



Introduire les enjeux environnementaux et sociétaux du numérique en L3 informatique

Valentin Emiya^{1,3}, Julien Lefèvre^{2,3}, Frédéric Olive^{1,3},
Pierre-Alain Reynier¹, Corentin Travers¹

Introduction

L'idée d'une unité d'enseignement (UE) sur les impacts du numérique en licence d'informatique à Aix-Marseille Université prend corps en 2019, dans un contexte de prise de conscience de l'incidence du numérique sur l'environnement. Alors que l'on voit émerger des études telles que le rapport « Lean ICT – Pour une sobriété numérique » du *Shift Project* publié fin 2018 [10] et la méta-analyse de [5], alors que le GdS EcoInfo existe depuis plus de dix ans, que cette thématique était à l'honneur du congrès de la SIF en 2020⁴, ces aspects restaient à introduire dans nos formations et peu d'initiatives similaires existaient⁵. Cette nécessité a depuis été prise en compte par la loi dite REEN⁶.

Les questions environnementales étant liées à des questions sociétales, nous avons créé une UE intitulée « Impacts environnementaux et sociétaux du numérique », UE

1. Aix Marseille Université, université de Toulon, CNRS, LIS, Marseille.

2. Aix Marseille Université, CNRS, INT, institut neurosciences de la Timone, Marseille.

3. Atelier d'écologie politique d'Aix-Marseille.

4. <https://congres.societe-informatique-de-france.fr/archive-programme-2020>.

5. <https://ecoinfo.cnrs.fr/2019/06/21/formations-abordant-les-aspects-environnementaux-du-numerique>.

6. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000044327272>.

obligatoire de 30 heures de niveau L3, avec un découpage horaire de 6 heures de cours et 24 heures de TP. Il n'a pas été simple de concevoir cette UE, qui ne correspond pas à des contenus disciplinaires ni à des objectifs classiques. Quelques ressources étaient néanmoins disponibles à travers le référentiel de connaissances d'EcoInfo⁷. Nous avons constitué un groupe de travail élargi avec la présence de deux membres du GdS EcoInfo. Une première période a consisté à explorer une large plage de thématiques. En 2021, sept réunions régulières avec les membres de la future équipe pédagogique ont permis de bâtir finement le programme des 3 cours et des 8 séances de travaux pratiques qui seront explicités dans la partie suivante.

Nous avons conçu l'UE pour qu'elle s'adresse spécifiquement aux étudiants d'informatique. Il ne s'agit donc pas d'une UE de sensibilisation non-disciplinaire pour les utilisateurs du numérique, ni d'une sensibilisation au développement durable, terme problématique par ailleurs [4].

L'UE a été découpée en deux parties et nous présentons aussi dans la foulée les modalités d'évaluation.

Descriptif de l'UE

L'UE est composée de trois cours de 2 heures, sept travaux pratiques de 3 heures et une séance de 3 heures de lecture et présentation d'articles.

Cours 1 : impacts environnementaux du numérique

Il s'agit d'introduire les questions environnementales pour le numérique en partant des tendances historiques, incarnées dans les trajectoires d'efficacité des technologies numériques (lois de Moore ou de Koomey) et les promesses associées. Les impacts directs sont abordés tout d'abord au travers des enjeux énergétiques mais plus globalement en esquissant les principes des analyses de cycle de vie (ACV) qui prennent en compte toute la matérialité physique du numérique (ressources de métaux notamment). La controverse sur les trajectoires futures a été mentionnée [5] ainsi que les différentes solutions pour limiter les impacts, comme l'éco-conception mais aussi les limites de l'efficacité au travers des effets rebonds ce qui amène à présenter des enjeux non techniques sur l'usage du numérique, à commencer par la sobriété.

7. <https://EcoInfo.cnrs.fr/2020/09/30/referentiel-de-connaissances-pour-un-numerique-eco-responsable>.

Cours 2 : graphes, réseaux sociaux

Ce cours vient plus directement introduire les deux TP adossés à cette partie. Le parti pris est résolument plus technique puisqu'il s'agissait d'offrir à la fois 1) une description des réseaux sociaux, en particulier numériques, dans lesquels la société s'insère toujours plus depuis les années 2000 ; 2) le principe d'un algorithme phare, comme le *page-rank*, utilisé au quotidien par tout un chacun et dont la conception structure notre vie, avec de possibles biais. Ces deux thèmes mériteraient qu'on y passe plus de temps, notamment sur les enjeux non techniques mais il est néanmoins possible d'esquisser des questions fondamentales sur la non-neutralité des algorithmes [3].

Cours 3 : le protocole Bitcoin

Ce cours présente les mécanismes algorithmiques mis en œuvre dans le protocole Bitcoin pour répondre à un problème classique de l'informatique répartie : établir un ordre total et immuable sur des transactions de façon décentralisée et sans tiers de confiance. Ce protocole apparaît comme une grande réussite de plusieurs points de vue usuels : informatique (robustesse du protocole, simplicité), économique (nombreuses startups dont l'activité gravite autour du Bitcoin et d'autres cryptomonnaies fondées sur les mêmes principes, industries de production de matériel, de minage, etc.) et promesse de nouvel eldorado financier (cf. articles de la presse généraliste sur comment investir dans les cryptomonnaies⁸). Dans un second temps, le cours tente d'amener les étudiants à s'interroger sur la pression environnementale induite par le déploiement massif de ce protocole et de ses dérivés, non seulement du point de vue de la consommation énergétique de l'ensemble du système, mais aussi de l'empreinte de la production des matériels de minage et de leur renouvellement.

TP1 : introduction à l'analyse de cycle de vie des équipements numériques

Dans ce TP, les étudiants prennent conscience de l'impact énergétique de quelques appareils familiers (smartphone, portable, etc.) à l'aide de wattmètres. D'autres données sont collectées pour des équipements plus conséquents (superordinateurs), ainsi que les émissions GES de la phase de production, au travers notamment d'informations fournies par les constructeurs⁹. À partir de ces données, les étudiants sont en mesure d'avoir un ordre de grandeur de leur propre bilan carbone dans le domaine numérique. Les chiffres trouvés sont assez consistants, dans une fourchette de 150–500 kg eqCO₂.

8. https://www.lemonde.fr/argent/article/2022/08/02/quelles-cryptomonnaies-privilegier_6136900_1657007.html.

9. <https://www.dell.com/en-us/dt/corporate/social-impact/advancing-sustainability/sustainable-products-and-services/product-carbon-footprints.htm>.

TP2 : impact des vidéos

Ce TP s'appuie sur les publications du *Shift Project* sur l'impact des vidéos [10, 11]. Un objectif est de faire le lien entre l'expérience individuelle de chacun — conscience de la place de la vidéo dans ses usages quotidiens, des besoins de stockage et de débit associés — et les phénomènes globaux — 80 % des flux de données au niveau mondial seraient dus à la vidéo, les parts les plus importantes relevant des films et séries en VoD, de la pornographie et des vidéos publiques courtes type YouTube. Pour rendre cela tangible, le TP montre comment mesurer l'impact environnemental lié aux vidéos en utilisant le modèle *1Byte* [11] et sensibilise, manipulations à l'appui via *ffmpeg*, aux principaux paramètres d'encodage des vidéos et à leur impact sur la taille et la qualité subjective des vidéos produites. Dans la continuité du TP, les étudiants sont invités à étudier le rapport « Climat : l'insoutenable usage de la vidéo en ligne » [11] avec une évaluation par QCM ensuite. Alors que la partie pratique est technique, la lecture de ce rapport ouvre la réflexion sur les usages, les possibilités d'action à différents niveaux (techniques, réglementaires, politiques, etc.) et les problèmes sous-jacents (inégalités, liberté d'expression, neutralité du net, etc.).

TP3–4 : consommation énergétique du code, utilisation de la plateforme Grid5000

Dans ces deux séances, il s'agit d'évaluer la consommation énergétique de programmes en phase d'usage et de pouvoir procéder à une comparaison de langages, dans l'esprit de [7]. Les wattmètres du premier TP n'étaient pas adaptés à la configuration des salles machine du fait de la virtualisation des sessions utilisateur. Nous avons donc proposé aux étudiants de travailler sur la plateforme *grid5000*¹⁰ qui offre la possibilité de réaliser des travaux pratiques sur des clusters et de suivre la consommation énergétique des nœuds de calcul. La première séance consiste en une prise en main de cet environnement nouveau dans la formation des licences (protocole *ssh* etc.) puis à des premiers tests sur l'énergie consommée et les variations de température des nœuds. La seconde séance vise à comparer les performances de Java, C et Python sur un algorithme classique de tri rapide.

TP5 : graphes aléatoires et graphes réels

Ce TP vient illustrer la première partie du cours 2 et s'articule entre des notions de métriques globales de graphes (longueur moyenne des plus courts chemins, distribution des degrés, coefficient de clustering) et des modèles de graphes aléatoires (Erdős-Renyi, Watts-Strogatz, etc.). Une conclusion naturelle est de considérer une partie d'un vrai réseau social et de voir quel modèle lui correspond le mieux.

10. <https://www.grid5000.fr>.

TP6 : page rank

L'objectif de ce TP est de présenter aux étudiants les grands principes de l'algorithme *Page Rank*, et de l'utiliser pour illustrer les biais possibles des algorithmes de recommandation. Après quelques rappels sur le calcul de la distribution stationnaire d'une chaîne de Markov, une version simple de l'algorithme *Page Rank* est implémentée, en utilisant certaines fonctionnalités de la librairie `networkx`¹¹ pour la détection des puits. Cet algorithme est appliqué aux différents graphes générés dans le TP précédent. On implémente ensuite une ferme de liens, afin de montrer qu'il est possible de chercher à tromper l'algorithme *Page Rank*, et des évaluations empiriques sont réalisées sur un graphe de Barabasi-Albert.

TP7 : bitcoin

Ce TP vient en complément du troisième cours. Les objectifs sont de manipuler la blockchain Bitcoin et d'estimer la consommation électrique du système, notamment du minage. À l'aide d'une bibliothèque, les étudiants créent des transactions et les insèrent dans une blockchain fictive en procédant au minage de nouveaux blocs. Ils sont ensuite amenés à estimer le temps et le coût énergétique pour miner un nouveau bloc selon les paramètres actuels du réseau Bitcoin avec les matériels dont ils disposent (ordinateur personnel, serveur de l'université, carte graphique, etc.). Enfin, à partir d'API web qui collecte des données sur le réseau Bitcoin et de caractéristiques des matériels utilisés en pratique pour le minage, il s'agit d'estimer la consommation électrique du réseau et de la mettre en perspective de la consommation nationale d'un pays, en l'occurrence la Finlande.

Atelier de lecture d'articles

En lieu et place d'une nouvelle séance de travaux pratiques orientée sur de la programmation, il a semblé judicieux d'offrir un moment de lecture d'articles, suivi d'une restitution en groupe. Dix sujets ont été proposés à partir de sources variées (journaux grand public, rapports techniques, articles scientifiques) portant sur la 5G ou la 6G, les algorithmes d'affectation (type Parcoursup¹²), le bitcoin, le contrôle des algorithmes des GAFAM, le crédit social en Chine, démocratie et réseaux, les écrans et la réussite scolaire, récompense et dépendance numérique, vie privée et capitalisme de surveillance, wikipedia et *Non Fungible Token* (NFT). L'idée générale était de proposer des contenus non techniques, pour resituer la place de l'informatique et de ses applications dans l'écosystème social.

11. <https://networkx.org>.

12. https://services.dgesip.fr/T454/S764/algorithm_national_de_parcoursup.

Évaluation de l'UE

La question de l'évaluation d'une telle UE reste ouverte : qu'évalue-t-on et comment ? Peut-on définir des compétences associées à cet UE dans ce contexte ? N'est-ce pas plutôt l'engagement, le sérieux et les efforts qu'il faut susciter ? En plus d'une évaluation classique des travaux pratiques (sous forme de compte-rendus, notebook ou code), nous avons proposé deux courts QCM ; l'un portant sur l'impact des vidéos, l'autre sur l'évolution de l'internet des objets¹³. L'expérience montre que les étudiants ont joué le jeu de la lecture, qu'il s'agisse de la préparation à l'avance des QCM ou de la séance de TP débranchée, avec une réelle implication.

Analyse

Après une première édition de cette UE, nous pouvons d'ores et déjà faire plusieurs constats, qui feront parfois écho à certains points abordés dans [6].

Retour des étudiants

À ce stade, nous n'avons pas de vision globale sur l'appréciation de l'UE et de sa pertinence par les étudiants. Néanmoins, deux réactions nous ont marqués.

D'une part, avant le démarrage de l'UE, certains ont exprimé la crainte d'un cours de culture générale, de sociologie ou d'histoire au détriment de l'acquisition de compétences techniques. D'autre part, au fil des échanges et des séances, nous avons remarqué un décalage entre l'idée d'une génération inquiète des questions environnementales et le techno-optimisme observé à plusieurs reprises chez les étudiants. À titre d'exemple, dans le contexte du rapport sur l'IoT où sont présentés à la fois les bénéfices et les risques, à la question de QCM « L'internet des objets vous paraît-il intéressant pour la société en termes de balance des bénéfices et des risques ? », les 118 réponses se répartissent comme suit : « oui » pour 61%, « j'ai besoin de plus de connaissance pour me faire un avis » pour 35%, « non » pour 4%.

Ces résultats nous ont poussés à nous interroger sur les représentations et valeurs véhiculées par nos cursus. Car ces étudiants fréquentent l'université depuis trois ans et c'est en grande partie à notre contact qu'ils ont élaboré leur appréhension du rôle des sciences et des techniques. La vision « progressiste » particulièrement répandue dans notre communauté n'est certainement pas sans lien avec le parti pris techno-optimiste majoritaire décelé par le sondage précité. D'autant que le système universitaire favorise une forme d'enfermement disciplinaire qui n'encourage pas les étudiants à un retour réflexif sur leur propre discipline. Nous sommes ici au cœur de problématiques — finalités de la science, neutralité axiologique, valorisation de

13. <https://www.strategie.gouv.fr/publications/monde-de-linternet-objets-dynamiques-maitriser>.

l'esprit critique, citoyenneté du scientifique — qui mobilisent des collectifs universitaires comme « labos1point5¹⁴ » ou les ateliers d'écologie politique¹⁵ dont nous avons tout intérêt à entendre les analyses.

Quelle place pour la technique ?

Nous avons fait le constat que le contenu des TPs penchait fortement du côté de la technique. Les étudiants ont parfois passé trop de temps sur des problèmes de programmation en se détournant des enjeux. Cela questionne à nouveau nos attachements à un contenu disciplinaire que nous maîtrisons davantage et souligne une difficulté à s'emparer de problématiques non-disciplinaires. Il y a à la fois un enjeu de légitimité et de compétences pédagogiques [6].

Se pose ainsi une question importante sur la place de la technique dans cette UE. Nous avons voulu nous appuyer sur les compétences techniques des étudiants et les développer. Celles-ci contribuent, en effet, de manière décisive à une compréhension fine des usages du numérique et de leurs conséquences. Par exemple, on peut utiliser les compétences en programmation pour l'éco-conception [2] ou des compétences techniques sur la gestion de la vie privée pour une information rationnelle des citoyens [8].

Pour autant la problématisation des enjeux du numérique n'est pas réductible à la compréhension de ses aspects techniques. Un de nos objectifs d'évolution des contenus vise à davantage proposer aux étudiants des activités de réflexion et de prise de recul qui s'appuient sur leurs compétences techniques plutôt que de les mettre dans des situations de résolution de problèmes techniques. Par ailleurs, les enjeux abordés comportant des dimensions éthiques, philosophiques, sociologiques, économiques, il est souhaitable de convoquer d'autres disciplines sur lesquelles les enseignantes et enseignants d'informatique ne sont pas experts, démarche nécessitant une pluridisciplinarité dont nous avons déjà souligné le manque dans la partie précédente.

Autres pratiques pédagogiques au service de contenus pluri-disciplinaires

Il existe de nombreux sujets qui partent de propriétés du monde informatique et débouchent sur une vision plus large. Ainsi, l'article [1] cherche à comprendre ce paradoxe souvent décrit : pourquoi observe-t-on simultanément un progrès quasi continu dans l'efficacité des processeurs (loi de Moore et loi de Koomey) et un impact écologique croissant du secteur numérique au niveau mondial ? Invoquer l'augmentation des usages répond en partie au problème. Mais en creusant le sujet, les auteurs soulignent l'importance de l'innovation d'un côté et la nécessité de l'autre d'avoir des investissements toujours plus importants, financés notamment par des stratégies d'obsolescence et de fabrication de nouveaux usages.

14. Qui vise à réduire l'empreinte des activités de recherche sur l'environnement, <https://labos1point5.org>.

15. Issus de celui de Toulouse <https://atecopol.hypotheses.org/>.

Cet exemple illustre, comme on l'a déjà dit, le recours au point de vue d'une autre discipline, ici l'économie. D'autre part, l'exemple soulève des questions qui ne font pas nécessairement consensus dans la communauté. Cependant, la mise en débat n'est pas en soi une mauvaise chose et permet de développer l'aspect critique des étudiants. Il s'agit là d'aborder des questions politiques (*politikos*, ce qui concerne l'organisation d'une société) dans l'enseignement comme cela est discuté favorablement dans [6].

Une manière de sensibiliser les étudiants à des sujets complexes et ramifiés disciplinairement passe aussi par des formes pédagogiques nouvelles. Celles-ci peuvent trouver leur inspiration du côté d'ateliers pratiques mis en place par des collectifs comme la fresque du climat¹⁶ ayant donné naissance à de nombreuses variantes dont la fresque du numérique¹⁷. Ces ateliers ouverts à la société civile ont également vu une déclinaison tournée vers le monde académique pour questionner le sens de l'activité de recherche au regard des enjeux liés à l'Anthropocène [9]. Au travers de jeux d'intelligence collective, ce type d'ateliers permet d'autres modalités d'échange entre les étudiants, en partageant leurs regards sur une question, au travers de matériel plus ou moins sophistiqué, par exemple des cartes à agencer et relier. L'intérêt des ces approches est multiple, qu'il s'agisse d'avoir une activité un tant soit peu dénumérisée ou de travailler en groupe. Les lectures d'extraits de textes de SHS proposés dans les ateliers SEnS[9] comme point de départ de discussion ou débats permettraient également des interactions en petits groupes. Enfin, si nous avons eu quelques retours sur le fait que la lecture dans les études d'informatique n'était plus habituelle, étudiants comme enseignants ont trouvé l'exercice profitable. Revenir à des activités de lecture et développer des compétences d'analyse et de synthèse nous semble primordial pour atteindre nos objectifs.

Conclusion

Cet article présente une tentative de traitement, dans un cursus d'informatique, de la question des impacts environnementaux et sociétaux du numérique. Nous insistons sur l'importance de la pluri-disciplinarité dans un tel projet et le fait qu'il comporte des difficultés pratiques auxquelles notre communauté sera de plus en plus confrontée et qui pourront être surmontées par des initiatives de partage d'expérience ou des propositions de référentiels. Il est probable que dans les prochaines années, il y ait de plus en plus de besoins en compétences liées à l'éco-conception, à la fois lors de l'arrivée sur le marché de l'emploi, mais aussi dans le cadre de réorientations de carrière. Ainsi, en plus d'une réforme de certains contenus d'enseignement et de nouvelles expériences pédagogiques, il pourra être bénéfique de préparer les étudiants à un monde qui connaîtra des bouleversements avec une incertitude sur les

16. <https://fresqueduclimat.org>.

17. <https://www.fresquedunumerique.org>.

trajectoires possibles, de la technologie verte au *low-tech*¹⁸. Les supports de cours sont accessibles sur internet¹⁹ et les corrigés disponibles sur demande à Julien Lefèvre.

Remerciements

Les expériences présentées dans cet article ont été effectuées en utilisant la plateforme Grid’5000²⁰, soutenue par un groupement d’intérêt scientifique organisé par Inria, le CNRS, RENATER et plusieurs universités ainsi que d’autres organisations. Nous remercions les membres du groupe formation d’Ecoinfo qui ont permis des partages d’expérience et de matériel pour l’élaboration de cette UE.

Références

- [1] David Bol, Thibault Pirson, and Rémi Dekimpe. Moore’s law and ICT innovation in the Anthropocene. In *2021 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*, pages 19–24. IEEE, 2021.
- [2] Cyrille Bonamy, Cédric Boudinet, Laurent Bourgès, Karin Dassas, Laurent Lefèvre, Benjamin Nissasi, and Francis Vivat. L’écoconception d’un service numérique : des actions pour réduire l’impact environnemental du numérique. *1024 : Bulletin de la Société Informatique de France*, (19) :59–68, 2022.
- [3] Dominique Cardon. Le pouvoir des algorithmes. *Pouvoirs*, (1) :63–73, 2018.
- [4] Fabrice Flipo. Les trois conceptions du développement durable. *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie*, 5(3), 2014.
- [5] Charlotte Freitag, Mike Berners-Lee, Kelly Widdicks, Bran Knowles, Gordon S Blair, and Adrian Friday. The real climate and transformative impact of ICT : A critique of estimates, trends, and regulations. *Patterns*, 2(9) :100340, 2021.
- [6] Anne-Laure Ligozat, Kevin Marquet, Aurélie Bugeau, Julien Lefevre, Pierre Boulet, Sylvain Bouveret, Philippe Marquet, Olivier Ridoux, and Olivier Michel. How to integrate environmental challenges in computing curricula? In *Proceedings of the 53rd ACM Technical Symposium on Computer Science Education V. 1*, pages 899–905, 2022.
- [7] Rui Pereira, Marco Couto, Francisco Ribeiro, Rui Rua, Jácome Cunha, João Paulo Fernandes, and João Saraiva. Energy efficiency across programming languages : how do energy, time, and memory relate? In *Proceedings of the 10th ACM SIGPLAN International Conference on Software Language Engineering*, pages 256–267, 2017.
- [8] Abbas Razaghpanah, Rishab Nithyanand, Narseo Vallina-Rodriguez, Srikanth Sundaresan, Mark Allman, Christian Kreibich, Phillipa Gill, et al. Apps, trackers, privacy, and regulators : A global study of the mobile tracking ecosystem. In *The 25th Annual Network and Distributed System Security Symposium (NDSS 2018)*, 2018.
- [9] Eric Tannier, Vincent Daubin, and Sophie Quinton. La crise de l’esprit scientifique : une enquête, une tragédie, une redistribution collective des rôles. *Les Cahiers de Framespa. e-STORIA*, (40), 2022.

18. Voir par exemples les quatre scenarios de neutralité carbone proposée par l’ADEME <https://transitions2050.ademe.fr>.

19. <https://amubox.univ-amu.fr/s/jmPEfaFAM6wkLwi>.

20. <https://grid5000.fr>.

- [10] The Shift Project. Lean ICT - Pour une sobriété numérique. <https://theshiftproject.org/article/pour-une-sobriete-numerique-rapport-shift/>, October 2018.
- [11] The Shift Project. Climat : l'insoutenable usage de la vidéo en ligne. <https://theshiftproject.org/article/climat-insoutenable-usage-video/>, July 2019.