

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

Annabelle Collin^{1,2,3}  , Armande Capitaine^{1,4} , Adrien F. Vincent^{1,4} ,
Mathieu Coquerelle^{1,5} , Corinne Dejous^{1,4} , Anthony Ghiotto^{1,4} ,
Myriam Desainte-Catherine^{1,6} , Philippe Loubet^{1,7} , Christophe Jégo^{1,4} 

¹Université de Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, avenue des facultés,
33400 Talence, France

²Inria, 200 avenue de la Vieille Tour, 33400 Talence, France

³Institut de Mathématiques de Bordeaux (IMB), UMR 5251, 351 cours de la Libération,
33400 Talence, France

⁴Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système (IMS), UMR 5218,
351 Cours de la Libération, 33400 Talence, France

⁵Institut de mécanique et d'ingénierie (I2M), UMR 5295, 351 Cours de la Libération,
33400 Talence, France

⁶Laboratoire Bordelais de Recherche en Informatique (LaBRI), UMR 5800,
351 Cours de la Libération, 33400 Talence, France

⁷Institut des Sciences Moléculaires (ISM), UMR 5255, 351 Cours de la Libération,
33400 Talence, France

 annabelle.collin@bordeaux-inp.fr

Reçu : 4 avril 2023 - Accepté : 7 septembre 2023 - Publié : 1^{er} juillet 2024

<https://doi.org/10.53480/jeeses.cea2>

Un enseignement obligatoire de 3 h de fresque (du climat ou du 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 les élèves en première année de l'école d'ingénieurs ENSEIRB-MATMECA de l'établissement Bordeaux INP (4 filières sous statut étudiant et 2 filières par apprentissage).



1 Introduction

1.1 Objectifs

L'ENSEIRB-MATMECA est un établissement public d'enseignement supérieur dédié à la formation d'ingénieures et ingénieurs possédant des compétences scientifiques et techniques approfondies, afin de relever les défis du domaine numérique. Elle propose 6 formations 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 (<https://fresqueduclimat.org/>) ou numérique (<https://www.fresquedunumerique.org/>) (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 donné par une personne extérieure (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 étudiantes et étudiants sur des connaissances et compétences qu'elles et 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'enseignantes-chercheuses et enseignants-chercheurs (EC) 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 de Bordeaux INP. Le contenu du cours a été construit et discuté par un groupe de travail lors de réunions régulières. Des étudiantes et étudiants ont aussi participé à certaines de ces

discussions, principalement à travers le groupe de travail tripartite (personnel enseignant, personnel administratif et élèves) 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 (<https://ecoinvent.org/>). 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 (Wernet *et al.*, 2016). Les données, proposées via un site internet, sont notamment évaluées par des expertes et experts indépendants.

Nous avons reçu le support de la direction de l'école (ENSEIRB-MATMECA) par le financement des heures d'enseignement de manière pérenne et de l'établissement (Bordeaux INP) à travers le financement d'heures de formation et de la base de données. Pour obtenir ce soutien, nous avons porté une démarche de sensibilisation (à travers des fresques et des présentations). Les discussions se sont fortement appuyées sur la signature de l'accord de Grenoble.

D'autres démarches similaires existent dans d'autres écoles d'ingénieurs. On peut citer par exemple l'initiative « Former l'ingénieur du XXI^e siècle » du Shift Project en collaboration avec l'INSA que nous avons suivie de près lors de la mise en place de nos enseignements. La particularité de notre approche est d'avoir centré notre formation sur les enjeux du numérique puisque c'est le cœur de la formation de notre école. Cependant, nous avons rencontré de nombreux points communs comme les difficultés (mobilisation du personnel, retours négatifs d'étudiantes et étudiants, etc.) résumées depuis dans leur document de retours d'expériences (The Shift Project et Groupe INSA, 2022).

1.3 Historique

Ces enseignements ont été proposés pour la première fois au premier semestre de l'année 2021-2022. 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 de nos formations.

Entre l'année 2021-2022 et 2022-2023, 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 2021-2022 des enseignements (voir la section 7 pour plus de détails).

2 Organisation

Niveau : 1re 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'étudiantes et étudiants : environ 450 élèves (4 filières sous statut étudiant [- 400 élèves] : Électronique, Informatique, Télécommunications, Mathématiques pour la mécanique et 2 filières par apprentissage [- 50 élèves] : Réseaux et informatique, Systèmes électroniques embarqués).

Nombre de personnes impliquées dans les enseignements : ~ 25 personnes pour animer les fresques, 2 EC pour les cours magistraux et ~ 15 EC 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 (<https://fresqueduclimat.org/>), ou du numérique (<https://www.fresquedunumerique.org/>) pour celles et ceux qui ont déjà suivi 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'être humain.
- Situation actuelle : mix énergétique et consommation d'énergie primaire en France et dans le monde, conséquences sur le climat et la biodiversité, propositions pour atteindre la neutralité carbone (reforestation, sobriété, efficacité, énergies décarbonées).
- Panorama des énergies renouvelables (EnR) : hydroélectricité, éolien onshore/offshore, photovoltaïque, biomasse, géothermie.
- Potentiel et enjeux des EnR : potentiels énergétiques/économiques, intermittence, stockage, ressources minérales, impacts environnementaux.
- 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 viennent-elles ? Quelles pollutions génèrent-elles ? Quid du recyclage ? etc.
- 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 future ingénieure ou futur ingénieur du monde numérique.

Ce cours a été co-construit avec Aurélie Bugeau, Juliette Chabassier et Gaël Guennebaud et s'est inspiré de la référence Boulet *et al.*, 2020.

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 2022-2023 : Intervention de Marie Chéron (Transport et environnement) sur Mobilité durable : enjeux et perspectives 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 (<https://www.openlca.org/>) et une BDD payante ecoinvent (<https://ecoinvent.org/>). 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 (Loubet *et al.*, 2023).

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'action pour rendre son 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 étudiantes et étudiants que leurs choix ont des impacts. Ce TP est fortement inspiré d'un TP proposé par Gaël Guennebaud à des étudiantes et étudiants de licence d'informatique de l'université de Bordeaux.

4 Déroulement des enseignements

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

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 étudiantes et étudiants. La compétence visée est de construire un ensemble des connaissances minimales qui doivent être acquises par les élèves. Dans ce but, chacune des questions sélectionnées 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 ressources suivantes – relativement classiques – n'ont pas été évaluées :

- Cours sur les problématiques environnementales (<https://plmbox.math.cnrs.fr/f/fe22646a9fb54ca7a9aa/>) (pdf) ;
- Cours sur l'énergie (partie 1) (<https://plmbox.math.cnrs.fr/f/e0ccfbbb9e9443a802b/>) (pdf) ;
- Cours sur l'énergie (partie 2) (<https://plmbox.math.cnrs.fr/f/3047e34388b64ddc8f67/>) (pdf) ;
- Cours sur les impacts du numérique (<https://plmbox.math.cnrs.fr/f/34e8ed8dbd494135850f/>) (pdf).

Les ressources suivantes – plus originales – ont été évaluées :

- Cours sur l'ACV (<https://plmbox.math.cnrs.fr/f/25346543b75b41caa344/>) (pdf) ;
- TP Introduction au logiciel openLCA et à la BDD ecoinvent (<https://plmbox.math.cnrs.fr/f/126da87cdb2543999adc/>) (pdf) ;
- TP ACV du parc informatique de l'ENSEIRB-MATMECA (<https://plmbox.math.cnrs.fr/f/907efa0f674645059e77/>) (pdf) ;
- TP Performance énergétique d'un programme informatique (<https://plmbox.math.cnrs.fr/f/a7ee476b6c934a2eb37e/>) (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 perspectives

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 2021-2022. Même si les évaluations sont majoritairement positives, des étudiantes et étudiants 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 intervenant extérieur.

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 le personnel enseignant 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

Boulet Pierre, Bouveret Sylvain, Bugeau Aurélie, Frenoux Emmanuelle, Lefevre Julien, Ligozat Anne-Laure, Marquet Kevin, Marquet Philippe, Michel Olivier et Ridoux Olivier (2020). *Référentiel de connaissances pour un numérique éco-responsable*. Rapport de recherche, EcoInfo.

Loubet Philippe, Vincent Adrien, Collin Annabelle, Dejous Corinne, Ghiotto Anthony et Jégo Christophe (2023). Life cycle assessment of ICT in higher education: a comparison between desktop and single-board computers, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 28, n° 3, p. 255–273. <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02131-z>

The Shift Project et Groupe INSA (2022). *Former l'ingénieur du XXIe siècle - retours d'expériences*. Rapport de recherche, The Shift Project.

Wernet Gregor, Bauer Christian, Steubing Bernhard, Reinhard Jürgen, Moreno-Ruiz Emilia et Weidema Bo (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 21, n° 9, p. 1218–1230. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>

Citer cet article

Collin Annabelle, Capitaine Armande, Vincent Adrien F., Coquerelle Mathieu, Dejous Corinne, Ghiotto Anthony, Desainte-Catherine Myriam, Loubet Philippe et Jégo Christophe (2024). Enseignements sur les enjeux environnementaux et les impacts du numérique dans une école d'ingénieurs, *Journal Enseigner les Enjeux Socio Écologiques dans le Supérieur*, vol. 1, p. 5-10. <https://doi.org/10.53480/jeeses.cea2>