

Les enjeux environnementaux et sociétaux en microélectronique

Impacts sur la formation

M. Robert^a, L. Torres^a, J.-L. Bantignies^b, R. Laffont^c

^a Université de Montpellier, Polytech Montpellier, LIRMM, Pôle CNFM, Montpellier France

^b Université de Montpellier, Polytech Montpellier, L2C, Montpellier, France

^c Aix Marseille Université, Polytech Marseille, IM2NP, Pôle CNFM, Marseille, France

Contact email : michel.robert@umontpellier.fr

Le monde numérique n'est pas immatériel : sa réalité physique a un impact environnemental, sociétal et énergétique croissant au vu de nos usages. Ces enjeux représentent des défis, des menaces mais aussi des opportunités. Après avoir exposé les limites et les impacts des technologies actuelles du monde numérique, nous décrirons quelques exemples d'innovations et d'opportunités, ainsi que quelques pistes pour la prise en compte de ces enjeux dans la formation des étudiants pour un numérique responsable et soutenable.

I. Contexte

Nous sommes actuellement confrontés à une conjonction d'événements sans précédent dans l'histoire de l'humanité : mondialisation et conséquences environnementales, industrielles et sociétales, crises, conflits et prise de conscience des limites des ressources de la planète, des progrès technologiques, et de l'accélération de la société du numérique. Ces enjeux environnementaux et sociétaux représentent des défis, des menaces mais aussi des opportunités, dans un monde complexe et incertain (1).

Les enjeux DDRS (Développement Durable et Responsabilité Sociétale) ont conduit ces dernières années à des initiatives nombreuses comme par exemple le *Shift project*(2), *Time for the Planet* (3) et dans le secteur des technologies de l'information et de la communication, l'Institut du numérique responsable(4) ou *greenIT*(5) et bien d'autres initiatives voient le jour. *Time for the Planet* a par exemple identifié 20 problèmes à résoudre qui interpellent l'ensemble de la communauté micro-nanoélectronique, des technologies aux circuits, systèmes et usages (Tableau 1).

Si les avantages des technologies numériques sont bien connus, le côté « obscur » doit être aussi considéré avec les impacts environnementaux sur le cycle de vie des équipements : GES (gaz à effet de serre), consommation électrique, ressources en eau et en matériaux/minières, responsabilité sociétale (exploitation humaine), pollutions, ...etc. Les transitions numériques et énergétiques sont par ailleurs indissociables, et s'inscrivent dans des dimensions locales (métropoles) et globales (Régions, Nations, Planète).

TABLEAU I. 20 Défis environnementaux (Source: *Time for the Planet*).

	Zéro émission	Efficacité énergétique	Sobriété	Captation
Énergie	Produire et stocker les énergies renouvelables sans métaux critiques/rares	Améliorer le taux de retour énergétique des solutions renouvelables	Décentraliser la production et rendre le réseau intelligent	Capter les GES émis par les centrales
Industrie	Fabriquer des matériaux sans sources fossiles	Récupérer et utiliser la chaleur fatale	Augmenter la durée de vie des biens et recycler	Capter les GES émis par les usines
Transport	Se déplacer sans utiliser de combustibles fossiles	Améliorer les performances énergétiques des véhicules	Optimiser les déplacements des biens et des personnes	Capter les GES émis par les véhicules
Agriculture	Cultiver sans engrais azotés	Restructurer les terres agricoles	Développer les alternatives à la consommation de viande	Sécuriser et développer les puits de carbone naturel
Bâtiment	Construire avec des matériaux bas carbone	Chauffer et climatiser sans HFC ni combustibles fossiles	Rénover maisons et bâtiments	Séquestrer le carbone

Le monde numérique n'est en effet pas immatériel (6) : sa réalité physique représente 10% de la production mondiale d'électricité et des pollutions multiples. En 2020, l'univers numérique français est constitué d'environ 631 millions d'équipements utilisés par 58 millions de personnes, soit une moyenne de 11 équipements par utilisateur. En 2020, les impacts environnementaux du numérique français sont de l'ordre de 180 TWh, 24 millions de tonnes de gaz à effet de serre, 559 millions de m³ d'eau douce et en considérant par ailleurs l'épuisement des ressources abiotiques.

Au niveau législatif, la loi récente n°2021-1485 du 15 novembre 2021 (7) visant à réduire l'empreinte environnementale du numérique en France couvre un périmètre pertinent :

- *Faire prendre conscience aux utilisateurs de l'impact environnemental du numérique (Articles 1 à 4),*
- *Limiter le renouvellement des terminaux (Articles 5 à 23),*
- *Faire émerger et développer des usages du numérique écologiquement vertueux (Articles 24 à 27),*
- *Promouvoir des centres de données et des réseaux moins énergivores (Articles 28 à 33),*
- *Promouvoir une stratégie numérique responsable dans les territoires (Articles 34 à 36).*

La formation « comporte également une sensibilisation à l'impact environnemental des outils numériques ainsi qu'un volet relatif à la sobriété numérique ».

Paradoxalement, le numérique apporte des solutions pertinentes pour accompagner la transition écologique : observation, capteurs et analyses en temps réel, gestion,

modélisation, optimisation ... mais aussi pour les territoires, le secteur économique et industriel et des domaines d'application comme la santé ou l'agriculture. Cette métamorphose de l'écosystème numérique est donc source de menaces et d'opportunités !

Nous évoquons dans la suite les limites des technologies actuelles, des exemples d'innovations et d'opportunités à l'échelle des territoires métropolitains, ainsi que quelques pistes pour la prise en compte des enjeux DDRS au sein de l'ESR et notamment dans la formation des étudiants pour un numérique responsable et soutenable. Certainement que le numérique est à la fois remède et poison (le « pharmakon » de Bernard Stiegler (8) : s'il peut faciliter les activités quotidiennes et l'accès à la connaissance, il peut également nuire aux équilibres planétaires.

II. Les limites des technologies de la microélectronique : ressources matérielles, énergie, usages, impacts DDRS

II.1 Analyse (Sociale) du cycle de vie

Certainement qu'avec le numérique nous avons oublié de considérer quelques fondamentaux. En effet si dans nombre d'industries l'analyse du cycle de vie a été instaurée, c'est le cas par exemple dans l'industrie automobile qui est assez normée, il se trouve que pour le numérique il est actuellement plus difficile d'identifier finement les éléments indispensables à la production des systèmes connectés. Cela reste un défi, les ressources minières sont dispersées géographiquement ainsi que les usines d'assemblage, la provenance des composants sont multiples, la conception même se fait d'une manière complètement mondialisée. Il est pourtant essentiel, quel que soit le produit par ailleurs, de disposer d'une analyse de cycle de vie d'un produit du berceau à la tombe, en passant par sa fabrication, distribution, et usages. C'est cette vision globale qui permettra de disposer d'une vision globale pour en mesurer le réel impact. Par exemple il est commun de trouver que 70 à 80 kg de minerais sont nécessaires pour la fabrication d'un smartphone, soit plus de 600 fois son poids ! Ce seul impact est à considérer, car l'extraction de minerais implique des impacts environnementaux et sociaux majeurs. Par exemple le Cobalt (9), minéral que l'on retrouve dans nos objets connectés, et plus largement dans les batteries, provient majoritairement de la République Démocratique du Congo. Ce composé toxique, avec des mines à ciel ouverts, et une extraction non ou mal contrôlée est à l'origine de risques sanitaires importants pour les mineurs et les populations situées dans les zones concernées. Nous pourrions également aborder la disponibilité du cuivre dans les prochaines décennies, car les prédictions actuelles amènent à une raréfaction de la réserve (10) de cette matière première d'ici 20 à 30 ans. Bien évidemment nous pouvons citer de nombreux autres exemples, et la course aux métaux rares pour nos systèmes numériques ne fait que commencer (11). Nous aborderons dans la section suivante d'une manière un peu plus détaillée les aspects fabrication de ces objets, mais si nous avons fait un premier constat sociétal et environnemental connu des ressources minières, il apparaît que la fin de vie de nos objets connectés n'est guère reluisante (12). En effet, au niveau mondial, il est estimé que seulement 20% des déchets électroniques sont correctement collectés et recyclés au niveau mondial (de l'ordre de 40% en Europe). Même avec un niveau de recyclage de 100% et des filières bien établies, répondant à des normes sérieuses, le recyclage ne permettrait pas de répondre à la demande future en ressource minière.

Inutile également de rappeler les conditions dans lesquelles certains de ces déchets sont exploités en fin cycle de vie pour récupérer ces précieux métaux, provoquant des pollutions importantes (Mercure, Arsenic, Plomb etc.).

Ainsi, si l'on considère les étapes en amont et en aval du processus de fabrication, se pose la question de notre responsabilité sociétale et cela doit nous interpeller sur la traçabilité des opérations et sur les normes éthiques à promouvoir.

Une approche systémique sur la production de l'ensemble des objets numériques est plus que jamais d'actualité et doit nécessairement faire partie d'une politique globale, état, région, territoire, entreprise, mais également de formation. Remettre les enjeux de l'analyse (social) de cycle de vie dans le cadre de la formation, est donc un enjeu essentiel pour comprendre ces enjeux planétaires.

II.2 Impact de la fabrication des objets numériques

La question à se poser est : quel est l'impact de la fabrication de nos objets numériques ? pour cela, une première approche, certainement critiquable car elle ne considère pas tous les aspects environnementaux, est d'utiliser la métrique carbone (principal composé des GES). En 2020 l'ADEME a publié des données sur la fabrication et l'équivalent kg CO₂ émis par la fabrication des objets numériques, sans que la liste soit exhaustive, le Tableau II résume cet impact au regard de la production mondiale.

Le constat est relativement simple en considérant ces quelques objets : l'impact kg CO₂eq est de l'ordre de 450 Millions de tonnes en 2020, dont une part prépondérante provient de l'objet le plus commun qui est le Smartphone. Une simple comparaison montre qu'il s'agit là d'un impact équivalent à la fabrication mondiale en 2020 du parc automobile. Bien évidemment, cet impact est à relativiser par rapport à l'impact gaz à effet de serre global mondial, puisque celui-ci représente in-fine que quelques pourcents (<5%). Cependant l'évolution actuelle du nombre d'objets connectés et ou de systèmes numériques ne cessent de croître et les prévisions montrent clairement un impact notable dans les dix prochaines années. N'oublions pas que nous parlons de fabrication et non d'usage, et comme précisé au début de cette section l'analyse du cycle de vie impose une étude fine sur l'usage, qui est nettement plus complexe dès que les échanges de données sont à considérer.

TABLEAU II. Impact CO₂eq des objets numériques (Source ADEME 2020) (13).

Année 2020	Production	Impact CO ₂ eq (kg) unitaire	Impact global CO ₂ eq (Kg)
SmartPhone	1,5 10 ⁹	35	52,5 10 ⁹
PC	220 10 ⁶	220	48,4 10 ⁹
Tablette	70 10 ⁶	70	4,9 10 ⁹
TV	400 10 ⁶	400	160 10 ⁹
Ecran (hors TV)	250 10 ⁶	250	62,5 10 ⁹
Montres connectés	10 10 ⁶	10	0,1 10 ⁹
Imprimantes	100 10 ⁶	110	110 10 ⁹
Consoles	70 10 ⁶	70	4,9 10 ⁹

II.3 Conception et systèmes intégrés.

Au cœur de ces systèmes se trouvent des circuits et systèmes intégrés. Depuis des années une attention toute particulière est portée quant à leur conception afin d'assurer la meilleure efficacité énergétique. D'un point de vue technologique en un peu plus de 10 ans (Figure 1)

l'évolution des technologies a permis une véritable augmentation des performances tout en contrôlant l'énergie nécessaire pour que ces systèmes répondent aux besoins actuels des applications

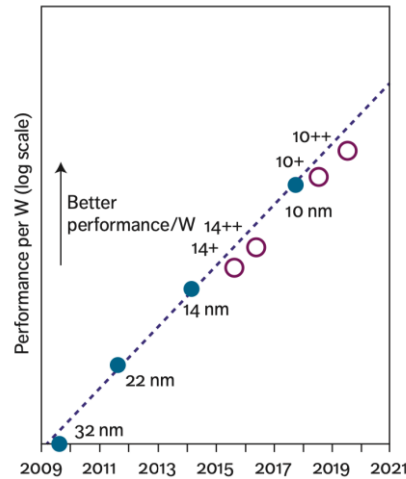


Fig. 1 : évolution de l'efficacité énergétique en fonction des nœuds technologiques (14).

Cette évolution a permis l'avènement de nouvelles technologies, même si le concept de base reste identique, à savoir disposer d'un « interrupteur » (transistor) à coupler avec une logique booléenne bien connue de tous les électroniciens. Cependant cet interrupteur n'est pas idéal, et les technologies se succèdent pour trouver le meilleur compromis entre performance et énergie, la Figure 2 montre à quel point la recherche industrielle et académique a été créative pour disposer d'un dispositif élémentaire le plus parfait possible.

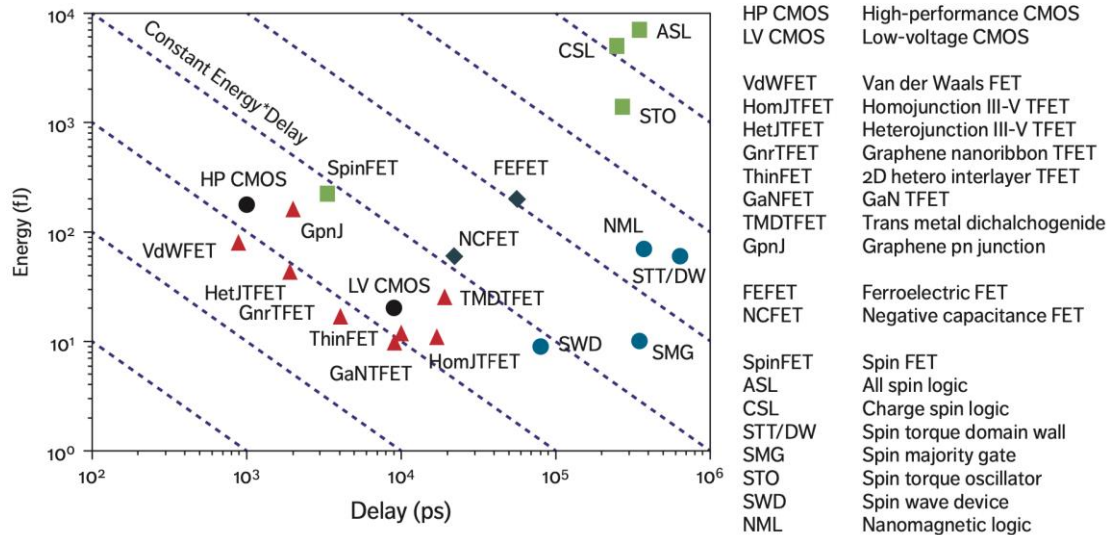


Fig. 2 : évolution des caractéristiques des dispositifs élémentaires (14).

En contrepartie, ces évolutions technologiques ont vu le nombre de transistors suivre la loi de Moore, pour atteindre comme sur le dernier processeur d'Apple, plus de 30 milliards de transistors ! Il s'agit là d'un effet rebond, bien connu dans les évolutions scientifiques, amenant une incessante densité de transistors au mm^2 , mais également des puces de plus en plus importantes en surface (plusieurs cm^2). Ainsi ces exploits technologiques ont permis un autre type de densité au niveau des infrastructures de calcul, et une croissance exponentielle du nombre de circuits intégrés dans les objets connectés.

Aujourd'hui il reste un espace de recherche important à considérer, allant du système à la technologie, et les pistes d'améliorations sont multiples et interconnectées :

- *Algorithmie - Logiciel : Compilateurs plus performants, Meilleure gestion du parallélisme, optimisation du code...*

- *Architecture - Algorithmie : Calculs inexacts, processeurs spécialisés, nouvelles mémoires, accélérateurs spécifiques, In memory computing, architectures bio-inspirées ...*

- *Circuit : autres styles de logique, asynchrone, adiabatique, crossbar ...*

- *Technologie : nouveaux transistors, diminution de la consommation statique, nouvelles technologies, nouveaux matériaux (2D), organique ...*

Tout cela pour augmenter la capacité de calcul, mais au final le calcul n'est pas la véritable source à combattre, car nombre d'études montre qu'il ne représente qu'une partie minoritaire de la consommation de ces systèmes. Le véritable défi reste d'acheminer la donnée (donc de la mémoire) vers les opérateurs de calcul. Il est estimé que dans les applications mobiles quasi 70% de la consommation (15) est induite par les transferts de données. Dans les faits, une donnée est toujours « éloignée » des opérateurs de calcul, y compris en interne d'un circuit intégré, et un accès mémoire (et selon l'architecture mémoire mise en place) coûte plus de 100 fois l'énergie d'une simple addition. Il est donc nécessaire de changer le paradigme, et de rapprocher le calcul de la mémoire, le *In-memory computation* doit être un effort de recherche intensif afin de limiter drastiquement l'énergie globale de nos systèmes intégrés. Cette approche nécessite de relever de nombreux défis : comment concevoir des unités mémoire/calcul cohérentes ? Comment décentraliser les données et le calcul ? Quelles sont les interfaces matérielles et logicielles à développer ? Quel compilateur ? Quel langage ? Comment adapter ces nouvelles architectures aux applications actuelles ? Quels fondements théoriques ? Autant de sujets de recherche à relever, pour que les circuits intégrés « se verdissent » afin de proposer et conserver des usages en adéquation avec les enjeux du numérique responsable.

III. Exemple d'innovation DDRS à l'échelle des territoires métropolitains

Le développement des villes intelligentes (« smart-cities ») doit considérer l'irrigation des moyens numériques et énergétiques en adéquation avec les enjeux de développement durable et de responsabilité sociétale. La question des infrastructures et des usages pour un numérique responsable et soutenable aura ainsi un impact certain dans l'organisation urbanistique des métropoles, des quartiers et des bâtiments.

On considérera ici deux exemples de défis au sein d'une métropole : la gestion des données et des moyens de calcul (data centers), et sur notre littoral les enjeux liés aux zones portuaires.

III.1 Verdissement de centre de données et de calcul

La réalité physique du monde numérique pose par ailleurs la question des ressources énergétiques nécessaires à ces infrastructures et aux usages les plus voraces en énergie. Le *cloud computing* conduit à une explosion de la circulation des données sur les réseaux interconnectés avec un point de focalisation sur les data centers qui matérialisent les services numériques sous toutes leurs formes. La densité énergétique induite par le principe même de concentration au sein de ces infrastructures produit une empreinte carbone préoccupante. Les alternatives existantes à ce jour dans la gestion des data centers, que ce soit en rachetant des énergies vertes ou en installant des infrastructures dans des « pays froids » ne répondent que partiellement à ces défis. En outre, dans les prochaines années le

déploiement d'infrastructures de calcul et de stockage de données devrait s'intensifier dans les villes, notamment du fait de l'intérêt croissant que suscitent des paradigmes comme le edge computing. Ce dernier préconise le traitement de données au plus près des périphériques qui les génèrent, sur des serveurs locaux. Cela favorise la sécurité et la protection des données, ainsi que leur souveraineté, comparé à une infrastructure de type cloud complètement dématérialisée. Cette métamorphose de l'écosystème numérique dans les villes entrainera une augmentation notable des besoins énergétiques pour suivre les besoins des équipements numériques (ordinateurs, équipements réseaux etc.).

Les travaux de recherche menés au Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier couplent en « circuit court numérique » la production et le stockage des données avec les énergies vertes pour la gestion locale des données et des services offerts aux usagers à l'échelle d'un territoire ou d'une « ville intelligente » (« smart city »). Ce concept est en rupture avec le schéma historique, à la croisée des chemins entre calcul, énergies renouvelables et réseaux de distribution intelligents. Cette technologie qui a fait l'objet d'un brevet (16) redéfinit le concept même d'alimentation électrique en cassant le schéma traditionnel basé sur l'acheminement de l'énergie depuis un producteur vers des consommateurs. Un tel système prend la forme d'un ensemble d'unités autonomes interconnectées, chacune étant dotée de capacités de récupération d'énergie (panneaux photovoltaïques) associées à des batteries et des ressources informatiques. Ces unités assemblées en réseau ont la spécificité d'opérer du transfert d'énergie : flux de données et d'énergie transitent dans le système de manière indifférenciée, permettant ainsi une diminution drastique de la consommation électrique tout en fournissant le service numérique attendu. Un prototype de ce système opéré à distance a été déployé sur la toiture de l'école polytechnique universitaire de Montpellier (Polytech Montpellier) pour mesures in-situ, et démonstration de la possibilité de construire des systèmes distribués capables d'offrir des services numériques analogues aux solutions actuelles tout en diminuant la consommation d'énergie. Un domaine d'application concerne la possibilité de construire un data center « vert » installé au cœur d'une installation de panneaux photovoltaïques, pour permettre ainsi de disposer de ressources de calculs et de stockage de données à l'échelle locale. Dans ce contexte une réflexion sur l'intégration de cette technologie dans la ville est en cours avec des architectes et des urbanistes.

III.2 Verdissement de zone portuaire

L'innovation DDRS à l'échelle des territoires métropolitains n'est plus une option, c'est aujourd'hui une obligation. Parmi les acteurs des territoires, les grands ports maritimes jouent un rôle majeur dans l'aménagement des métropoles concernées. Ils exercent leurs activités à l'intérieur d'un périmètre géographique propre et traitent plus de 80 % du trafic maritime de marchandises. En métropole française 7 grands ports assurent l'activité : Dunkerque, Le Havre, Rouen, Nantes Saint-Nazaire, La Rochelle, Bordeaux et Marseille. Depuis 2008 et la loi sur la réforme portuaire (17) ces grands ports voient leur modèle évoluer pour devenir des ports aménageurs dans lesquels ils ont la charge de l'aménagement, de la mise en valeur économique et environnementale de leur domaine, en complément de leurs missions régaliennes d'autorité portuaire. Cette transformation implique la définition et mise en œuvre de nouvelles compétences, nouvelles technologies et nouveau modèle économique associé (18).

Ces transformations sont aujourd'hui incontournables et s'accroissent au regard des enjeux stratégiques et de la croissance du transport maritime qui représente près de 80% des échanges de marchandises sur la planète en volume et 70% en valeur. Ainsi pour s'adapter et répondre à la fois aux grands enjeux économiques, écologiques et sociétaux,

les grands ports se transforment en Smart Port. Ces smart port visent à répondre à la fois à la réduction des émissions de gaz à effet, l'amélioration de l'efficacité logistique, le transport multimodal et le développement d'une approche collaborative et digitalisée.

Parmi ces Smart Ports, Marseille se positionne dorénavant comme « un port vert au service d'une économie bleue » (19) avec pour ambition de devenir un port fluide, vert, à énergie positive, innovant et créateur d'emplois. Ce projet d'un territoire fédère des acteurs publics et privés et rassemble les stratégies de développement économique de la métropole au service de l'emploi et de l'amélioration continue du cadre de vie. Il associe notamment deux filières majeures d'emplois (sur la métropole d'Aix Marseille Provence avec 41.500 emplois du Maritime et de la Logistique et 40.000 emplois du Numérique. Au travers de ces filières ce sont par exemple des groupes comme CMA-CGM, Sopra-Stéria, Bourbon Offshore, ST Microelectronics, Chantier Naval de Marseille ou Digitick qui s'impliquent et développent de nouvelles collaborations public/privé.

Ce projet de smart port connecte ainsi des exigences diverses (environnement du port, logistique, énergie et numérique) autour de défis comme la logistique intelligente et performante, l'excellence industrielle et énergétique au service de la performance environnementale et la mise en œuvre d'une offre digitale aux plus hauts standards mondiaux. Ainsi des espaces d'échanges entre le monde académique et le monde socio-économique permettent d'accompagner les défis en mobilisant des laboratoires de recherche, étudiants et professionnels socio-économique. La microélectronique est au centre de ces projets en fédérant une trentaine d'acteurs de l'écosystème, des laboratoires de recherche (notamment le LIS UMR 7020, le CINAM UMR 7325 ou l'IM2NP UMR 7334) et en proposant les solutions technologiques pour relever ces défis.

Depuis le lancement en 2019 du French Smart Port In Med, c'est déjà 15 Start Up et PME de l'écosystème qui ont proposé des solutions concrètes au travers de leur savoir-faire sur le secteur du numérique et de la transition écologique. Nous pouvons citer deux exemples d'actions intégrant des solutions IOT : le développement d'un système global de Contrôle des navires et des infrastructures portuaires porté par la société NAVAL Group et la Sécurisation des Smart Containers pour limiter leur immobilisation en automatisant certaines opérations de contrôle grâce un système complémentaire de sécurisation porté par la société TRAXENS.

Les perspectives pour les prochaines années montrent que la place de la microélectronique et de ses applications va encore augmenter au sein de ce Smart Port. Le port se positionne pour l'avenir comme un hub de données numériques avec la création de nouvelles filières de l'économie digitale pour générer de la valeur et de nouvelles sources d'emploi : l'implantation de data centers, comme le « MRS4 » d'Interxion, de l'infrastructure d'atterrissage de câbles sous-marins, et demain de nouveaux services liés au déploiement de la technologie 5G, intelligence artificielle et blockchain.

IV. Quelques pistes pour la prise en compte des enjeux DDRS dans la formation des étudiants pour un numérique responsable et soutenable.

La mise en place d'une dynamique de Développement Durable et de Responsabilité Sociétale (DD&RS) dans les établissements d'enseignement supérieur n'est pas nouvelle.

L'article 55 de la loi n°2009-967 de programmation du 3 août 2009 relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement, dite "Grenelle 1", impose à tous les établissements d'enseignement supérieur la mise en place d'une démarche de développement durable au travers d'un Plan Vert. À cet effet, le Plan Vert s'est matérialisé par un outil appelé référentiel national DD&RS en 2010. Le référentiel est un outil mis à la disposition de tout établissement d'enseignement supérieur et de recherche décliné en 5 axes (Stratégie et

gouvernance, Enseignement et formation, Recherche et Innovation, Environnement, Politique sociale) (19). C'est un outil d'aide à l'élaboration d'une démarche et d'auto-évaluation des actions de développement durable.

Plus spécifiquement sur le volet dédié à la responsabilité sociale, la création, dans la loi ESR du 22 juillet 2013, d'un 5ème service commun au sein des universités en charge de « l'organisation des actions impliquées par la responsabilité sociale de l'établissement » (art. 55 de la loi ESR du 22 juillet 2013) insiste sur le rôle social et sociétal de l'Université. De plus, L'ajout dans les missions de l'ESR de la responsabilité sociale des établissements (RSE) (article 11 de la loi ESR du 22 juillet 2013) qui insère dans l'article L. 123-6 du code de l'éducation en 4ème alinéa : « Il (le service public de l'ESR) promeut des valeurs d'éthique, de responsabilité et d'exemplarité ».

Plus récemment, une mobilisation étudiante remarquable sur les questions de formation au DD&RS a vu le jour. Le Manifeste étudiant pour un réveil écologique, signé par plus de 30 000 étudiants en 2019 est le symbole le plus emblématique (20). Dans la continuité en 2020, la Consultation nationale étudiante, portée par le Réseau Français des Etudiants pour le Développement Durable (REFEDD), est venu réaffirmer ce message puisque 69% des sondés déclarent souhaiter être mieux formés aux enjeux environnementaux (21).

De manière concomitante en 2019, une proposition de loi « relative à la généralisation de l'enseignement des enjeux liés à la préservation de l'environnement et de la diversité biologique et aux changements climatiques dans le cadre des limites planétaires » a vu le jour (22).

Par ailleurs des organisations au service de la formation des ingénieurs comme la Conférence des Directeurs des Ecoles Françaises d'Ingénieurs (CDEFI) ou la Commission des titres d'ingénieur (CTI), ont également lancé une réflexion significative sur ces enjeux en 2021 qui permettra de mieux évaluer les formations en matière DD&RS des écoles dans le cadre des habilitations à délivrer le titre d'ingénieur.

Dans ce contexte, des associations et collectifs d'enseignants se sont constitués pour favoriser les échanges de bonnes pratiques, créer une dynamique (Profs en transition (23), Enseignants pour la planète (24)). Spécifiquement à l'enseignement supérieur, plusieurs projets ambitieux se développent au service de l'émergence de formations qui permettent d'intégrer les enjeux sociaux et écologiques. On peut citer les initiatives remarquables telles que le projet ClimatSup INSA (25) coordonné par le Groupe INSA en partenariat avec le *think tank The Shift Project* ou encore *le projet du campus de la transition* (26) impulsé par une enseignante en éthique sociale à l'ESSEC, à l'école des Mines de Paris et à Sciences Po. Au niveau institutionnel, le ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation a créé en 2020 un groupe de travail visant à réfléchir à la manière d'enseigner les enjeux de transition écologique dans le supérieur (27). Au final, on peut dire que nos institutions s'emparent aujourd'hui de la question. Les conclusions de ce rapport qui implique l'ensemble des acteurs de la formation dans le supérieur indiquent une ambition sans précédent concernant la formation à ces enjeux : « *Nous recommandons à Mme la Ministre de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, de faire en sorte que, à brève échéance, 100% des étudiants sortant de l'enseignement supérieur en formation initiale, aient été formés aux enjeux, voies et moyens de la transition écologique. La formation continue doit également être mobilisée pour contribuer à cet objectif par une offre dédiée aux actifs déjà en poste* ».

Au niveau des démarches de transformation pédagogique, l'intégration de la transition écologique dans les enseignements du supérieur est vue comme permettant l'acquisition conjointe de connaissances et de compétences transversales communes à tous les étudiants, en complément des enseignements de cœur de métier, pour leur permettre de

l'expérimenter, et la mettre en œuvre pendant leurs études et dans leur vie professionnelle. Un point clé qui ressort des travaux est que l'apprentissage par l'action et la mise en situation pour la résolution de problèmes complexes de transition écologique est à promouvoir.

De manière opérationnelle, on doit définir des compléments spécifiques à chaque filière explorant les principes, modèles, méthodes et pratiques. Aujourd'hui, la communauté enseignante s'accorde sur la pertinence de former aux enjeux sociétaux et écologiques impliquant la connaissance des phénomènes physiques (climat, énergie, ressources, etc.), les ordres de grandeur associés pour appréhender les contraintes, les moyens et les objectifs crédibles et par ailleurs de s'intéresser aux problématiques sociales afférentes (inégalités, risques et conséquences des techniques, etc.). Pratiquement, plusieurs approches existent aujourd'hui et se font concurrence. Elles se complètent en réalité et trouvent leur pertinence dans des contextes différents en fonction de la culture des apprenants et des sachants. Il y a d'abord celles qui sont formulées en direction des « solutions », d'autres vers les « causes ». Enfin on peut citer « l'approche systémique » qui associe, rassemble, considère les éléments dans leur ensemble les uns vis-à-vis des autres et dans leur rapport à l'ensemble.

En amont de la réflexion de fond sur l'approche en distinguant ce qui relève d'une connaissance stabilisée (consensus) et d'une controverse une interrogation majeure demeure : la capacité de nos élèves à s'emparer de ces questions. Le point clé est d'être en mesure d'évaluer les connaissances et compétences des étudiants normalement acquises avant l'entrée à l'université qui leur permettront de quantifier les ordres de grandeur (Énergie, flux, puissance...) et d'avoir une juste lecture des enjeux. Dans cette optique les relations avec les lycées seront à considérer pour sensibiliser les élèves et les enseignants.

Quelques orientations à considérer dans ce contexte :

1. la première porte sur la compréhension des phénomènes physiques et les ordres de grandeur qui sous-tendent les enjeux de transition sociétale ancrés sur les limites planétaires, les ressources, les impacts environnementaux et l'écoconception,
2. la seconde est dédiée à la sensibilisation aux liens entre les transitions numériques sociales et environnementales et leurs interdépendances dans le cadre d'une d'approche systémique.

Concernant ce second point, qui est directement relié à l'émergence d'un numérique responsable et soutenable, la réalité physique du monde numérique pose la question des ressources énergétiques nécessaires aux usages les plus voraces en énergie. Le problème est d'autant plus aigu que les problématiques environnementales (énergie mais aussi disponibilité de matières premières) sont mondiales, et ne peuvent être traitées uniquement au niveau local. La Loi n° 2021-1485 du 15 novembre 2021 visant à réduire l'empreinte environnementale du numérique en France, souligne l'importance de ces enjeux en précisant bien que la formation « *comporte également une sensibilisation à l'impact environnemental des outils numériques ainsi qu'un volet relatif à la sobriété numérique* ». Tout le paradoxe est que le numérique apporte aussi des solutions pertinentes pour accompagner la transition écologique (capteurs, observation, modélisation, optimisation ...) et les transitions sociales (fracture numérique, handicap par exemple...). Cette métamorphose de l'écosystème numérique est donc source de menaces et d'opportunités : (écoconception par exemple). La réflexion doit ainsi porter sur les buts visés et leurs interdépendances écologiques, économiques, sociales (28). Elle doit inclure une réflexion sur les conséquences globales, fondée sur une logique de mesure des rapports bénéfiques / impacts.

Considérant que tous les secteurs de l'industrie et de la société sont concernés, il est donc essentiel de former les ingénieurs sur les impacts et les technologies du numérique et les limites actuelles y compris au niveau des ressources nécessaires et des enjeux énergétiques, en ayant un sens critique sur les nouveaux usages : internet des objets connectés, enjeux autour de la mobilité, des données, et des nouveaux défis : « smart cities », impacts sociétaux...

Ici est donc posé globalement la question des usages du numérique pour l'environnement et le social compte tenu de son importance croissante dans les activités humaines. On doit traiter les questions de l'intrication entre les sciences humaines et sociales (en particulier en ce qui concerne l'éthique et la déontologie) et la protection des données, les usages, les questions de liberté de penser et de démocratie, la citoyenneté, l'égalité des chances entre hommes et femmes, la prise en compte du handicap, la lutte contre les discriminations.

Le format pédagogique de la sensibilisation à la formation doit être innovant : former les étudiants en stimulant leur curiosité et des méthodes pour apprendre à apprendre aujourd'hui et demain dans leur vie professionnelle. Digérer un état de l'art (textes, vidéos, débats...) : certifier des données et leurs analyses, développer l'esprit critique. Le développement d'une animation pédagogique au travers de débats préparés et restitués par des étudiants, associant des enseignants, des industriels et en s'ouvrant sur la société, est à encourager. Il s'agit d'éveiller l'esprit critique, de permettre de lutter contre les fausses informations qui circulent dans les réseaux sociaux, de susciter la curiosité et la créativité, d'aider les participants à exprimer des points de vue afin de partager des idées pour construire et chercher des solutions à un problème donné. Cela nécessite de fournir un effort de préparation et de réflexion, de travailler en équipe pour penser avec d'autres, accepter la critique, énoncer des jugements, approfondir une idée, enrichir son argumentaire. Cette écoute mutuelle favorise l'acquisition et la transmission de connaissances et d'analyses sous réserve d'exercer son sens critique. A titre d'exemple, quelques sujets à débattre : impacts environnementaux du numérique en France ; sobriété numérique : usages et consommation de données ; cycles de vie d'un objet numérique ; déchets électroniques et économie circulaire.

A titre d'illustration, et sans alourdir la maquette pédagogique (ce qui est aussi un défi), l'école d'ingénieur Polytech Montpellier s'organise de la manière suivante pour l'ensemble des étudiants :

- **1ere année du cycle d'ingénieur (socle commun) :**

- 1. Sensibilisation aux enjeux de DD&RS dès la rentrée pour tous les étudiants de la 1ere année du cycle d'ingénieur : Fresque du climat + test d'alphabétisation DD&RS qui s'appuie sur les objectifs de développement durable de l'ONU +Conférence
- 2. 12h00 de cours dédiés aux Phénomènes physiques et ordres de grandeur (énergie, ressources) en lien avec la transition écologique et une initiation à l'approche écoconception.

- **2ème année du cycle d'ingénieur**

- Vision systémique et prospective des transitions,
- Intégration dans les enseignements de SHS (ex : économie circulaire),
- Intégration du numérique responsable dans l'informatique transversale (modification du programme),
- Intégration graduelle dans les enseignements de spécialité (écoconception, cycle de vie, gestion durable eau, numérique responsable, etc.).

- **3^{ème} année du cycle d'ingénieur**
- Semaine de l'entrepreneuriat responsable (tous les étudiants) - lien SHS & Spécialités pour développer une innovation en lien avec le DDRS (partenariat avec la Métropole de Montpellier),
- Prise de recul sur le stage de 5^{ème} année en décrivant dans le rapport de stage une observation/travail sur ces enjeux.

Il s'agit donc pour chaque formation de définir les compétences DDRS nécessaires, d'intégrer ces compétences dans le parcours des étudiants, et d'innover (approche par projets, débats, ateliers spécifiques étudiants/entreprises/chercheurs...).

V. Conclusion

Considérer le numérique responsable dans l'ensemble de la chaîne de valeur de la conception microélectronique est désormais incontournable. Cependant comme nous avons essayé de le montrer, il s'agit aussi de disposer d'une vision holistique. En effet pour une formation adéquate, il est tout d'abord essentiel de s'intéresser à la compréhension des phénomènes physiques dans leur globalité, et le numérique est donc forcément un élément de ce contexte. Intégrer une démarche proactive dans le domaine de la formation et de la recherche pour prendre le recul nécessaire est désormais indispensable et répond à une exigence, plus que réglementaire, de nos étudiants qui seront les futurs cadres et décideurs d'une société, espérons-le, soutenable.

Remerciements

Le GIP CNFM (29), à l'heure du « European Chip act », pour nous avoir donné l'opportunité de débattre sur ces enjeux avec la communauté académique et industrielle de la microélectronique, lors des 16^{èmes} Journées Pédagogiques du CNFM du 1^{er} au 3 décembre 2021 à Saint-Malo.

Références

1. Edgar Morin, Changeons de voie, Éditions Denoël, 2020
2. <https://theshiftproject.org>
3. <https://time-planet.com/fr>
4. <https://institutnr.org> Vincent Courboulay, Vers un numérique responsable : Repensons notre dépendance aux technologies digitales » 2021, Actes Sud
5. <https://www.greenit.fr>
6. M. Robert, La réalité physique du monde numérique, the conversation, 2021
<https://theconversation.com/la-realite-physique-du-monde-numerique-158884>
7. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000044327272>
8. <https://www.franceculture.fr/emissions/ce-qui-nous-arrive-sur-la-toile/internet-nest-pas-neutre-internet-est-un-pharmakon>
9. <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/article/cobalt-transition-energetique-quels-risques-dapprovisionnement>
10. Réserve = total du minerai connu et exploitable industriellement au prix de marché
11. Guillaume Pitron, la guerre des métaux rares, 2018, éditeur : Les Liens Qui Libèrent
12. <https://www.greenit.fr/2017/12/26/20-dechets-electroniques-recycles/>
13. Source ADEME 2020
14. M. T. Bohr and I. A. Young, "CMOS Scaling Trends and Beyond," in IEEE Micro, vol. 37, no. 6, pp. 20-29, November/December 2017, doi: 10.1109/MM.2017.4241347.
15. Mirali Boroumand, Saugata Ghose, Youngsok Kim, Rachata Ausavarungnirun, Eric Shiu, Rahul Thakur, Daehyun Kim, Aki Kuusela, Allan Knies, Parthasarathy Ranganathan, and Onur Mutlu, "Google Workloads for Consumer Devices: Mitigating Data Movement Bottlenecks" Proceedings of the 23rd International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS), Williamsburg, VA, USA, March 2018.

16. G. Sassatelli, A. Gamatié and M. Robert, « Système de traitement de données avec transfert d'énergie », patent n° 1653238, 2016, <https://patents.google.com/patent/WO2017178571A1>
17. Loi n° 2008-660 du 4 juillet 2008 portant réforme portuaire. + rapport 2018 « La transformation du modèle économique des grands ports maritimes N° 2018-M-040-06, Ministère de l'économie et des finances/Ministère de l'action et des comptes publics/ Ministère de la transition écologique et solidaire.
18. Thèse : « La production et la gestion de l'espace portuaire à vocation industrielle et logistique. Les grands ports maritimes français : gestionnaires d'espaces infrastructurels » Marion Magnan 2016
19. <https://www.marseille-port.fr>
20. <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/le-mesri-et-le-developpement-durable-49295> (consulté le 15/02/2022).
21. <https://manifeste.pour-un-reveil-ecologique.org/fr> (consulté le 15/02/2022).
22. « Consultation Nationale Etudiante 2020 », REFEDD, novembre 2020. Sur <https://refedd.org/cne-2020/> (consulté le 15/02/2022).
23. Proposition de loi relative à la généralisation de l'enseignement des enjeux liés à la préservation de l'environnement et de la diversité biologique et aux changements climatiques dans le cadre des limites planétaires. Sur https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/15/textes/115b2263_proposition-loi (consulté le 15/02/2022).
24. <https://profsentransition.com/>
25. <https://enseignantspouirlaplanete.com/>
26. <https://www.groupe-insa.fr/partager/climatsup-insa>
27. <https://campus-transition.org/en/home-2/>
28. Rapport du groupe de travail "Enseigner la transition ... <https://cache.media.enseignementsup-recherche.gouv.fr>
29. GIP-CNFM : Groupement d'Intérêt Public - Coordination Nationale pour la formation en Microélectronique et en nanotechnologies. *Website: <http://www.cnfm.fr>*