création dans le cadre du bachelier à Charleroi, j'ai par contre conçu de tout nouveaux laboratoires, en bénéficiant notamment d'un crédit d'impulsion pour acheter du matériel didactique (capteurs de

forces, chariots instrumentés, pendule chaotique). J'ai renoncé cet enseignement à la rentrée 2022 pour assurer les fonctions de vice-doyen international de l'EPB.

- Projets multidisciplinaires de première année TRAN-H-101

Positionnement

L'introduction d'un projet de première année il y a vingt ans a permis de sensibiliser les étudiants d'une part à des thématiques disciplinaires orientant leur choix d'études (laser show, drones...) et d'autre part aux fameuses soft skills. On a parfois oublié que le temps pris sur les cours pour permettre le projet permettait aussi aux étudiants de consolider les apprentissages de première année. Il est donc essentiel d'injecter dans ces projets des éléments disciplinaires au niveau des étudiants de BA1. Parce qu'il est très « visuel » et fait appel à des objets et des moyens de fabrication du quotidien, le cours de mécanique rationnelle se prête assez facilement à l'exercice d'un projet d'année.

J'avais proposé dès 2009 (et mon retour de postdoc en Suisse) un projet ayant trait à la mécanique des montres : stockage d'énergie, transmission, échappement et oscillateur. Pour des raisons évidentes de fabrication à l'échelle horlogère, le sujet n'était pas réalisable. Il faisait par contre 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.

Méca²r : le véhicule à ressorts (2012-2013)

J'ai donc augmenté l'échelle et coordonné en 2012-2013 le projet d'année portant sur la conception et la modélisation d'une voiture à énergie mécanique à l'échelle du jouet (projet Méca²r). Au-delà des objectifs génériques poursuivis par le dispositif du projet BA1 (travail de groupe, gestion de projet...), le sujet proposé permettait de faire travailler les étudiants sur les deux activités principales de l'ingénieur :

- ✓ **Concevoir et fabriquer** un véhicule à énergie mécanique pour étudier les concepts mécaniques de base et prendre part au concours de fin d'année
- ✓ **Modéliser** ce véhicule pour en prédire les performances dans une série de tests prédéfinis

Ces deux étapes sont intrinsèquement liées dans le processus 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.

Les modèles développés par les étudiants pouvaient 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 devaient permettre d'effectuer le réglage du véhicule en prévision de l'un des tests définis dans le cahier des charges.

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

- ✓ **L'énergie** : Comment évaluer l'énergie nécessaire pour remonter la pente? Comment évaluer l'énergie embarquée? Comment évaluer les pertes et le rendement du véhicule?
- ✓ **Les forces**: Quelles sont les forces en jeu? Dans la structure du véhicule?
- ✓ **Les ressorts** : Comment choisir leur raideur? Leur précontrainte? Leur longueur libre? Quel allongement maximal? Comment choisir le nombre de spires? La taille d'une spire?
- ✓ **L'inertie** : Quelles sont les inerties du véhicule? Quel est le rôle d'un volant d'inertie?

- ✓ **La transmission** : Quelle chaîne cinématique? Quel rapport de réduction? Quels organes de transmission? Quel diamètre de roues?
- ✓ **L'adhérence et le frottement**
- ✓ **La démarche expérimentale**: les tests sont-ils répétables? modélisables?

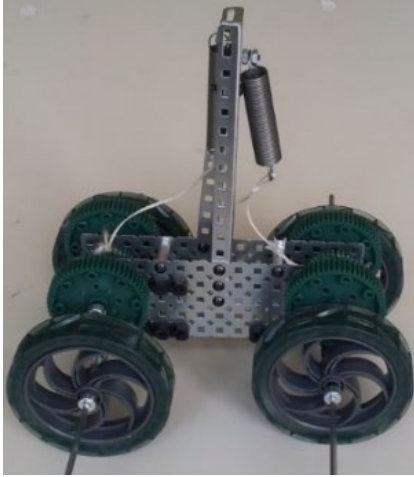


Figure 10 : A gauche, projet Méca²r, exemple de véhicule réalisé par les étudiants (2012-2013) ; A droite, projet Gyrocar, prototype de l'équipe organisatrice (2023-2024)

Gyrocar : le véhicule à volant d'inertie (2023-2024)

Fort du succès didactique du projet Méca²r, un nouveau projet très similaire en termes d'ingrédients est proposé cette année (2023-2024), en collaboration avec le Prof. Axel Coussement. L'énergie sera stockée dans un volant d'inertie plutôt que dans des ressorts, et le choix de la transmission sera orienté vers la courroie, présentant moins de pertes que les engrenages.

Les concepts seront un peu plus avancés (volant d'inertie dès le début du projet), les choix de conception un peu restreints (obligation de fabrication au Fablab, usage de courroie), mais les deux ingrédients de conception et de modélisation irrigueront on l'espère le projet avec le même succès. Absente il y a dix ans et témoin de l'évolution des mentalités, la dimension d'empreinte écologique, sera abordée avec la prise en compte du désassemblage et du recyclage du véhicule. On abordera également plus l'idée de loi d'échelle, pour questionner le réalisme d'un véhicule à ressort ou à volant d'inertie à l'échelle de la voiture et non plus du jouet.

Rôle des mesures et de la démarche expérimentale

Le projet intégrateur de BA1 est l'occasion d'insister sur l'importance de la démarche expérimentale : définir les objectifs de la mesure, identifier le dispositif de mesure lui-même (soit utiliser un équipement existant soit développer un banc et un protocole de mesure), prendre en compte les erreurs de mesure (approche statistique et approche basée sur les dérivées partielles par ailleurs enseignée dans le cours d'introduction aux sciences de l'ingénieur), tenir à jour un cahier de laboratoire. Le développement des smartphones offre aux étudiants un dispositif de poche pour mesurer les vitesses par PIV (deux photos successives tirées d'un film en slow motion permettent d'évaluer le déplacement d'un point en 4.4ms, Figure 11), ou les accélérations pour en déduire des forces de frottement (Figure 12).

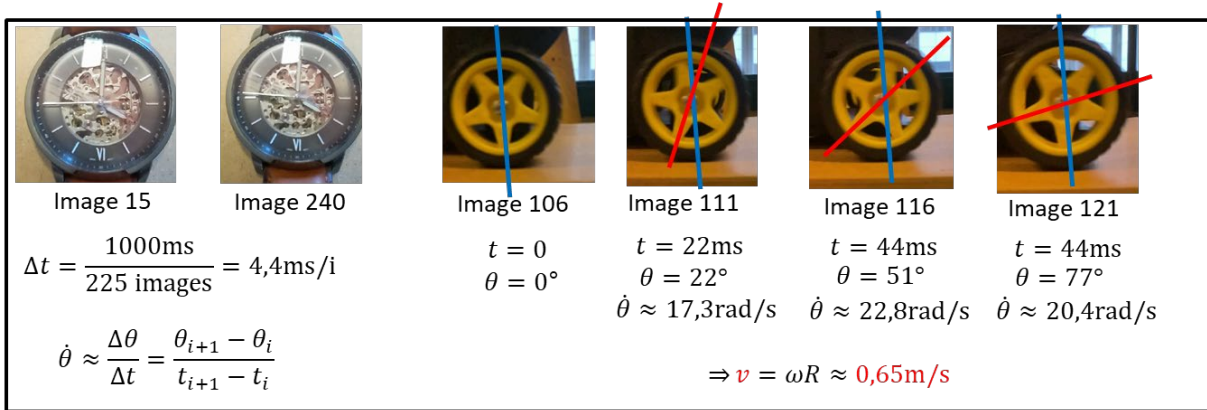


Figure 11 : Utilisation de la caméra du téléphone en mode slow motion pour (1) mesurer une base de temps ; (2) mesurer la vitesse de rotation des roues et donc la vitesse linéaire du véhicule. L'accès à cette vitesse permet l'évaluation de l'énergie cinétique en temps réel, et donc par comparaison avec l'énergie initiale, les pertes d'énergie au cours du mouvement. Note : le freeware Tracker est très pratique pour l'analyse des images.

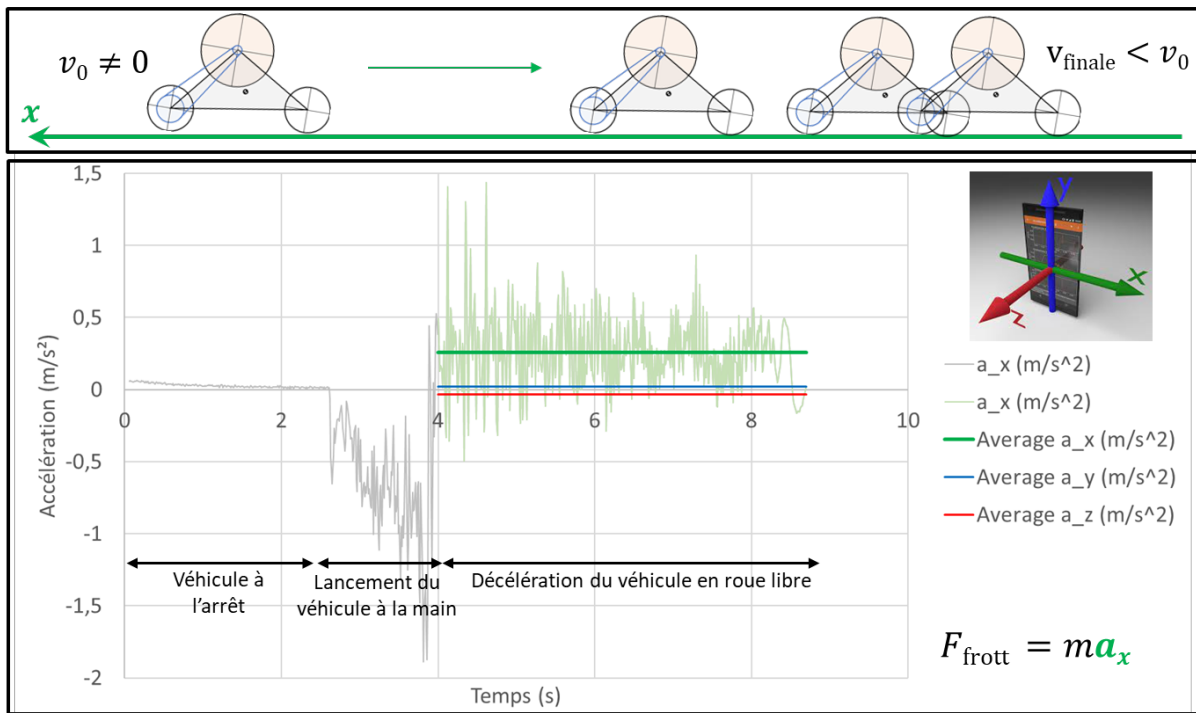


Figure 12 : Utilisation de l'application Phyphox pour la mesure des accélérations du téléphone posé sur le véhicule. Connaissant la masse du véhicule (et celle du téléphone !), on accède très facilement à l'estimation de la force de frottement lors de la phase de ralentissement (en vert, après $t=4\text{s}$).

Méthodes de l'ingénieur

Le projet a permis de développer un séminaire de méthodologie transversal, balayant de nombreuses méthodes de l'ingénieur : démarche de conception de produits, ordre de grandeur et lois d'échelle, modélisation, évaluation expérimentale...

Au-delà de la mécanique, un four solaire ?

Bien d'autres sujets sont enthousiasmants pour le Professeur qui propose le projet, ainsi l'idée de « peser » la Terre, càd de mesurer successivement son rayon (expérience d'Erasthôte il y a 2400

ans), la gravité locale g (expérience de Galilée au 17^{ème} siècle) et la constante de gravitation universelle G (expérience de Cavendish à la fin du 18^{ème} siècle). On peut ensuite combiner ces trois données avec la loi de la gravitation universelle pour en tirer la masse de la Terre.

Si je devais remettre le couvert une fois encore, je choiserais probablement plus l'idée de (faire) développer un four solaire pour les cantines de l'ULB. Le concours de fin d'année pourrait en outre être collaboratif, consistant à faire cuire par l'ensemble de groupes les saucisses du jury de fin d'année.



Figure 13 : Cuisson de pommes de terre à l'aide d'un four solaire, atteignant 200°C par bonnes conditions (prototype personnel)

- Encadrement de projets, mémoires et thèses des cinq dernières années

L'aperçu de mes encadrements est donné au Tableau 1 et la Figure 14.

	Total	>=2018	<2018
Projet BA1	2	1	1
Projet BA2	1	0	1
Projet MA1	31	3	28
Stages IN	9	5	4
Stages OUT	10	1	9
MFE	82	24	58
#PhD défendus	14	6	8
#PhD en cours	6	-	-

Tableau 1 : Encadrement de projets divers

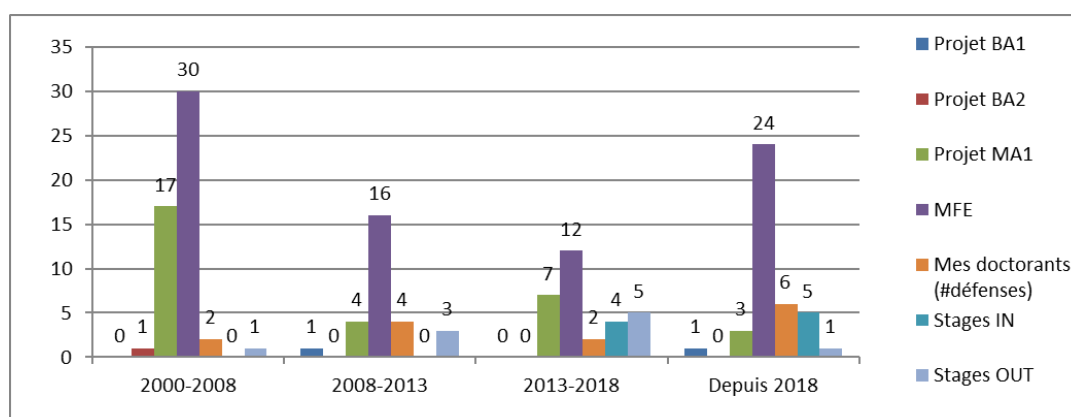


Figure 14 : Encadrements annuels (nombre de chacun des projets, à l'exception des doctorats, pour lesquels on donne le nombre de doctorants)

Aux chiffres du graphique ci-dessous s'ajoutent les supervisions d'un doctorant visiteur de l'université d'Okayama en 2014, d'un doctorant visiteur de l'université de Waseda en 2019, ainsi que la supervision

actuelle de 5 doctorats à l'ULB. Un doctorant visiteur de Waseda, Monsieur Shodai Hasebe, est attendu pour un séjour de deux mois en 2024.

Les collaborations que j'ai pu tisser en recherche ont bénéficié à mes doctorants grâce à de nombreuses cotutelles : Université de Franche-Comté (Cyrille Lenders, Ronald Terrazas, Franco Piñan Basualdo), Sorbonne Université (Marion Sausse-Lhernould), Université de Liège (Loïc Amez-Droz), Université de Mons (Matéo Tunon de Lara). Ces cotutelles donnent ainsi accès à des équipements scientifiques par toujours disponibles à l'ULB, et fournissent surtout un horizon scientifique aussi large que possible.

Jusqu'ici, ces encadrements se sont bien déroulés : pas ou peu de retard à la soutenance, pas d'abandon, publications raisonnables des résultats obtenus. Je reste néanmoins préoccupé par les questions suivantes:

- ✓ 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 ?

- **Éléments mis en œuvre pour favoriser les apprentissages et la réussite des étudiants**

Les cours de deuxième master ne posent pas de problème de réussite. De temps à autre, une coordination en réunion de filière permet de s'assurer que le volume et les échéances du travail demandé restent raisonnables.

La question de la réussite dans le cours de mécanique rationnelle MECA-H200 est plus sensible. On a bien sûr développé tous les outils classiques : offre complète de supports d'enseignement (syllabus de cours, de tp, de labo, capsules vidéos), permanences par l'équipe enseignante, coordination avec les guidances du BAPP, mise à disposition de tests d'auto-évaluation sur l'UV et d'examens corrigés, engagement d'élèves-assistants pour la mise à jour du syllabus d'exercices, restant ainsi au plus près des préoccupations des étudiants.

Un exemple d'échange avec les délégués étudiants du BEP concernant le cours de mécanique est rapporté à la Section 3.

- **Synthèse et perspectives générales**

Synthèse

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. La Figure 15 regroupe l'ensemble des enseignements que j'ai assurés depuis le début de ma carrière : **physique et mathématique dans l'enseignement secondaire, sciences de base** (connaissances fondamentales, mécanique appliquée pour architectes, mécanique rationnelle I et II), 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), **cours méthodologiques** (design of experiments, analyse dimensionnelle), **projets**.

		Mode d'enseignement						Supports								
		Cours ex-cathedra	Séminaires	Exercices dirigés	Activité expérimentale	Projet individuel	Projet de groupe	Contact industriel	Syllabus de cours	Syllabus d'exercices	Syllabus de laboratoires	Slides	Energistements vidéo	Activités d'enseignement	Activités de recherche	
	Cours de physique et mathématique dans l'enseignement secondaire	v		v					v	v	v				v	
	Connaissances fondamentales			v						v					v	
ISAB-012	Statique pour architectes (Horta)	v		v					v	v		v			v	
MECA-H100	Mécanique rationnelle 1			v						v					v	
MECA-H200	Mécanique rationnelle 2	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v
MECA-H202	Mécanique rationnelle 2 (Charleroi)	v		v	v				v	v	v	v	v		v	
MECA-H201	Technologies	v													v	
MECA-H303	Cinématique et dynamique des machines	v													v	
	Organes des machines	v													v	
MECA-H409	Design methodology	v	v				v		v		v				v	
MECA-H500	Microfabrication techniques	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v
MECA-H501	Soft Microrobotics	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v
	Design of experiments	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v
	Projet de première année						v								v	
	Projet de master						v								v	
MEMO-H5XX	Travail de fin d'études					v	v								v	v
	Enseignements des cinq dernières années															

Figure 15: Vue synthétique des enseignements que j'ai assurés depuis le début de ma carrière (en bleu : les cinq dernières années). On y présente les différents modes d'enseignement et supports, ainsi que leur dimension de recherche.

Perspectives générales

Des perspectives ont été tracées pour chaque enseignement ci-avant. Au-delà de cela, voici quelques pistes pour le futur :

- ✓ Arrêt possible des cours de MA2 au profit d'un nouvel enseignement de tronc commun autour des méthodes expérimentales (notamment plans d'expériences, avec Alessandro Parente) ;
- ✓ Vers un cours de mécanique rationnelle II simplifié, suivi d'un cours de mécanique rationnelle III avancé

Mon emploi du temps actuel comme promoteur de recherche, Vice-Doyen International et conseiller de la Rectrice ne m'offre malheureusement pas actuellement beaucoup de temps pour ces questions.

3. Evaluation des apprentissages

L'évaluation des étudiants est précisée plus loin dans chaque fiche de cours (section 7 : annexes). On se concentre ici sur le retour des étudiants quant aux enseignements (en particulier le cours de mécanique rationnelle), qui se fait par quatre canaux. On illustre pour deux d'entre eux les conclusions qui en ont été tirées pour améliorer l'enseignement.

- ✓ La prise d'avis pédagogiques ;
En 2022 par exemple, le retour d'avis pédagogiques a conduit à une réflexion approfondie et à une rencontre avec les étudiants, qui a conduit au renforcement d'activités de modélisation et de pratique expérimentale. On donne ci-après le compte rendu de cette rencontre du 21 avril 2022.

Suite à ces changements intervenus au Q1 2022-2023, les derniers avis pédagogiques 2022-2023 sont excellents.

MECA-H-200 (16719) ■ ■ ■ ■ ✓

Mécanique rationnelle II

Compte-rendu du jeudi 21 avril 2022

Discussion sur le cours de mécanique rationnelle MECA-H200

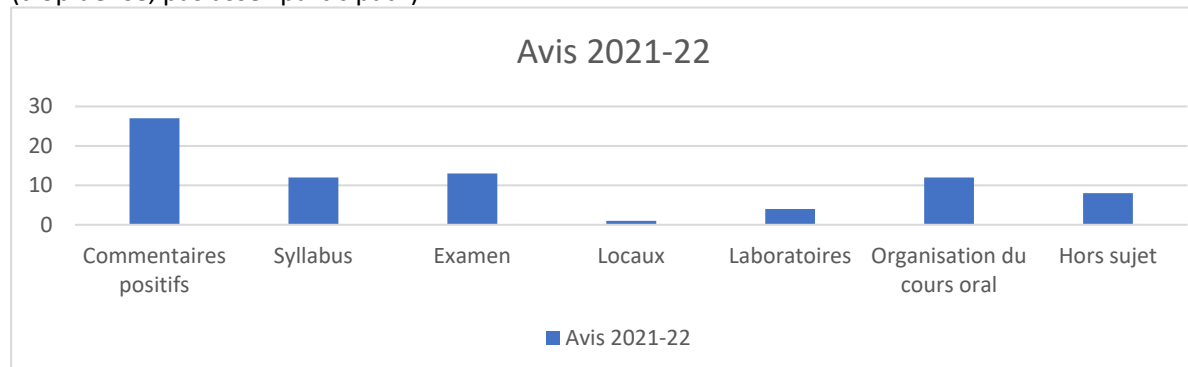
Présents: Pierre Lambert, Clément Rigaut, Sami Abdul Sater, Numa Deville et Lara Gueulette

1. Présentation des remarques et problèmes

Les avis pédagogiques 2021-22 concluent comme suit :

- Conception de l'enseignement : particulièrement positif
- Déroulement des séances : positif
- Examen : problématique

Les commentaires émis à travers la prise d'avis pédagogiques peuvent être regroupés comme indiqué ci-dessous. A côté des commentaires positifs, les remarques portent principalement sur le **syllabus d'exercices, l'organisation de l'examen, l'organisation des laboratoires et le cours oral** (trop dense, pas assez participatif).



La rencontre du jeudi 21 avril avec les délégués étudiants (Sami Abdul Sater, Numa Deville et Lara Gueulette) permet de compléter le point de vue des étudiants, en y ajoutant aussi le retour

d'étudiants des années supérieures (MA1, MA2). Ces commentaires se regroupent comme suit : importance (excessive) des **démonstrations mathématique** dans le cours oral, proposition d'**intégrer plus d'expériences dans le cours oral**, organisation de **l'enseignement sur le chaos**, difficulté de **l'intuition** et du lien entre la théorie et les exercices. D'autres commentaires sont émis, un peu plus contradictoires (la section physique regrette qu'on n'enseigne pas Hamilton, ou que Lagrange ne soit pas enseigné avec plus de rigueur, ou la filière de construction regrette qu'on n'enseigne pas les tenseurs avec plus de détails, mais d'autres sections trouvent qu'on en fait déjà trop), ou plus organisationnels (certains groupes ont le laboratoire avant la théorie, il est aussi question de la divergence de certaines notations entre BA1 et BA2). Globalement, les étudiants perçoivent bien les deux **catégories de matière** :

- Chapitres essentiels, surtout pour les filières de mécanique, physique et CC : inertie, cinématique, inertie, TG, Lagrange (nécessitant les travaux virtuels) ;
- Chapitre optionnels, mais intéressant pour la culture générale: chocs, gyroscopes, problèmes particuliers de la dynamique, chaos, lois de Kepler
- Avis partagés: masse variable, résolution numérique d'équations

2. Explications et propositions.

- **Syllabus d'exercices**

Les étudiants déplorent la présence d'erreurs dans le syllabus d'exercices. Ce syllabus a été entièrement réécrit pour cette année, présentant les corrigés de façon beaucoup plus complète que par le passé. Pour sa première édition, il n'échappe en effet pas à de (trop) nombreuses coquilles qui seront facilement corrigées.

- **Examen de janvier 2022**

Les étudiants ont été surpris que la durée réservée à l'examen inclue aussi la préparation et le ramassage des copies, mais il en est comme cela chaque année (hors covid et examens en ligne) : on compte donc 3h30 d'examen quand on prépare les questions. Les copies ont été placées sur les tables et l'examen a débuté vers 8h20, et les copies ramassées vers 11h50 voire 12h00 quand on s'est rendu compte qu'aucun examen de suivait immédiatement dans les locaux. Nous reconnaissons l'erreur de communication au début, puisqu'on a annoncé une durée de 4h et une fin à 12h20, mais cette erreur a été corrigée avant 8h30 dans chaque auditoire, et de nombreux rappels ont été faits annonçant le temps restant. Il a été répondu aux délégués à ce sujet le lendemain de leur message reçu le 25 janvier. On a également répondu dans ce message à la critique suivant laquelle des informations décisives auraient été données dans certains auditoires seulement : ce n'est pas comme cela que les assistants ont perçu les choses, se bornant à reprendre les éléments de l'énoncé en ce qui concerne la question des poulies et de la corde. Concernant les visites de copie, on a mis en œuvre une suggestion d'un ancien avis pédagogique, et les étudiants ont été admis par tranches horaires. Les six correcteurs ont pris le temps (plus de 3h) pour répondre individuellement à toutes les questions. Les grilles de correction ont été expliquées. La suggestion de mettre à disposition les questions des années précédentes revient souvent, mais ces questions sont disponibles sur l'UV.

- **Améliorer l'intuition, modélisation, lien entre théorie et exercices**

Nous partageons le constat des difficultés récurrentes pour modéliser le problème, et choisir la bonne méthode de résolution. Par modélisation nous entendons la capacité à se représenter une réalité mécanique tirée de la vie quotidienne, et à la traduire successivement en énoncé, diagramme du corps libre et système d'équations.

On va dégager du temps d'enseignement pour améliorer cela, par exemple à travers de nouveaux exercices visant la rédaction d'un énoncé par les étudiants, la discussion au cours des hypothèses à poser, l'observation sous la forme de manipulations expérimentales faites au cours.

On va rappeler explicitement aux étudiants qu'ils peuvent développer leur intuition quant au choix de la méthode de résolution en résolvant systématiquement les problèmes de dynamique par plusieurs méthodes (TG, Lagrange, équations de bilan quand c'est possible).

- **Rendre le cours plus participatif**

On va renforcer les mécanismes existants (résolution d'exercices au cours incluant interactions professeur-étudiants) en proposant de faire une ou deux expériences non pas seulement à titre d'illustration comme on le fait déjà (pendule de Foucault, disque d'Euler, inertie et effet gyroscopique avec des roues de vélos, chocs et conservation du moment cinétique, pendules roulants, diffusion de films haute cadence pour la présentation des chocs et des systèmes à masse variable), mais sous la forme d'une activité de laboratoire en grand auditorium. Les modalités pratiques ne sont pas encore prêtes, on doit y réfléchir.

En outre, on va aussi proposer un dispositif de participation des étudiants, qui viendront présenter des exercices au tableau, ou qui seront invités à répondre aux questions de leurs condisciples.

- **Présenter plus d'applications**

Outre les différentes applications distillées dans le cours existant (problèmes de cinématique, fusées, moteurs, billard, golf, stockage d'énergie, montres mécaniques, mécanismes divers...), on va profiter de l'initiative facultaire ciblant les questions de transition énergétique pour présenter le stockage d'énergie sous forme cinétique (volants d'inertie) et gravitaire (énergie des marées, masses plongées dans des puits de mine).

- **Alléger un peu le cours**

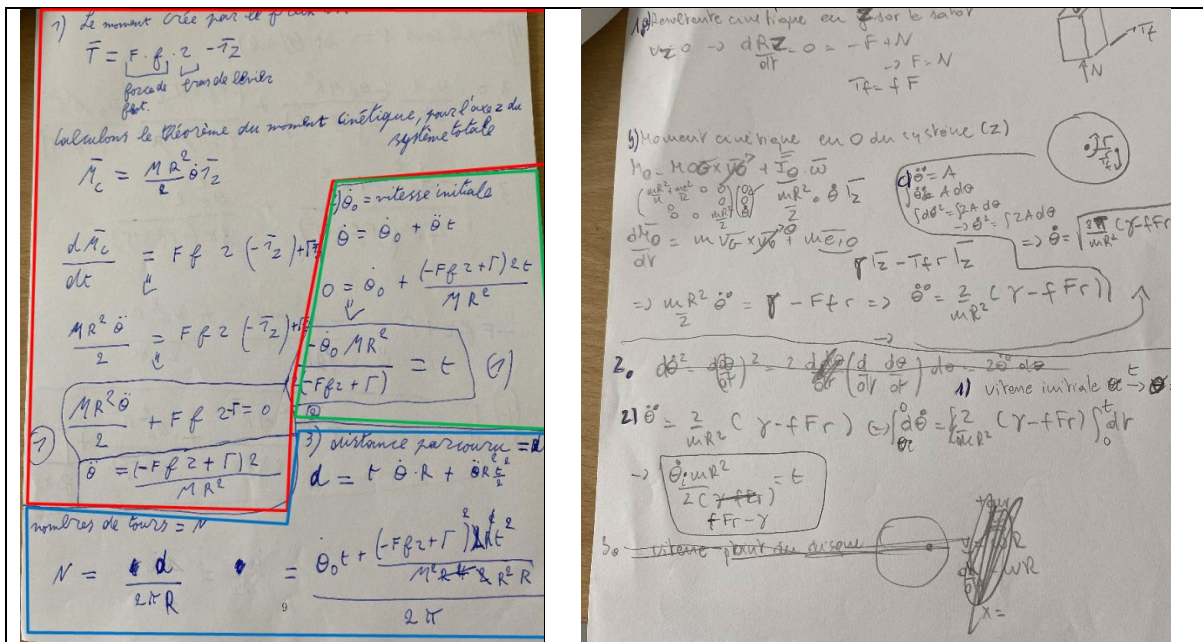
Le cours est dense en effet. On va bien entendu conserver les chapitres essentiels (cinématique, inertie, grandeurs cinétiques, TG, Lagrange, masses variables). Les matières optionnelles (Hamilton, chocs, lois de Kepler, résolution numérique d'équations, chaos, bases et roulantes, gyroscopes) ne sont déjà plus toutes enseignées chaque année, puisqu'on n'en présente qu'un échantillon (chocs, Kepler, chaos pour l'année 2021-22). Le temps nécessaire pour introduire les initiatives proposées ci-dessus sera gagné en en réduisant ou supprimant (par ordre de priorité) l'enseignement des bases et roulantes, des gyroscopes chocs, du chaos, et en allégeant quand c'est possible la présentation de certaines démonstrations⁶.

Notons quand même pour mémoire que ces matières méritent d'être abordées, étant donné qu'elles contiennent la plupart des applications ou des curiosités également susceptibles de motiver les étudiants.

- ✓ Deuxièmement, 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 ;

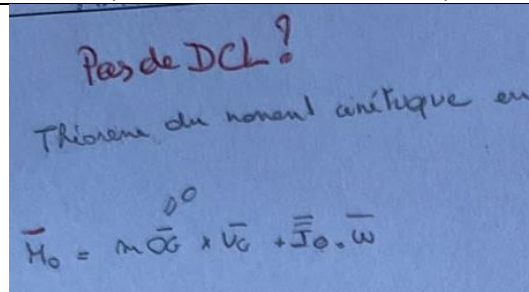
⁶ A ce sujet, il n'est pas clair de savoir ce qui est pointé par les étudiants : la lourdeur des démonstrations mathématiques ou la grande quantité de concepts théoriques enseignés au pas de course en seulement six semaines : cinématique, travaux virtuels, inertie, grandeurs cinétiques. Ce sont là les prérequis incontournables pour l'enseignement de la dynamique (TG, Lagrange, équations de bilan) dans l'espace à 3 dimensions

- ✓ 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... ;
- ✓ L'analyse serrée des erreurs commises par les étudiants lors des examens. Je donne en exemple ci-dessous l'analyse de quelques erreurs relevées lors de l'examen d'août 2023 en mécanique rationnelle : manque de structuration de la réponse, manque de soin, manque de méthode, erreurs de dimension ou de notation, erreur d'analyse, absence de réponse...

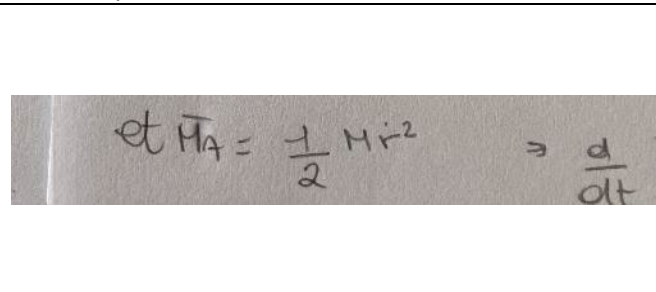


(a) Manque de structuration de la réponse

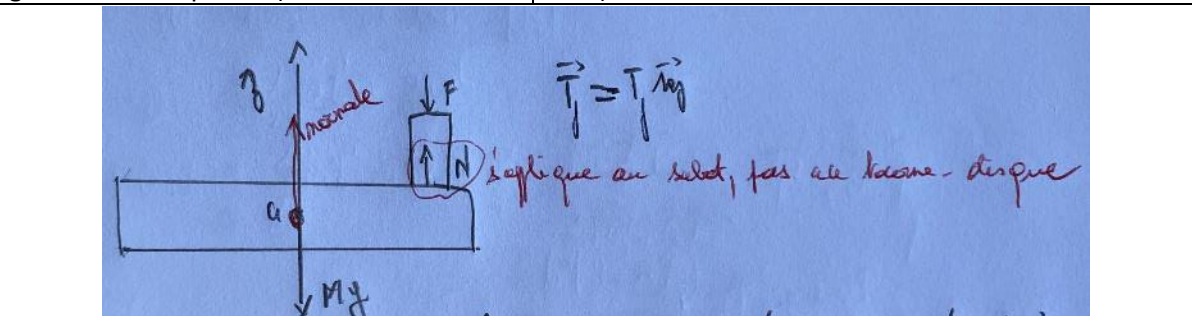
(b) Manque de soin



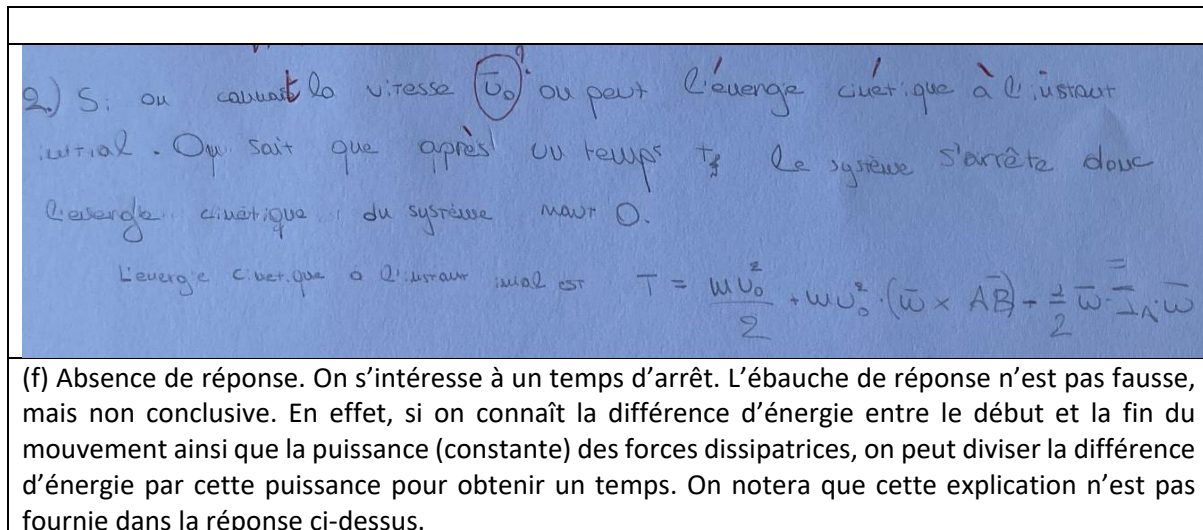
(c) Manque de méthode (pas de diagramme du corps libre)



(d) Erreurs de dimension et de notation (vecteur/scalaire)



(e) Erreur d'analyse dans le diagramme du corps libre : N est la force entre la platine et le sabot, c'est donc une force interne qui ne doit pas être représentée. Si on indique le poids de la platine Mg, il faut alors aussi ajouter les forces de liaison, dont une force verticale dirigée vers le haut empêchant l'ensemble de tomber



(f) Absence de réponse. On s'intéresse à un temps d'arrêt. L'ébauche de réponse n'est pas fausse, mais non conclusive. En effet, si on connaît la différence d'énergie entre le début et la fin du mouvement ainsi que la puissance (constante) des forces dissipatrices, on peut diviser la différence d'énergie par cette puissance pour obtenir un temps. On notera que cette explication n'est pas fournie dans la réponse ci-dessus.

Figure 16 : erreurs typiques relevées lors de l'examen d'août 2023

A travers ces quelques erreurs typiques émerge une première tendance : de nombreux éléments prérequis ne sont manifestement pas maîtrisés, que ce soit en termes de compétences sans rapport avec la mécanique rationnelle comme la rédaction d'une réponse ou des éléments de base supposés acquis à l'issue de la première année (dimensions, diagramme du corps libre...). On a donc précisé en introduction du syllabus une série d'erreurs qualifiées de péchés capitaux (erreurs de dimension, confusion entre scalaire et vecteur, confusion entre quantité entière et quantité infinitésimale) ainsi qu'un rappel étendu sur l'établissement d'un diagramme du corps libre.

On présentera à la section 5 une deuxième tendance : la persistance d'erreurs appelées préconceptions.

L'ensemble de ces erreurs classiques peut être mis à profit, leur caractère prévisible permettant de concevoir des tests en ligne avec correction automatique et suggestion très probable de la source d'erreur.

4. Gestion d'une équipe pédagogique

L'essentiel de la gestion d'équipe se déroule dans l'encadrement du cours de mécanique rationnelle.

Dès ma thèse comme assistant, j'ai dû gérer une équipe pédagogique de plusieurs chargés d'exercices dans le cadre du cours de mécanique rationnelle MECA-H100 : confection des horaires, organisation de la communication et la circulation des énoncés et corrigés d'exercice dans l'équipe, motivation de mes collègues pour les entraîner dans un séminaire de mécanique appliquée illustrant le rôle du frottement dans les machines (ponceuses, frein divers, coins et cales...), déjà sans doute l'idée de montrer des applications, complément pratique indispensable à l'édifice théorique de la mécanique rationnelle qui dans le cas du frottement se résume quasiment à $F=f_0N$). Je n'ai compris que quand je suis devenu Professeur moi-même que si j'en avais assuré la gestion, je n'en avais néanmoins pas la responsabilité : aujourd'hui, quand les étudiants sont mécontents, c'est à moi qu'ils s'adressent !

Le démarrage du cours de MECA-H200 a été un peu différent : équipe non choisie, assistants en début de mandat encore peu à l'aise avec la matière et sans réflexe organisationnel. J'ai passé le temps nécessaire pour les épauler. Aujourd'hui, la situation a bien évolué: deux de mes chargés d'exercices sont d'anciens doctorants (disons que nous avons mutuellement choisi de poursuivre la collaboration sous une autre forme), l'assistant principal et un des chercheurs impliqués préparent également leur thèse avec moi. Le dernier membre de l'équipe est en poste depuis longtemps. Je m'implique dans la rédaction et les corrections des questions d'examen, je visite régulièrement les salles de TP et de labo, mais je n'assure plus moi-même l'encadrement des séances (je l'ai fait les premières années du cours). Les routines bien rôdées de l'équipe et la confiance mutuelle allègent considérablement la charge quotidienne de chacun. J'attache beaucoup d'importance à cette bonne entente, donnant à chacun le maximum de souplesse dans l'organisation de ses horaires : il n'est pas rare que les assistants se remplacent l'un l'autre en cas de besoin.

La question du quotidien étant réglée, nous avons ainsi pu nous atteler tous ensemble à deux chantiers de rénovation du cours de mécanique MECA-H200 : rédaction complète d'un nouveau syllabus d'exercices avec ses corrigés (265 pages latex⁷) et développement de nouvelles expériences pour les activités de laboratoire, documentées dans un nouveau syllabus de laboratoire. J'ai été à l'initiative de beaucoup d'idées de départ, mais les contributions de chacun ont transformé l'exercice en un résultat très collectif.

Il est très important à mes yeux d'également inclure Hervé Baudine dans l'équipe, le technicien du labo. Nous avons eu ensemble de très nombreux échanges, typiques d'un processus de conception bien compris. Les démonstrateurs du cours sont ainsi le fruit non seulement de ses talents de fabrication (travail du bois et du métal), mais aussi le résultat de son analyse de mon besoin et de ses précieuses suggestions.

Bref, l'équipe tourne bien, la communication est fluide et l'organisation assez informelle et efficace, appréciée des étudiants (évaluations particulièrement positives de quatre d'entre nous, et positive pour le dernier).

⁷ Syllabus d'exercices accessible à l'adresse https://universitelibrebruxelles-my.sharepoint.com/:b:/r/personal/pierre_lambert_ulb_be/Documents/Cours%20partag%C3%A9s/meca-h200/meca_h_200_tps_2023-2024.pdf?csf=1&web=1&e=8Yeq4J

5. Développement professionnel

- **Activités pédagogiques hors cours ULB**

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), premier assistant (2007-2014), chargé de cours (2014-2018) et enfin professeur (depuis 2018).

Hors cours universitaire, notons également les activités de professeur de physique et mathématique qui, si je ne les ai exercées qu'une année (1999-2000), m'ont conduit devant 14 classes de 4 écoles dans 3 systèmes d'enseignement (général, technique et artistique). J'y ai donc acquis sur le tas un aperçu assez correct de l'hétérogénéité des niveaux !

Depuis mon retour comme assistant, j'ai assuré les permanences hebdomadaires du cours de mécanique (2000-2005), l'animation d'ateliers printemps des sciences et jeune ingénieur (2011-2012), la vulgarisation de la lévitation acoustique 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, l'animation d'un cours à l'Université des enfants (comment tourne la Terre ?).

Les dispositifs expérimentaux développés récemment pour le cours de mécanique l'ont été avec l'idée qu'ils puissent être transportés et présentés facilement. Je manque malheureusement de temps pour y consacrer l'énergie que je voudrais, et notamment la concrétisation d'un projet remontant à ma période d'enseignant de 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.

Puisqu'il faut fixer des priorités, **l'enseignement des activités expérimentales me paraît prioritaire.**

- **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, introduction à la dynamique de groupe dans une situation d'apprentissage en équipe, séminaire sur les difficultés d'apprentissage des étudiants, séminaire sur les formes d'apprentissage, Compilatio, un outil de détection du plagiat. J'ai également pris part activement comme formateur au cycle de formation « Des outils et des profs », pendant l'année 2005-2006.

De nombreuses lectures ont nourri ma réflexion pédagogique^{8,9} et didactique, notamment une liste bibliographique fournie en annexe, ainsi que des lectures sur les liens entre créativité et ingénierie.

⁸ Richard Prigent, L'encadrement des travaux de mémoire et de thèse : conseils pédagogiques aux directeurs de recherche

⁹ 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

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, musée d'histoire des sciences à Florence, Miraikan – musée des sciences émergentes et de l'innovation – à Tokyo), 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 est 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 en 2013 a été l'occasion de lire l'ouvrage de Pasi Sahlberg (<http://pasisahlberg.com/>): Finnish lessons, sur le système d'enseignement finlandais¹⁰.

Plus récemment, j'ai consulté le BAPP qui m'a orienté vers l'approche-programme¹¹ et le design pédagogique¹².

- **Recherches à caractère didactique**¹³

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. L'ensemble de ces travaux ont été publiés à la conférence de pédagogie universitaire AIPU en 2007¹⁴. Étudiées 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'idée¹⁵ 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

¹⁰ <http://pasisahlberg.com/finnish-lessons/about-finnish-lessons/>

¹¹ Richard Prégent, Huguette Bernard, Anastasis Kozanitis, Enseigner à l'université dans une approche programme, Presses internationales Polytechnique (2011)

¹² Jacques Lanarès, Marc Laperrouza et Emmanuel Sylvestre, Design pédagogique, Presses EPFL, <https://www.epflpress.org/produit/1427/9782889155408/design-pedagogique>

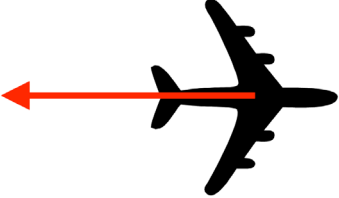
¹³ La didactique s'intéresse à la transmission des savoirs, au niveau, représentations et difficultés des élèves, aux obstacles d'observation d'un monde complexe. La pédagogie relève elle plus de l'organisation de la classe et des relations entre les élèves d'une part, des relations entre l'enseignant et élèves d'autre part. Je m'intéresse donc plus ici à la didactique qu'à la pédagogie.

¹⁴ 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

¹⁵ 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

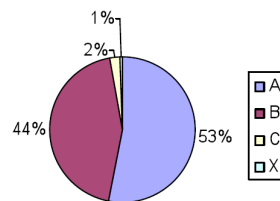
moment de force et de frottement. Elles sont accessibles sous la forme d'une évaluation en ligne, sur le site université virtuelle du cours MECA-H-200.

Dans la question ci-dessous, un étudiant qui indique une force de poussée supérieure à la force de frottement oublie probablement le principe de mouvement inertiel (MRU). Un test d'auto-évaluation peut donc lui proposer une réponse et une explication sur mesure.



La composante horizontale de la poussée des réacteurs est (en norme) :

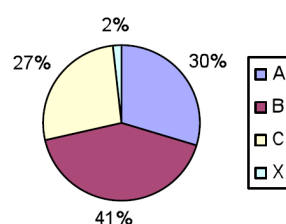
- A. Plus grande que la force de frottement
- B. Egale à la force de frottement
- C. Plus petite que la force de frottement
- D. Je ne sais pas



La deuxième illustration ci-après révèle l'influence malheureuse de l'enseignement des moments de force à l'école. A force de ne calculer l'équilibre de rotation du fléau de la balance qu'en son pivot, les étudiants répondent que l'équilibre de rotation ne peut s'écrire qu'en un point du solide se trouvant sur une articulation.

Lorsqu'on utilise les théorèmes généraux pour calculer l'équilibre d'un solide, l'équilibre de rotation s'écrit :

- en n'importe quel point, qu'il appartienne ou non au solide
- en n'importe quel point du solide
- en un point du solide se trouvant sur une articulation
- je ne sais pas



La bonne réponse (le moment peut se calculer en n'importe quel point) n'est choisie que par 30% des étudiants (!) et, plus inquiétant, 27% pensent qu'un moment ne peut se calculer qu'en une articulation. L'explication avancée réside dans la présentation classique du calcul de moment faite à l'école, dans laquelle on présente généralement le moment à partir d'une balance romaine aux bras de laquelle on suspend des masselotes. Pour éviter de parler de la force de liaison entre le bras et la potence, on propose le calcul au point d'articulation.

On voit donc que la bonne connaissance des erreurs classiques (y compris les préconceptions) permet de proposer des tests d'auto-évaluation aux étudiants, incluant des suggestions de révision automatiques. De manière indépendante, cette approche a été suivie par des chercheurs en éducation¹⁶.

¹⁶ Nicolas Coppens, Le suivi des conceptions des lycéens en mécanique : développement et usages d'exercices informatisés. Education. Université Paris-Diderot - Paris VII, 2007

6. Implication en termes de responsabilité de gestion liée à l'enseignement

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

- ✓ **A l'international** : 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** : membre de la commission pédagogique depuis 2015, groupe de travail sur la réforme de l'avis pédagogique (2003, Doyen Raymond Hanus), contribution à l'élaboration du référentiel de compétences de l'EPB, visites d'école et soirées métiers (ARU2), représentation aux salons étudiants (Tour et Taxi, Namur), secrétaire adjoint à la mobilité de 2017 à 2022 (je « coordinateur erasmus »)
- ✓ **Au niveau des filières** : membre des filières de tronc commun (et coordinateur pédagogique de cette filière en 2006-2007), d'ingénierie électromécanique et d'ingénierie biomed ;
- ✓ **Au niveau du service** : 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 (3AEX, 1ASS et 1 chercheur)

7. Annexes

- Plan du cours de mécanique appliquée (statique pour architectes à Horta)

Le plan du cours de mécanique appliquée présente l'articulation et la progression des concepts (Figure 17), 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.

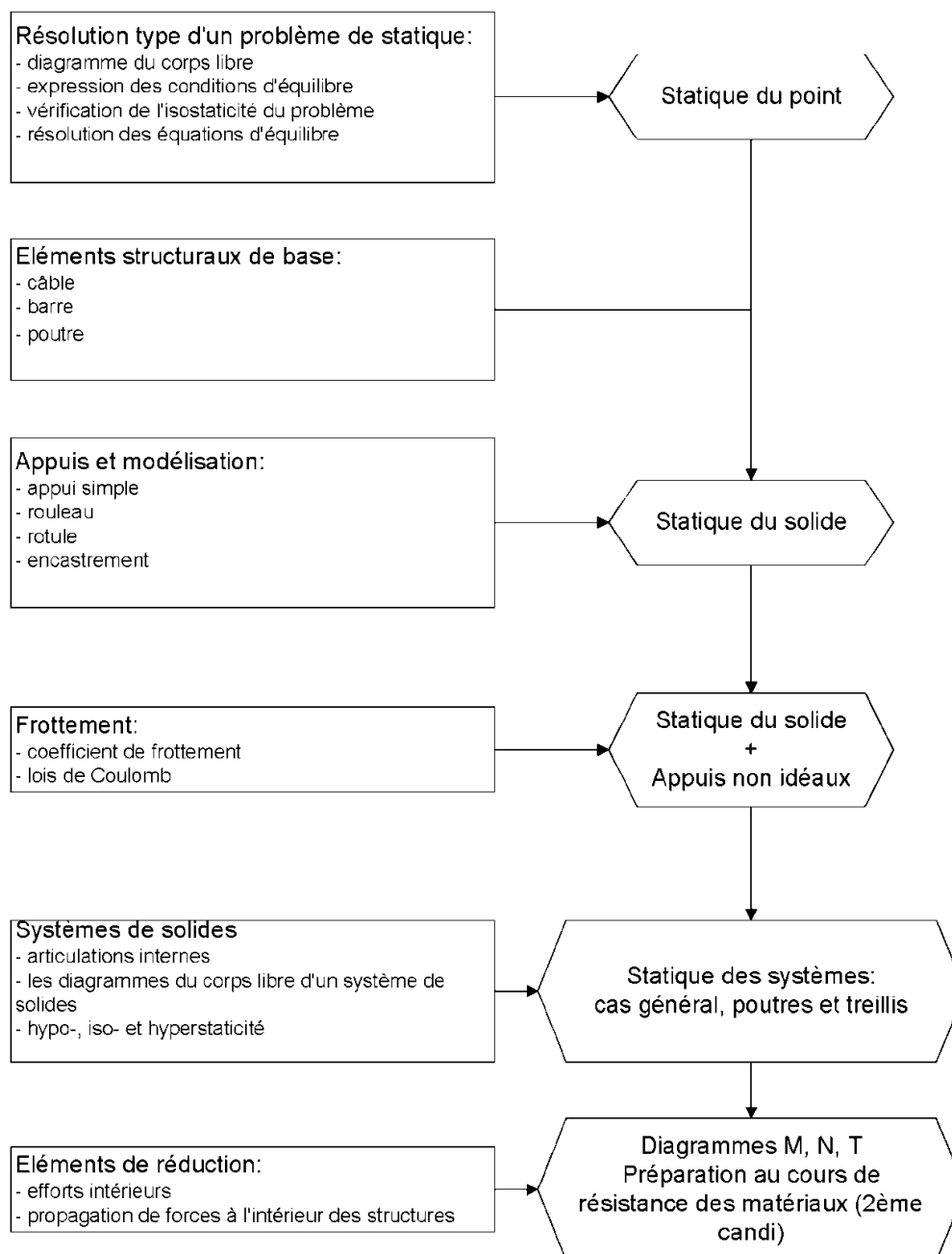


Figure 17 : Articulation des concepts dans le cours de mécanique appliquée pour architectes

- [Fiche du cours de mécanique rationnelle MECA-H200¹⁷](#)

- ✓ Contenu

Contenu de base - Cinématique du solide dans le plan et dans l'espace. Travaux virtuels. Moments, produits et tenseurs d'inertie. Cinétique du solide et théorèmes généraux. Equations de Lagrange. Dynamique des systèmes de solides. Systèmes à masse variable. Résolution numérique d'équations du mouvement.

Contenu optionnel (dépend des années) - Théorie hamiltonnienne. Principes variationnels. Lois de Kepler. Chocs dans les systèmes de solides. Chaos

- ✓ Objectifs

Développer la dynamique du solide et des systèmes. Etablir le nombre de degrés de libertés d'un système. Etablir les équations d'un système de solides. Calculer les réactions de liaison. Résoudre numériquement une équation différentielle ordinaire d'ordre 2.

- ✓ Pré-requis, co-requis

Le cours s'appuie sur les cours d'algèbre, d'analyse, d'introduction aux sciences de l'ingénieur, de mécanique rationnelle I (statique des systèmes, dynamique du point), de physique générale et d'informatique.

En particulier, on considère comme acquis l'établissement d'un diagramme du corps libre, les dérivées partielles et totale d'une fonction de plusieurs variables, l'écriture des équations d'équilibre et la résolution d'équations différentielles, notamment l'oscillateur harmonique.

- ✓ Méthodes d'enseignement et activités d'apprentissages

Cours théorique ex-cathedra, séances d'exercices en petits groupes, laboratoires obligatoires, permanences de réponses aux questions

Le cours contribue au profil d'enseignement en adoptant une démarche scientifique appliquée alliant rigueur et créativité : élaborer un raisonnement scientifique structuré en mettant en œuvre les langages et les outils propres aux sciences et sciences de l'ingénieur.

Ouvrage de références: syllabus du cours "Mécanique rationnelle II" et ses références

Les supports de cours disponibles sont les syllabus de cours, exercices et laboratoires imprimés aux PUB et leurs compléments numériques sur l'Université Virtuelle

- ✓ Evaluation

Examen écrit en janvier (exercices et théorie vus aux cours, TP, labos) et pénalité de -1pt sur 20 en cas d'absence de participation aux labos (pour inciter à la participation).

L'examen, écrit, consiste principalement en des questions ouvertes ou problèmes de mécanique, qui balaient le cours avec une question de cinématique, une question de théorèmes généraux et une question portant sur la méthode de Lagrange, complétées selon les années par une question supplémentaire sur un des autres chapitres du cours. Il n'y a pas d'évaluation de la mémorisation : on fournit un formulaire reprenant l'ensemble des formules et théorèmes du cours. Dans l'évaluation, on cote les grandes étapes : analyse du problème et diagramme du corps libre, choix et implémentation de la méthode de résolution (choix des théorèmes de dynamique, choix des coordonnées généralisées et des équations de Lagrange correspondantes).

¹⁷ <https://www.ulb.be/en/programme/meca-h200>

- [Fiche du cours « Microfabrication techniques » MECA-H500¹⁸](#)

- ✓ Contenu

L'objet de ce cours est l'étude des procédés de fabrication microtechnique (microfabrication, fabrication de précision) ou de produits typiques manufacturés par ces techniques.

- Exemples de techniques: découpe jet d'eau, électro-érosion, découpe laser, sputtering, photolithographie, prototypage rapide et impression 3D, thermoformage, moulage, microfabrication du verre (femtoprint), microfabrication par polymérisation 2 photons (nanoscribe)...
- Exemples de produits: stents, nanotubes de carbones, micro-aiguilles, composants électroniques, prothèses du genou, auditive, dentaire, vis médicales...

- ✓ Objectifs

Apprendre à choisir un procédé de fabrication et à estimer les coûts de production associés pour un produit et une taille de série donnés. Ce choix sera construit sur la compréhension des principes physiques et des constituants technologiques du procédé, des règles de conception en découlant, de la comparaison avec les techniques concurrentes ainsi que sur l'évaluation des coûts de production.

- ✓ Pré-requis

Principes physiques généraux (mécanique des fluides, optique, thermique...)

- ✓ Méthodes d'enseignement et activités d'apprentissages

2 crédits de cours : séminaire ex-cathedra donnés par le professeur, séminaires présentés par les étudiants

1 crédit de « labo » : 3 visites industrielles organisées par l'équipe enseignante en Belgique.

2 crédits de travail personnel : préparation du séminaire individuel, sur base d'une visite industrielle spécialiste de la technique choisie. Ce travail personnel inclut la rédaction d'un rapport de 20 pages et une présentation orale de 20 à 30 minutes.

Le cours contribue au profil d'enseignement par l'enseignement des procédés de fabrication et le développement d'une argumentation technique et scientifique sous-tendant le choix d'une technique

Les lectures recommandées incluent la base de données des Techniques de l'ingénieur et la littérature scientifique et technique associée au procédé choisi

- ✓ Evaluation et construction de la note

Examen oral (en juin): 50%, Rapport écrit présentant une technique de fabrication: 25%, Présentation orale de la technique: 25%.

La structure de la question est annoncée à l'avance : on donne un échantillon de pièce et un petit énoncé décrivant le contexte (matière, taille de la série, cotes non mesurables sur la pièce), et on demande à l'étudiant de proposer une technique de fabrication pertinente ainsi qu'une estimation du coût de fabrication et de l'empreinte carbone pour une pièce (coût unitaire) ou pour la série (coût total). L'examen oral se fait à cours et ordinateur ouvert : l'étudiant a une heure pour préparer sa réponse, il peut accéder à internet et à ses notes de cours.

¹⁸ <https://www.ulb.be/en/programme/meca-h500>

- Fiche du cours de « soft microrobotics » MECA-H501¹⁹
- ✓ Contenu

Présentation des dernières avancées dans le domaine de la microrobotique flexible et fluïdique :

- Matériaux actifs et conception des actionneurs et mécanismes à raideur variable
- Mécanismes flexibles (fabriqués en métal par électroérosion ou en verre par usinage laser femto-seconde), utilisés pour la mesure de forces ou comme guidages de précision
- Effets de tension de surface et forces de capillarité permettant la miniaturisation de nombreuses fonctions : adhésion, manipulation, étanchéité, actionnement, auto-centrage

Présentation de deux méthodes expérimentales : lois d'échelles dans les microsystèmes (analyse dimensionnelle et lois de similitude) et méthode des plans d'expériences

- ✓ Objectifs

Familiariser l'étudiant avec la recherche scientifique: présentation de l'état de l'art, sensibilisation à la littérature scientifique, pratique de la recherche par l'application d'une partie du cours au choix dans le mémoire de fin d'études ou travail personnel sur une des questions de recherche du service

- ✓ Pré-requis, co-requis

Précédents enseignements de mécanique: mécanique rationnelle, résistance des matériaux, cinématique et dynamique des machines...

- ✓ Méthodes d'enseignement et activités d'apprentissages

24h théorie: cours théorique et séminaires basés sur la recherche actuelle

24h exercices et travail pratique: introduction au logiciel Design Expert utilisé pour les plans d'expériences, exercices sur les lois d'échelles et la capillarité, travail individuel (application d'une partie du cours au choix à votre travail de fin d'études ou à une question de recherche du service). Exemples de réalisations passées: conception d'un actionneur électrostatique, conception d'un banc de mesure de forces de capillarité, caractérisation de mélanges silicone-éthanol comme actionneurs flexibles

12h travail personnel

En adoptant une démarche scientifique appliquée alliant rigueur et créativité : élaborer un raisonnement scientifique structuré en mettant en œuvre les langages et les outils propres aux sciences et sciences de l'ingénieur.

Références et lectures recommandées

- T. Szirtes, [Applied Dimensional Analysis and Modelling](#)
- L. Howell, [Compliant mechanisms](#)
- S. Henein, [Conception des guidages flexibles](#)
- P. Lambert, [Capillary Forces in Microassembly](#)
- D. Montgomery, [Design and Analysis of Experiments](#)
- H. Koshima, [Mechanically Responsive Materials for Soft Robotics](#)

- ✓ Evaluation et construction de la note

Examen oral en juin avec préparation à cours ouvert, portant sur des questions d'exercices et sur le rapport de projet : 75%

Rapport de projet: 25%

¹⁹ <https://www.ulb.be/en/programme/meca-h501>

- Table des matières du cours de mécanique rationnelle MECA-H200

Syllabus accessible à l'adresse suivante :

https://universitelibrebruxelles-my.sharepoint.com/:b:/r/personal/pierre_lambert_ulb_be/Documents/Cours%20partag%C3%A9s/meca-h200/mecah200_2023-2024_v5_20231030.pdf?csf=1&web=1&e=iQTILg

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Positionnement entre histoire, didactique et sciences de l'ingénieur	1
1.2	Le futur de la mécanique	3
1.3	Structure du cours	4
1.3.1	Objectifs	7
1.3.2	Méthodes	7
1.3.3	Outils et concepts	7
1.3.4	Prérequis	7
1.3.5	Les erreurs inadmissibles	8
1.4	D'un professeur à l'autre...	8
2	Rappels	9
2.1	Diagramme du corps libre	9
2.2	Objets de la dynamique	13
2.3	Postulats généraux de la mécanique classique	13
2.3.1	L'espace	14
2.3.2	Le temps	14
2.3.3	Postulat des conditions initiales	14
2.3.4	Postulat de la masse	14
2.4	Lois de Newton	15
2.4.1	Première loi : loi d'inertie	15
2.4.2	Deuxième loi : loi du mouvement	15
2.4.3	Troisième loi : loi de l'action et de la réaction	16
2.4.4	Quatrième loi : superposition des forces	16
2.5	Relativité et limites de la mécanique classique	16
2.6	Changement de trièdre	18
2.7	Changement de chronologie	20

3	Cinématique du solide dans l'espace	23
3.1	Déplacement continu et déplacement instantané du corps solide	23
3.2	Champ des vitesses	24
3.2.1	Rappel sur le vecteur de Darboux : lien entre le vecteur de rotation et la dérivée des vecteurs de la base mobile	24
3.2.2	Relation cinématique des vitesses	25
3.2.3	Théorème de projection des vitesses	26
3.3	Champ des accélérations	26
3.4	Translation continue et translation instantanée	27
3.5	Rotation continue et rotation instantanée	27
3.6	Mouvement hélicoïdal	29
3.6.1	Mouvement hélicoïdal continu	29
3.6.2	Mouvement hélicoïdal instantané	29
3.6.3	Analyse du mouvement en fonction des valeurs de $k(t)$, \bar{v}_A et $\bar{\omega}$	31
3.6.4	Analogie avec les systèmes de forces - Systèmes de vecteurs glissants	32
3.6.5	Analyse du mouvement en fonction de la valeur de l'invariant scalaire $\bar{\omega} \cdot \bar{v}_A$	33
3.7	Composition de mouvements instantanés	33
3.7.1	Cas particuliers	34
3.7.2	Cas général	35
3.8	Angles d'Euler	37
3.9	Exemple	39
4	Mouvements parallèles à un plan	41
4.1	Définitions	41
4.2	Centre instantané de rotation (C.I.R.)	41
4.3	Détermination des champs des vitesses	43
4.3.1	Si deux points A et B sont fixes, à l'instant t , tous les points sont fixes à cet instant	43
4.3.2	Si deux points A et B ont des vitesses équipollentes, différentes de zéro, à l'instant t , tous les points ont la même vitesse à cet instant	44
4.3.3	Si un point I est fixe et un autre A a une vitesse différente de zéro	44
4.3.4	Si deux points A et B ont des vitesses données différentes et non nulles	44
4.4	Détermination du centre instantané de rotation	45
4.4.1	Détermination graphique du C.I.R.	45
4.4.2	Détermination analytique du C.I.R.	50

4.5	Détermination graphique des vecteurs vitesses	50
4.5.1	Détermination de la vitesse en B	50
4.5.2	Vitesse en un point quelconque	50
4.6	Base et roulante	52
5	Travaux virtuels	55
5.1	Coordonnées généralisées et contraintes	55
5.2	Travaux virtuels et positions d'équilibre	58
5.2.1	Idée générale	58
5.2.2	Enoncé de la méthode des travaux virtuels	59
5.3	Travaux virtuels et des théorèmes généraux	63
5.3.1	Travail virtuel des forces intérieures	63
5.3.2	Travail virtuel des forces extérieures	64
5.4	Travaux virtuels appliqués aux solides	64
5.4.1	Position d'équilibre	64
5.4.2	Travail des liaisons	67
5.4.3	Plus de coordonnées généralisées que de degrés de liberté	68
5.5	Travaux virtuels dans les systèmes de solides	69
5.5.1	Exemple du double pendule	69
5.5.2	Exemple du système bielle-manivelle	72
5.6	Formalisation de la méthode des travaux virtuels	74
5.6.1	Enoncé général	74
5.6.2	Multiplicateurs de Lagrange	74
5.6.3	Exemples d'application des multiplicateurs de Lagrange	76
5.6.4	Qualification des contraintes	77
5.6.5	Exemples de contraintes non-holonomes	77
5.7	Exercices	79
5.7.1	Travaux virtuels	79
5.7.2	Classification des contraintes	85
6	Moments et produits d'inertie	89
6.1	Introduction	89
6.1.1	Exemple 1 : travail des forces d'entraînement	89
6.1.2	Exemple historique du pendule d'Huygens (1673)	91
6.2	Moments du second ordre	92
6.3	Tenseur d'inertie	93
6.3.1	Introduction	93
6.3.2	Définition du tenseur d'inertie	96
6.4	Tenseur d'inertie et rotation des axes du repère	97
6.4.1	Retour à l'énergie cinétique	97
6.4.2	Exemple	98

6.5	Axes principaux	99
6.5.1	Axes principaux	99
6.5.2	Ellipsoïde d'inertie	99
6.6	Théorème de Steiner	99
6.7	Exercices	101
6.7.1	Rectangle homogène de côtés a, b	101
6.7.2	Cercle homogène de rayon R	101
6.7.3	Couronne circulaire de rayon extérieur R_1 et de rayon intérieur R_2	102
6.7.4	Prisme	102
6.7.5	Cylindre droit	102
6.7.6	Tore	102
6.7.7	Détermination expérimentale du moment d'inertie . . .	103
6.7.8	Inertie d'une forme plane à partir de son contour . . .	103
7	Cinétique	105
7.1	Généralités	105
7.2	Définition des grandeurs fondamentales	106
7.2.1	Résultante cinétique	107
7.2.2	Moment cinétique	107
7.2.3	Energie cinétique	108
7.3	Calcul du moment cinétique d'un solide	109
7.3.1	Démonstration de la formule du moment cinétique . . .	109
7.3.2	Moment cinétique autour d'une axe fixe	110
7.3.3	Moment cinétique autour d'un point fixe	111
7.3.4	Moment cinétique d'un solide en son centre de masse .	111
7.4	Calcul de l'énergie cinétique d'un solide	111
7.4.1	Démonstration de la formule de l'énergie cinétique . . .	111
7.4.2	Solide en mouvement quelconque	112
7.4.3	Solide en rotation autour d'un axe fixe d	113
7.4.4	Solide en rotation autour d'un point fixe	113
7.4.5	Application au stockage d'énergie	113
8	Théorèmes généraux	119
8.1	Introduction	119
8.1.1	Les méthodes de la mécanique classique	119
8.1.2	Le diagramme du corps libre	121
8.2	Théorème de la résultante cinétique	121
8.2.1	Exemple de la barre par le théorème de la résultante cinétique	122
8.3	Théorème du moment cinétique	123

8.4	Théorème du moment cinétique : cas du solide	124
8.4.1	Théorème du moment cinétique exprimé au centre de masse	124
8.4.2	Exemple de la barre par le théorème de la résultante cinétique	124
8.4.3	Equations d'Euler	125
8.5	Théorème de l'énergie cinétique	126
8.6	Théorème de l'énergie cinétique : cas du solide	127
8.6.1	Exemple de la barre par le théorème de l'énergie cinétique	128
9	Méthode des équations de Lagrange	129
9.1	Rappels sur les déplacements et les travaux virtuels	129
9.2	Application de la méthode des travaux virtuels	131
9.3	Equations de Lagrange	133
9.3.1	Equations de Lagrange quand les forces ne dérivent pas d'un potentiel (1ère forme)	133
9.3.2	Equations de Lagrange quand les forces dérivent d'un potentiel (2ème forme)	134
9.3.3	Variables cachées ou cycliques	135
9.3.4	Exemple du pendule sphérique	135
9.4	Multiplicateurs de Lagrange	138
9.4.1	Contraintes holonomes	138
9.4.2	Contraintes non-holonomes	139
9.4.3	Contraintes dépendant du temps	139
9.5	Réactions de liaison par la méthode de Lagrange	141
9.6	Analogie avec les circuits électriques	144
10	Théorie hamiltonienne	147
10.1	Equations de Hamilton	147
10.2	Potentiel $V(x, y, z)$	148
11	Dynamique du solide	151
11.1	Introduction : cas étudiés	151
11.2	Mouvement d'un solide autour d'un axe fixe	152
11.2.1	Théorie générale	152
11.2.2	Application à un solide pesant	155
11.3	Mouvement d'un solide autour d'un point fixe	158
11.3.1	Théorème de la résultante cinétique	158
11.3.2	Théorème du moment cinétique en un point fixe	159
11.3.3	Théorème de l'énergie	159

11.3.4	Cas particulier 1 : mouvement d'un solide autour de son centre de masse	160
11.3.5	Cas particulier 2 : Moment des forces extérieures nul au point fixe (cas d'Euler - Poincaré)	160
11.3.6	Cas particulier 3 : problème de Lagrange-Poisson	161
11.3.7	Cas particulier 4 : problème de Sofia Kovalevskaya	164
11.3.8	Gyrostats	164
11.3.9	Gyroscopes	166
11.3.10	Balance gyrostatique	167
11.4	Planimètre à hachette de Prytz	168
11.4.1	Introduction	168
11.4.2	Contrainte cinématique du planimètre de Prytz	169
11.4.3	Résolution par les théorèmes généraux	169
11.4.4	Utilisation des multiplicateurs	170
11.5	Théorie du cerceau - Disque d'Euler	171
11.5.1	Introduction	171
11.5.2	Préparation de la résolution : clarification des systèmes d'axes	171
11.5.3	Etude cinématique	174
11.5.4	Résolution avec multiplicateurs	174
11.5.5	Cas particuliers du mouvement du cerceau	175
11.6	Cylindre roulant sur une rampe courbe	176
11.7	Billard d'Anaïs	176
11.8	Dilemme du golfeur	177
11.9	Toupie culbuto (ou "tippe top")	177
11.10	Anagyre	177
12	Dynamique des systèmes de solides	179
12.1	Généralités	179
12.2	Cas du double pendule ou pendule composé	180
12.2.1	Méthode vectorielle ou synthétique : théorèmes généraux	180
12.2.2	Méthode analytique : équations de Lagrange	182
12.3	Cas du système à trois barres	183
13	Systèmes à masse variable	187
13.1	Introduction	187
13.2	Bilan de quantité de mouvement	189
13.3	Exemples	190
13.3.1	Exemple du câble	190
13.3.2	Exemple du convoyeur	190
13.3.3	Particule à masse relativiste	191

13.3.4	Mouvement ascensionnel d'une fusée	193
13.3.5	Goutte d'eau tombant dans une atmosphère saturée . .	196
13.4	Application du bilan de quantité de mouvement à la théorie des chocs	197
13.4.1	Choc élastique	197
13.4.2	Choc mou	198
13.5	Systèmes fermés dépendant du temps	199
13.5.1	Rappel sur le théorème de la résultante cinétique . . .	199
13.5.2	Théorème de transport de Reynolds	199
13.5.3	Formule de Leibnitz	200
13.5.4	Dérivée de la position du centre de masse	201
13.6	Théorème du moment cinétique dans un système ouvert . . .	201
13.7	Théorème de l'énergie cinétique dans un système ouvert . . .	202
13.8	Exercices	202
14	Chocs	205
14.1	Introduction	205
14.2	Percussion : les ingrédients manquants	205
14.2.1	Modèle de rebond sur un ressort linéaire	206
14.2.2	Modèle de rebond sur un ressort avec dissipation d'éner- gie	208
14.2.3	Modèle de rebond d'une bille sur un plan : modèle de Hertz	209
14.2.4	Observations	210
14.3	Théorèmes généraux	211
14.3.1	Théorème de la résultante cinétique	211
14.3.2	Théorème du moment cinétique	211
14.3.3	Evolution de l'énergie lors d'un choc	212
14.4	Equations de Lagrange	213
14.5	Exemples	213
14.5.1	Choc élastique normal de deux sphères rigides	213
14.5.2	Sphère heurtant obliquement un plan	215
14.5.3	Choc mou : le pendule balistique	217
14.5.4	Solide tournant autour d'un axe fixe : centre de per- cussion	219
14.5.5	Billard	221
15	Principes variationnels	223
15.1	Introduction : le principe de Fermat	223
15.2	Principe d'action extrémale	224
15.3	Equations d'Euler-Lagrange	224

15.3.1	Principe de la démonstration	224
15.3.2	Application au problème de la brachistochrone	226
15.4	Propriétés de la courbe cycloïde	227
15.4.1	Courbe brachistochrone	227
15.4.2	Courbe tautochrone	227
15.4.3	Courbe isochrone	229
16	Chaos	231
16.1	Introduction	231
16.2	Point de départ : loi d'évolution du système	231
16.3	Résolution temporelle	232
16.4	Sensibilité aux conditions initiales	232
16.5	Représentation dans l'espace des phases	235
16.6	Plan des phases stroboscopique ou section de Poincaré	238
16.7	Diagramme de bifurcation	240
16.8	Proximité de deux trajectoires	241
16.9	Aspects expérimentaux et enrichissement spectral	241
17	Oscillations d'un saladier	245
17.1	Base et roulante	246
17.1.1	Saladier hémisphérique	246
17.1.2	Saladier tronconique	246
17.1.3	Complément : paramètres de l'hyperbole	248
17.2	Cinématique du saladier tronconique	251
17.3	Etude du potentiel du saladier tronconique	253
17.4	Etude de la dynamique du saladier tronconique (oscillations autour de la position d'équilibre)	256
17.5	Modèle didactique	259
17.6	Distribution des masses d'un tronc de cône évidé	261
18	Lois de Kepler	265
18.1	Les lois formulées par Johannes Kepler	265
18.2	L'esprit de la démonstration de Newton	265
18.3	Approche actuelle de ces lois	269
18.4	Compléments à la démonstration des Principia	270
18.4.1	Propriétés de l'ellipse	271
18.4.2	Force centrale exercée depuis le centre C d'une ellipse	272
18.4.3	Force centrale exercée depuis le foyer S d'une ellipse	274

19 Repères historiques	277
19.1 Premiers temps	277
19.2 Rayon de la Terre	277
19.3 Terre fixe ou mobile?	278
19.4 Héliocentrisme, déjà!	278
19.5 Héliocentrisme, enfin!	278
19.6 La rencontre décisive	279
19.7 Newton	279
19.8 Fin de l'histoire?	279
19.9 Repères biographiques	280

- **Références générales pour la formation en mécanique**

- [Acot, 1999] Acot, P. (1999). *L'histoire des sciences*. Presses universitaires de France (PUF).
- [Alvarez, 2013] Alvarez, A., editor (2013). *Destination : Systèmes dynamiques avec Poincaré*. Le Pommier.
- [Anonyme, 2017] Anonyme (2017). Brachystochrone curve. <https://makerware.thingiverse.com/thing:1708492>. Accessed : 2017-10-17.
- [Ansermet, 2013] Ansermet, J.-P. (2013). *Traité de physique : Mécanique*. Presses polytechniques et universitaires romandes. Cours de l'EPFL assorti d'une collection de vidéos MOOCS disponibles sur Youtube.
- [Audin, 2008] Audin, M. (2008). *Souvenirs sur Sofia Kovalevskaya*. Calvage et Mounet.
- [Baliani, 1638] Baliani, J.-B. (1638). *De motu naturali gravium solidorum*. Chute des corps pesants, expliquée avec un modèle dans lequel une variation de la vitesse intervient à intervalles réguliers : succession de mouvement inertiel et d'impulsions.
- [Banerjee, 2005] Banerjee, S. (2005). *Dynamics for Engineers*. Wiley.
- [Basquin, 1965] Basquin, R. (1965). *Mécanique expérimentale*. Librairie Delagrave.
- [Baudet, 1982] Baudet, J. (1982). L'histoire des sciences, plus utile que l'histoire des techniques? *Technologia*, 5 :53–59.
- [Baudet, 2004] Baudet, J. (2004). *De la machine au système, histoire des techniques depuis 1800*. Vuibert. Jean Baudet est l'auteur de nombreux ouvrages d'histoire des sciences et des techniques.
- [Bauduin, 2000] Bauduin, J.-M. (2000). *Mécanique des systèmes et du solide*. Ellipses.
- [Becchi et al., 2003] Becchi, A., Corradi, M., Foce, F., and Pedemonte, O. (2003). *Essays on the History of Mechanics - In Memory of Clifford Ambrose Truesdell and Edoardo Benvenuto*. Birkhauser Verlag.
- [Beckman, 2006] Beckman, B. (2006). Feynmann syas : "newton implies kepler, no calculus needed!". *The Journal of Symbolic Geometry*, 1 :57–72.
- [Berger and Zankl, 1974] Berger and Zankl (1974). *Technisches Werken, Erziehung zum technischen Denken 1-6 Schuljahr*. Styria Verlag.

- [Berkes, 1989] Berkes, I. (1989). *La physique du quotidien*. Vuibert.
- [Bernardi, 2016] Bernardi, G. (2016). *The Unforgotten Sisters : Female Astronomers and Scientists before Caroline Herschel*. Springer.
- [Berthelot, 1891] Berthelot, M. (1891). Pour l'histoire des arts mécaniques et de l'artillerie vers la fin du moyen-âge. *Annales de chimie et de physique*, 24 :433–521.
- [Blay, 2017] Blay, M. (2017). *Les Principia de Newton*. Dunod. Présentation du contexte historique et des principes de la démonstration de Newton, en se basant sur la traduction française d'Emilie du Chastelet.
- [Blondel, 1685] Blondel, F. (1685). *L'art de jetter les bombes*. La Haye.
- [Bogaert and van den Dungen, 1928] Bogaert, E. W. and van den Dungen, F. (1928). *Mécanique rationnelle, Tome premier*. Bruxelles, Maurice Lamertin.
- [Bontempi, 2015] Bontempi, G. (2015). *Modélisation et simulation*. Presses Universitaires de Bruxelles.
- [Borel, 1943] Borel, E. (1943). *L'évolution de la mécanique*. Flammarion (Paris).
- [Brading, 2021] Brading, K. (2021). How physics flew the philosophers' nest. *Studies in History and Philosophy of Science*, 88 :312–320.
- [Brenni, 1993] Brenni, P. (1993). *Museo di storia della scienza, Catalogue of Mechanical Instruments*. Giunti. Catalogue du musée d'histoire des sciences de Florence.
- [Breuer, 1997] Breuer, H. (1997). *Atlas de la physique*. Livre de Poche.
- [Brogliato, 2000] Brogliato, B., editor (2000). *Impacts in Mechanical Systems*. Springer.
- [Cabannes, 1962] Cabannes, H. (1962). *Cours de mécanique générale*. Dunod.
- [Charbonnier, 1928] Charbonnier, P. (1928). *Essai sur l'histoire de la balistique*. Paris.
- [Charlier et al., 1989] Charlier, A., Bérard, A., and Charlier, M.-F. (1989). *Mécanique analytique : du cours aux travaux dirigés*. Ellipses. Correspondance entre grandeurs mécaniques et électriques (p.87).
- [Clagett, 1959] Clagett, M. (1959). *The Science of mechanics in the Middle Ages*. University of Wisconsin Press, Madison.
- [Clagett, 1964] Clagett, M. (1964). *Galileo and medieval kinematics*. Washington.
- [Colignon, 1876] Colignon, E. (1876). *Les machines*. Decoopman.
- [Collectif, 2019] Collectif (2019). *La mécanique du futur et la recherche en sciences mécaniques*.
- [Connes, 2000] Connes, A. (2000). *Triangle de pensées*. Odile Jacob.
- [Copernic, 1543] Copernic, N. (1543). *De Revolutionibus*. Le soleil occupe maintenant une place centrale, mais les mouvements sont toujours circulaires (cosmos aristotélicien).

- [Coulomb, 1781] Coulomb, C. (1781). *Théorie des machines simples*.
- [Coulomb, 1799] Coulomb, C. (1799). *Résultats sur plusieurs expériences destinées à déterminer la quantité d'action que les hommes peuvent fournir par leur travail journalier*.
- [Cuvelier and Lamy, 1995] Cuvelier, C. and Lamy, A. (1995). *Astronomie sphérique et mathématique : astrodynamique*. Presses universitaires de Bruxelles (PUB).
- [d'auteurs, 2001] d'auteurs, C. (2001). *Yo-yo, billard, boomerang*. Belin, Pour la science.
- [de Bar-le Duc, 1979] de Bar-le Duc, E. (1979). *Le premier livre des instruments mathématiques mécaniques*. Berger-Levrault. Fac simulé de l'édition de 1584.
- [de Caus, 1615] de Caus, S. (1615). *Les raisons des forces mouvantes, avec diverses machines tant utiles que plaisantes*. Jan Norton (Francfort).
- [de Tralles, 530] de Tralles, A. (530). *Sur les paradoxes mécaniques*.
- [Debert, 2018] Debert, P. (2018). *Emilie du Châtelet, Philosophe des lumières*. Le Pythagore.
- [Delassus, 1912] Delassus, E. (1912). Sur le principe des travaux virtuels. *Bulletin de la S.M.F.*, 40 :244–265.
- [Delchambre, 2015] Delchambre, A. (2015). *Mécanique rationnelle II*. Presses universitaires de Bruxelles (PUB).
- [Denève and Desmarais, 2000] Denève, P. and Desmarais, T. (2000). *Mécanique du solide (Prépa)*. Hachette Supérieur.
- [Descartes, 1644] Descartes, R. (1644). *Les principes de la philosophie*. Amsterdam. Réflexions sur la conservation du mouvement rectiligne uniforme.
- [Detlefsen and Shapiro, 2023] Detlefsen, K. and Shapiro, L. (2023). *The Routledge Handbook of Women and Early Modern European Philosophy*. Routledge.
- [Dhombres, 2012] Dhombres, J., editor (2012). *Pierre-Simon de Laplace : le parcours d'un savant*. Hermann.
- [Dijksterhuis, 1955] Dijksterhuis, E., editor (1955). *The principal works of Simon Stevin, Volume 1, General Introduction Mechanics*. Amsterdam, Swets and Zeitlinger.
- [du Chastelet, 1759] du Chastelet, M. (1756-1759). *Principes mathématiques de la philosophie naturelle*. Paris. Traduction française des Principes de Newton, citée par Blay 2017, rééd. Blanchard 1966 et Gabay 1989. NB : texte d'Emilie du Chastelet disponible sur Gallica.
- [Duhem, 1905] Duhem, P., editor (1905). *Les origines de la statique*. Alain Blanchair, U Nancy-Metz.
- [Dzielska, 2010] Dzielska, M. (2010). *Hypatie d'Alexandrie*. Voir aussi le film éponyme.

- [Emerson, 1758] Emerson, W. (1758). *Principes de mécanique*. Londres.
- [Erlichson, 1999] Erlichson, H. (1999). Johann bernoulli brachistochrone solution using fermat principle of least time. *Eur.J.Phys.*, 20 :299–304.
- [Feynman et al., 2015] Feynman, R., Leighton, R., and Sands, M. (2015). *Le cours de physique de Feynman : mécanique 2*. Dunod.
- [Franeau, 1974] Franeau, J. (1974). *La pensée scientifique*. Fernand Nathan, Editions Labor.
- [Fruchart et al., 2016] Fruchart, M., Lidon, P., Thibierge, E., Champion, M., and Diffon, A. L. (2016). *TPhysique expérimentale*. de Boeck supérieur.
- [Galilée, 1638] Galilée, G. (1638). *Discorsi et dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*. Leyden. Discours concernant deux sciences nouvelles : Résistance des matériaux, et science du mouvement (MRU, MRUA (chute des graves) et trajectoires de projectiles).
- [Gandt, 1995] Gandt, F. D. (1995). *De la gravitation, suivi de, du mouvement des corps*. Editions Gallimard. Textes de Newton, traduits par Marie-Françoise Biarnais et présentés par François De Gandt.
- [Gaspard, 2014] Gaspard, P., editor (2014). *Mécanique analytique*. Presses universitaires de Bruxelles (PUB).
- [Giancoli, 1997] Giancoli (1997). *Physique générale, mécanique et thermodynamique*. De Boeck Université.
- [Gignoux and Silvestre-Brac, 2002] Gignoux, C. and Silvestre-Brac, B., editors (2002). *Mécanique, de la formulation lagrangienne au chaos hamiltonien*. EDP sciences.
- [Gilles, 1990] Gilles, B. (1990). *Les mécaniciens grecs*. Le Seuil (Paris).
- [Gillet, 2000] Gillet, A. (2000). *Une histoire du point en mer*. Belin, Pour la science.
- [Grant, 1995] Grant, E. (1995). *La physique au Moyen Age*. PUF.
- [Gruber and Benoît, 1988] Gruber, C. and Benoît, W. (1988). *Mécanique générale*. Presses polytechniques et universitaires romandes.
- [Gumowski and Mira, 1980] Gumowski, J. and Mira, C. (1980). *Dynamique chaotique : transformations ponctuelles, transition ordre-désordre*. Cepadues editions.
- [Gusman, 1997] Gusman, L., editor (1997). *La conservation de la quantité de mouvement*. Les cahiers du CEDOP (Centre de documentation pédagogique).
- [Haeghen, 2015] Haeghen, G. V. (2015). *760 mouvements mécaniques*. Decoopman.
- [Hague, 1961] Hague, B. (1961). *Introduction à l'analyse vectorielle*. Dunod.
- [Hanermas, 1973] Hanermas, J. (1973). *La Technique et la science comme idéologie*. Gallimard.
- [Hartog, 1948] Hartog, J. D., editor (1948). *Mechanics*. Dover Publications, New-York.

- [Hebert, 2004] Hebert, E., editor (2004). *Instruments scientifiques à travers l'histoire*. Ellipses.
- [Heilbron, 2003] Heilbron, J. L. (2003). *Astronomie et églises*. Belin, Pour la science.
- [Hladik, 1999] Hladik (1999). *Le calcul tensoriel en physique*. Dunod. Livre de la BST. Introduction didactique au tenseur d'inertie. Transformation galiléenne et introduction à la relativité restreinte.
- [Hoffmann, 1990] Hoffmann, B. (1990). *Histoire d'une grande idée, la relativité*. Pour la science, Diffusion Belin.
- [Huygens, 1673] Huygens, C. (1673). *Horologium Oscillatorium*. Paris. Action continue de la gravité (rupture avec Baliani), analyse de la force centripète, mouvement le long d'une cycloïde, isochronisme, horloge à pendule, montres à ressort spiral réglant.
- [Huygens, 1703] Huygens, C. (1703). *Opuscula Posthuma*. Leyden. Etude des chocs : règles du mouvement dans la rencontre des corps.
- [Héron, 55] Héron (-55). *Mécaniques*.
- [Janssens, 1983a] Janssens, P. (1983a). *Mécanique rationnelle 1*. Vander.
- [Janssens, 1983b] Janssens, P. (1983b). *Mécanique rationnelle 2*. Vander.
- [Kaiser, 2005] Kaiser, D., editor (2005). *Pedagogy and the practice of science*. MIT Press Books.
- [Kepler, 1617] Kepler, J. (1617). *Epitome astronomiae copernicae*. Mesure des trajectoires elliptiques et lois de Kepler : ellipses, loi des aires, $T^2/a^3 = \text{constante}$.
- [Lagrange, 1788] Lagrange (1788). *Mécanique analytique*. Editions Jacques Gabay. Fac-simile de la Mécanique Analytique, par M. de la Grange, de l'Académie des Sciences de Paris, de celles de Berlin, de Pétersbourg, de Turin, etc., consultable sur Gallica : <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k290712/f3.image.r=m%C3%A9canique%20analytique>.
- [Lagrange, 1965] Lagrange (1965). *Mécanique analytique : Tome second (reproduction de 1965)*. Librairie scientifique et technique Albert Blanchard.
- [Landau and Lifshitz, 1966] Landau and Lifshitz (1966). *Mécanique*. Editions Mir.
- [Latour, 1989] Latour, B. (1989). *La science en action*. Folio Essais.
- [Laurier, 1996] Laurier, P. (1996). *Les machines de construction*. Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées.
- [Leibniz, 1684] Leibniz, W. G. (1684). *Nova methodus pro maximis et minimis, itemque tangentibus*. Naissance du calcul différentiel.
- [Lindemann, 1999] Lindemann, E. (1999). *Mécanique : une introduction par l'histoire de l'astronomie*. De Boeck Université. Réunissant les aspects historiques, astronomiques, physiques et philosophiques de la découverte de l'univers, ce livre fait découvrir la mécanique en suivant l'histoire et l'évolution des idées.

- [Léon, 1961] Léon, A. (1961). *Histoire de l'éducation technique*. PUF.
- [Lévy-Leblond, 1986] Lévy-Leblond, J.-M. (1986). Le billard d'anaïs. *Eur.J.Phys.*, 7 :252–258.
- [Mach, 1987] Mach, E. (1987). *La mécanique*. Jacques Gabay. Références aux travaux de Stévin sur l'équilibre des poulies.
- [Meriam et al., 2016] Meriam, J., Kraige, L., and J.N.Bolton (2016). *Engineering Mechanics : Dynamics*. Wiley, 8th Edition.
- [Moon, 2007] Moon, F. C. (2007). *The machines of Leonardo Da Vinci and Franz Reuleaux*. Springer.
- [Neuenschwander, 2017] Neuenschwander, D. E. (2017). *Emmy Noether's Wonderful Theorem*. John Hopkins University Press.
- [Newton, 1687] Newton, I. (1687). *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. Londres.
- [Nicolis, 1995] Nicolis, G. (1995). *Introduction to nonlinear science*. Cambridge University Press.
- [Pac, 2016] Pac, J.-L. (2016). *Systèmes dynamiques*. Dunod.
- [Peyroux, 1980] Peyroux, J. (1980). *Horologium Oscillatorium*. Bergeret, Bordeaux. Traduction du latin en français avec des notes, par Jean Peyroux, Ingénieur Arts et Métiers.
- [Platrier, 1955] Platrier, C. (1955). *Mécanique rationnelle*. Dunod.
- [Poincaré, 1893] Poincaré, H. (1893). *Les méthodes nouvelles de la mécanique céleste*. Gauthier-Villars et Fils.
- [Pujol and J.-Ph.Pérez, 2007] Pujol, O. and J.-Ph.Pérez (2007). On a simple formulation of the golf ball paradox. *Eur.J.Phys.*, 28 :379–384.
- [Pérez, 1997] Pérez, J.-P. (1997). *Mécanique : Fondements et applications*. Masson.
- [Raichvarg and Jacques, 1983] Raichvarg, D. and Jacques, J. (1983). *Savants et ignorants, une histoire de la vulgarisation des sciences*. Seuil.
- [Reser and McNeill, 2023] Reser, A. and McNeill, L. (2023). *Forces de la nature : ces femmes qui ont changé la science*. Belin.
- [Richard Feynman, 2015] Richard Feynman, Robert Leighton, M. S. (2015). *Le cours de physique de Feynman : mécanique 1*. Dunod.
- [Rittaud, 2017] Rittaud, B. (2017). *Newton implique Kepler*. Ellipses.
- [Sandori, 1983] Sandori, P. (1983). *Petite logique des forces : construction et machines*. Editions du Seuil, Collection Points Science.
- [Sarlos, 2003] Sarlos, G. (2003). *Systèmes énergétiques*. PPUR.
- [Sedov, 1959] Sedov, L. (1959). *Similarity and Dimensional Methods in Mechanics*. Infosearch London.
- [Spiegel, 1972] Spiegel, M. R. (1972). *Théorie et applications de la mécanique générale*. Schaum.

- [Stevin, 1583] Stevin, S. (1583). *De Beghinselen der Weeghconst.* Leyden. Disponible sur <https://archive.org/details/ned-kbn-all-00011058-001/page/n84>.
- [Strelkov, 1978] Strelkov, S. (1978). *Mécanique.* Mir, Moscou.
- [Sussman and Wisdom, 2001] Sussman, G. J. and Wisdom, J., editors (2001). *Structure and Interpretation of Classical Mechanics.* MIT Press.
- [Talpaert, 1982] Talpaert, Y., editor (1982). *Mécanique analytique. Tome II : dynamique des systèmes matériels.* J. Dukulot.
- [Targ, 1966] Targ, S. (1966). *Eléments de mécanique rationnelle.* Mir, Moscou.
- [Taylor, 2005] Taylor, J. R. (2005). *Mécanique classique.* de Boeck.
- [Thomson, 1961] Thomson, W. T. (1961). *Introduction to space dynamics.* Dover Publications, Inc., New-York.
- [Timmermans, 1846] Timmermans, J.-A. (1846). *Sur le parallélogramme des forces de Simon Stévin.* Bulletin de l'Académie royale des sciences, des lettres et des beaux-arts de Belgique (7 p. t. XIII).
- [Tokieda, 2003] Tokieda, T. (2003). Sphères, jouets, contact. *Pour la science*, oct/décembre :20–23.
- [van den Dungen, 1958a] van den Dungen, F. (1958a). *Mécanique rationnelle.* Presses universitaires de Bruxelles (PUB).
- [van den Dungen, 1958b] van den Dungen, F. (1958b). *Mécanique rationnelle. Fascicule 3 : mécanique du point.* Presses universitaires de Bruxelles (PUB).
- [van den Dungen, 1959a] van den Dungen, F. (1959a). *Mécanique rationnelle. Fascicule 2 : cinématique appliquée, calcul tensoriel et géométrie des masses.* Presses universitaires de Bruxelles (PUB).
- [van den Dungen, 1959b] van den Dungen, F. (1959b). *Mécanique rationnelle. Fascicule 4 : mécanique des systèmes.* Presses universitaires de Bruxelles (PUB).
- [Varignon, 1687] Varignon, P. (1687). *Projet d'une nouvelle mécanique.* Paris.
- [Viennot, 2002] Viennot, L. (2002). *Enseigner la physique.* de boeck.
- [Waxin, 2019] Waxin, I. L. (2019). *La Savante des Lumières françaises, histoire d'une persona : pratiques, représentations, espaces et réseaux.* Thèse de doctorat en histoire des sciences, EHESS, sous la direction de Jeanne Peiffer, soutenue le 8 juillet 2019.
- [Wells, 1967] Wells, D. A. (1967). *Lagrangian Dynamics.* McGraw-Hill, Schaum's outline series.