

Enseignements sur les enjeux environnementaux et les impacts du numérique dans une école d'ingénieurs

Annabelle COLLIN^{1,*}, Armande CAPITAINÉ^{2,*}, Adrien F. VINCENT^{2,*},
Corinne DEJOURS^{2,*}, Anthony GHIOTTO^{2,*}, Myriam DESAINTE-CATHERINE^{3,*},
Philippe LOUBET^{4,*}, Christophe JÉGO^{2,*}

^{*}Univ. Bordeaux, ^{*}CNRS, ^{*}Bordeaux INP, ¹Inria,

¹IMB, UMR 5251, ²IMS, UMR 5218, ³LaBRI, UMR 5800, ⁴ISM, UMR 5255,

F-33400 Talence, France

Contact: annabelle.collin@bordeaux-inp.fr

Résumé

Un enseignement obligatoire de 3 h de fresque (climat ou numérique), de 9 h de cours magistral et de 12 h de travaux pratiques de sensibilisation aux enjeux environnementaux et aux impacts du numérique pour tou.te.s les étudiant.e.s en première année de l'école d'ingénieurs ENSEIRB-MATMECA de l'établissement Bordeaux INP (4 filières sous statut d'étudiant et 2 filières par apprentissage).

1 Introduction

1.1 Objectifs

L'ENSEIRB-MATMECA est une école d'ingénieurs publique, formant des ingénieurs à fortes compétences scientifiques et techniques, prêts à répondre aux défis du monde numérique. Elle propose 6 formations d'ingénieurs validées par la Commission des titres d'ingénieur : 4 formations sous statut étudiant (Électronique, Informatique, Télécommunications et Mathématiques pour la Mécanique) et 2 filières par apprentissage (Réseaux et Informatique et Systèmes Électroniques Embarqués).

Les enseignements que nous présentons visent à sensibiliser l'ensemble des élèves de première année (équivalence L3) aux enjeux environnementaux (climat, biodiversité et raréfaction des ressources) et aux impacts du numérique. Ces enseignements se décomposent comme suit :

- une fresque [climat](#) ou [numérique](#) (3 h) ;
- des cours magistraux sur les problématiques environnementales (1 h 20), l'énergie (2 h 40), les impacts du numérique (1 h 20) ;
- un séminaire par un.e intervenant.e extérieur.e (1 h 20) ;
- un cours sur l'analyse du cycle de vie (2 h) illustré par 3 séances de travaux pratiques (12 h).

Cet ensemble a pour objectif de former les étudiant.e.s sur des connaissances et compétences qu'ils pourront ensuite utiliser dans leur vie personnelle et professionnelle pour faire face aux défis de développement durable et de responsabilité sociétale à venir.

1.2 Mise en place des enseignements

La montée en compétences de l'équipe pédagogique est un pré-requis indispensable à la mise en place d'enseignements sur les enjeux écologiques et sociaux. Notre stratégie a reposé tout d'abord sur les fresques du climat et du numérique. Un nombre important d'animateurs et d'animatrices (équipe pédagogique et personnel administratif) a été formé à la fresque du climat (25 personnes) et à la fresque du numérique (16 personnes). Ensuite, un groupe d'une quinzaine d'enseignant.e.s-chercheur.e.s a été formé à l'analyse du cycle de vie par Philippe LOUBET, expert du domaine et enseignant-chercheur à l'ENSMAC, une autre école d'ingénieurs de Bordeaux INP. Le contenu du cours a été construit et discuté par un groupe de travail lors de réunions régulières. Des étudiant.e.s ont aussi participé à certaines de ces discussions, principalement à travers le groupe de travail tripartite (personnel enseignant, personnel administratif et étudiant.e.s) créé suite à la signature par l'école ENSEIRB-MATMECA de l'[accord de Grenoble](#).

Les sources principales de nos cours sur l'environnement reposent sur les rapports du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) et sur les rapports de l'IPBES (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services). Notre approche se veut scientifique afin de respecter le principe de neutralité en proposant des enseignements les plus objectifs et rigoureux possibles.

Nous souhaitons préciser que les travaux pratiques reposent sur la base de données (BDD) [ecoinvent](#). Bien qu'elle soit payante (environ 4000 € pour une licence *éducation* multi-utilisateurs perpétuelle et 750 € pour les mises à jour annuelles, optionnelles), nous avons fait le choix d'utiliser cette BDD car elle fait référence en analyse du cycle de vie en raison de sa transparence sur la provenance des données utilisées ainsi que leur mode d'obtention, d'évaluation ou d'intégration dans les calculs [1]. Les données, proposées via un site internet, sont notamment évaluées par des expertes et experts indépendants.

1.3 Historique

Ces enseignements ont été proposés pour la première fois au premier semestre de l'année 2021-22. Un module d'enseignement en culture de l'ingénieur pour les six filières ainsi que des heures d'enseignements techniques dans certaines d'entre elles ont été supprimés afin de ne pas augmenter le volume horaire des formations de nos étudiant·e·s.

Entre l'année 2021-22 et 2022-23, les contenus ont été légèrement modifiés afin de mieux répondre aux objectifs pédagogiques. La principale évolution est l'intervention d'une personne extérieure à l'école sur un sujet sociétal avec pour objectif d'illustrer sur un exemple concret la prise en compte de la transition. Ce changement s'est effectué suite à l'évaluation 2021-22 des enseignements (voir la section 7 pour plus de détails).

2 Organisation

Niveau : 1^{re} année d'école d'ingénieurs (équivalent L3).

Obligatoire, optionnel : Unité d'Enseignement obligatoire.

Nom dans la maquette : Développement durable et responsabilité sociétale.

Crédits ECTS : 1.

Nombre d'étudiant·e·s : environ 450 élèves (4 filières sous statut étudiant [\sim 400 élèves] : Électronique, Informatique, Télécommunications, Mathématiques pour la Mécanique et 2 filières par apprentissage [\sim 50 élèves] : Réseaux et Informatique, Systèmes Électroniques Embarqués).

Nombre d'enseignant·e·s impliqué·e·s : \sim 25 personnes pour animer les fresques, 2 enseignantes pour les cours magistraux et \sim 15 enseignant·e·s pour les travaux pratiques (TP).

Contexte pédagogique : 3 h de fresque (climat ou numérique), 9 h de cours magistral (CM) et 12 h de TP.

3 Plan du cours

Nous présentons dans cette section l'organisation de ces enseignements.

1. **Fresque du climat, ou du numérique** pour celles et ceux qui ont déjà fait la fresque du climat (Semestre 1, 3 h).
2. **Problématiques environnementales** (semestre 1, 1 séance d'1 h 20 de CM) :
 - Retour sur le changement climatique suite à la fresque du climat (extraits des rapports du GIEC, ordres de grandeur) ;
 - Effondrement de la Biodiversité : qu'est-ce que la biodiversité ? Comment l'utilise t-on ? Présentation du premier rapport de l'IPBES, Extinction de masse ;
 - Surexploitation des Ressources Naturelles : Qu'est-ce qu'une ressource naturelle ? Quelques exemples de ressources se raréfiant ;
 - Aspect systémique des problèmes, Introduction très rapide à l'analyse du cycle de vie.

Activité : réaliser son bilan carbone avec 2 outils différents et analyse des résultats.

Ce cours a été co-construit avec Aurélie BUGEAU (Université de Bordeaux), Juliette CHABASSIER (Inria) et Gaël GUENNEBAUD (Inria).

3. **Énergie** (semestre 1, 2 séances d'1 h 20 de CM) :
- Notions fondamentales sur l'énergie : définition, principe de conservation, unités de mesure, différentes formes d'énergies, énergies renouvelables/fossiles/fissiles, énergie primaire/finale/utile, taux de retour énergétique EROI ;
 - Historique de l'exploitation de l'énergie par l'Homme ;
 - Situation actuelle : mix énergétique et consommation d'énergie primaire en France et dans le monde, conséquences sur climat & biodiversité, propositions pour atteindre la neutralité carbone (reforestation, sobriété, efficacité, énergies décarbonées) ;
 - Panorama d'Énergies renouvelables (EnR) : hydroélectricité, éolien onshore/offshore, photovoltaïque, biomasse, géothermie ;
 - Potentiel et enjeux des EnR : potentiels énergétiques/économiques, intermittence, stockage, ressources minérales, impact environnemental ;
 - Exemple d'un scénario 100 % EnR : scénario Negawatt.
4. **Impacts du numérique** (semestre 1, 1 séance d'1 h 20 de CM) :
- Qu'est-ce que le numérique (un secteur en très forte expansion) ?
 - Impacts directs : consommation énergétique donc gaz à effet de serre, nombreuses ressources nécessaires (lesquelles, d'où elles viennent, les pollutions qu'elles génèrent, le recyclage ...)
 - Impacts indirects : nouveaux usages, effets induits et rebonds, impacts sociétaux (dépendance, accélération...), impacts sur la santé, impacts géopolitiques ;
 - Des pistes pour agir à son échelle ;
 - Des pistes pour agir en tant que futur·e ingénieur·e du monde numérique.
- Ce cours a été co-construit avec Aurélie BUGEAU, Juliette CHABASSIER et Gaël GUENNEBAUD et s'est inspiré de la référence [2].
5. **Séminaire d'un·e intervenant·e extérieur·e** (semestre 1, 1 séance d'1 h 20 de CM) :
- Conférence d'1 h 20 sur un sujet sociétal avec pour objectif de montrer sur un exemple concret comment une transition peut et doit se faire.
- Exemple pour l'année scolaire 2022-23 : Intervention de Marie CHÉRON (Transport et Environnement) sur *Mobilité durable : Enjeux et perspective en France*.
6. **Introduction à l'analyse du cycle de vie** (semestre 2, 1 séance de 2 h de CM) :
- Définition de l'écoconception et de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) ;
 - Présentation des 4 phases de l'ACV selon les normes ISO 14040-44 ;
 - Introduction au concept de transferts d'impacts ;
 - Interprétation des résultats sur deux exemples principaux : séchoir à mains (papier ou électrique) et voiture (thermique ou électrique).
7. **TP Introduction au logiciel openLCA et à la BDD ecoinvent** (semestre 2, 1 séance de 3 h).
L'objectif de ce TP est de faire découvrir un logiciel en libre accès [openLCA](#) et une BDD payante [ecoinvent](#). La découverte se fait au travers d'une étude simplifiée visant à l'analyse de 3 options de contenant de boisson de 500 mL (aluminium, plastique, verre).
8. **TP ACV du parc informatique de l'ENSEIRB-MATMECA** (semestre 2, 1 séance de 5 h).
L'objectif de ce TP est de comparer les impacts environnementaux de 2 solutions numériques (600 ordinateurs DELL face à 600 Raspberry Pi associés à 6 serveurs DELL) pour le parc informatique de l'école à l'aide d'[openLCA](#) et d'[ecoinvent](#). Les résultats issus de la mise en place de ce TP ont fait l'objet d'un article scientifique [3].
9. **TP Performance énergétique d'un programme informatique** (semestre 2, 1 séance de 3 h).
L'objectif de ce TP est d'étudier les performances énergétiques d'un programme informatique en explorant quelques leviers d'actions pour rendre l'exécution plus sobre énergétiquement :
- Langages : Python ou Python compilé à la volée ou C++ ;
 - Parallélisme : *séquentiel* ou *Single Instruction on Multiple Data* ou *multithreading* ou *pipelining*.
- S'agissant d'un sujet très vaste et dépendant de nombreux facteurs et paramètres, l'objectif est ici principalement de montrer aux étudiant·e-s que leurs choix ont des impacts. Ce TP est fortement inspiré d'un TP proposé par Gaël GUENNEBAUD à des étudiant·e-s de licence d'informatique de l'Université de Bordeaux.

4 Déroulement des enseignements

Les fresques se déroulent par groupe de 6 élèves. Environ 25 animateurs et animatrices (enseignant·e·s-chercheur·e·s et personnel administratif) sont impliquées lors des fresques. Les cours magistraux reposent sur des présentations basées sur des diaporamas et sont faits par 2 enseignantes. Les travaux pratiques se déroulent par groupe de 20 à 30 élèves encadrés par une quinzaine d'enseignant·e·s.

5 Évaluations

Les critères d'évaluation dépendent du semestre et des compétences attendues. Au premier semestre, chaque élève doit répondre à un questionnaire à choix multiples (QCM) composé de 10 questions sélectionnées aléatoirement parmi une base d'une soixantaine de questions créée pour ces enseignements dans l'environnement numérique de travail [Moodle](#). Ladite base de questions est disponible sur [demande](#). Nous ne souhaitons pas la publier puisqu'elle est actuellement utilisée pour évaluer les étudiant·e·s. La compétence visée est de construire un ensemble des connaissances minimales qui doivent être acquises par les élèves. Dans ce but, chacune des questions sélectionnée porte sur un domaine particulier :

- Question 1 : l'empreinte carbone ;
- Question 2 : les différents gaz à effet de serre ;
- Question 3 : les organes scientifiques que sont le GIEC et l'IPBES ;
- Question 4 : l'effondrement de la biodiversité ;
- Question 5 : l'ACV ou les mix électriques et énergétiques ;
- Question 6 : des généralités autour de l'énergie ;
- Question 7 : la situation énergétique actuelle en France ;
- Question 8 : les aspects techniques des EnR ;
- Question 9 : le potentiel de décarbonation des EnR ;
- Question 10 : les impacts principaux directs ou indirects du numérique.

Le second semestre est quant à lui évalué à l'aide de deux rapports de TP. Le premier rapport concerne le TP *ACV du parc informatique de l'ENSEIRB-MATMECA* dont les compétences visées sont :

- connaître la nature des éléments pris en compte dans l'ACV ;
- comprendre et expliquer la composition de l'unité centrale d'un ordinateur de bureau, d'un ordinateur à carte unique et d'un serveur de calcul ;
- comparer deux stratégies d'équipements informatiques en termes d'impacts environnementaux ;
- identifier les limites de l'étude ;
- vérifier et citer ses sources ;
- interpréter les résultats d'une ACV.

Le deuxième rapport concerne le TP *Performance énergétique d'un programme informatique* dont les compétences visées sont :

- réaliser que différents langages de programmation peuvent être utilisés pour une même application ;
- comparer différentes options de compilation à travers leur consommation énergétique ;
- comprendre la différence entre le temps de calcul et la consommation énergétique au travers de l'exemple de la parallélisation d'une tâche de calcul ;
- initier une réflexion plus large autour de la programmation.

6 Supports des enseignements

Les supports sont accessibles en ligne :

- [Cours sur les problématiques environnementales](#) (pdf) ;
- [Cours sur l'énergie \(partie 1\)](#) (pdf) ;
- [Cours sur l'énergie \(partie 2\)](#) (pdf) ;
- [Cours sur les impacts du numérique](#) (pdf) ;
- [Cours sur l'ACV](#) (pdf) ;
- [TP Introduction au logiciel openLCA et à la BDD ecoinvent](#) (pdf) ;
- [TP ACV du parc informatique de l'ENSEIRB-MATMECA](#) (pdf) ;
- [TP Performance énergétique d'un programme informatique](#) (pdf).

Pour les deux premiers TP – comme expliqué dans l’introduction – la BDD **ecoinvent** est nécessaire. De plus pour le deuxième TP, des briques comme la carte-mère (Motherboard), la mémoire vive (RAM) et l’unité de traitement graphique (GPU) ainsi que les processus de l’ordinateur à carte unique (Raspberry Pi 4 Rev B) et du serveur DELL (Server 48 cores) ont été créés par nos soins et sont fournis aux élèves dans la BDD. Ils sont disponibles sur **demande**. Des éléments de correction des TP sont également disponibles sur **demande**. Nous ne souhaitons néanmoins pas les diffuser largement puisque ces TP sont actuellement proposés aux élèves.

7 Conclusion et perspective

Ces enseignements, comme tous les enseignements de l’école ENSEIRB-MATMECA, ont été évalués par une enquête de satisfaction menée au sein de l’école durant l’année scolaire 2021-22. Même si les évaluations sont majoritairement positives, des étudiant-e-s ont fait un certain nombre de remarques dont les principales sont résumées ci-dessous :

1. la perception d’une faible utilité de ces enseignements ;
2. un manque d’objectivité ressenti ;
3. une culpabilité ressentie ;
4. un sentiment de liste exhaustive des problèmes avec peu d’exemples concrets de solutions au premier semestre.

Nous avons essayé d’intégrer ces remarques dès l’année suivante. Pour les points 1, 2 et 3, nous avons davantage contextualisé le cours. Nous avons notamment précisé que l’objectif n’était pas de les faire culpabiliser mais de leur donner des compétences leur permettant de faire face à ces enjeux ainsi que d’amener une réflexion. Nous avons aussi insisté sur les sources utilisées et pris le temps d’expliquer la méthode scientifique. Enfin pour le point 4, nous avons mis en place le séminaire par un-e intervenant-e extérieur-e.

La formation d’un groupe pédagogique sur ces sujets a été l’occasion de nombreux échanges sur ces enjeux au sein de l’école ENSEIRB-MATMECA dépassant le cadre de la mise en place de ces enseignements.

La perspective principale et ambitieuse est désormais dans l’intégration des enjeux écologiques et sociaux dans l’ensemble de la formation.

Remerciements

Nous tenons tout d’abord à remercier l’ensemble des collègues – autant les enseignant-e-s que le personnel administratif – qui ont permis par leur engagement la mise en place de ces enseignements. Par ailleurs, nous remercions nos collègues du campus bordelais pour les nombreux échanges et en particulier Aurélie BUGEAU, Juliette CHABASSIER et Gaël GUENNEBAUD.

Références

- [1] Gregor Wernet, Christian Bauer, Bernhard Steubing, Jürgen Reinhard, Emilia Moreno-Ruiz, and Bo Weidema. The ecoinvent database version 3 (part I) : overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9) :1218–1230, 2016.
- [2] Pierre Boulet, S Bouveret, A Bugeau, E Frenoux, Julien Lefevre, Anne-Laure Ligozat, Kevin Marquet, Philippe Marquet, Olivier Michel, and O Ridoux. Référentiel de connaissances pour un numérique éco-responsable. Research report, EcoInfo, 2020.
- [3] Philippe Loubet, Adrien Vincent, Annabelle Collin, Corinne Dejous, Anthony Ghiotto, and Christophe Jego. Life cycle assessment of ICT in higher education : a comparison between desktop and single-board computers. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2023.