

Quelle place pour la CEM dans un monde soutenable ?

Thomas Eudes¹

¹*Safran Electronics & Defense - thomas.eudes@safrangroup.com*

Philosophie, Soutenabilité, Electronique, Compatibilité – Philosophy, Sustainability, Electronics, Compatibility.

Résumé/Abstract

La considération de l'extrême urgence environnementale dans les débats publics amène à décliner bon nombre des scénarios de développement soutenable afin de prendre en compte la finitude des ressources, la croissance démographique et la réduction de l'empreinte écologique des activités humaines. La question discutée ici est alors la place de la science et des techniques de la compatibilité électromagnétique dans ce contexte. L'approche développée consiste à intégrer la dimension des récits collectifs poussant au concept de technologie salvatrice afin de mitiger l'urgence environnementale avec la création de valeur économique. Ce qui promet par raccourci à accélérer le développement des systèmes électriques et électroniques. Ce en quoi légitimement la question est posée à la communauté CEM de prendre sa part dans ce nexus. L'organisation du texte démarre dans les parties 1 à 3 par une documentation large des faits qui font consensus scientifique en matière d'impacts anthropiques sur les limites planétaires (en particulier le changement climatique) et des impacts connus du déploiement massif des technologies d'électrification et du numérique (notamment l'IA). Enfin les parties 4 et 5 ouvre la discussion sur le rôle de la communauté scientifique face à cette situation inertielle et tente de donner quelques orientations de solutions par des concepts axiologiques et un lien avec la CEM.

The consideration of extreme environmental urgency in public discussions leads to propose many sustainable development scenarios in order to deal with the finiteness of resources, population growth, and the reduction of the ecological footprint of human activities. The question discussed here is the role of electromagnetic compatibility science and engineering in this context. The approach developed here involves integrating the dimension of collective narratives that promote the concept of a salvific technology to mitigate environmental urgency while creating economic value. This, in turn, calls for an accelerated development of electrical and electronic systems. Thus, the question is rightly raised to the EMC community to take part within this nexus. The organization in this paper starts with parts 1 to 3 devoted to a broad documentation of facts that have a scientific agreement regarding anthropogenic impacts on planetary boundaries (particularly climate change), as well as the known impacts of massive deployment of electrification and digital technologies (especially AI). Finally, parts 4 and 5 open the discussion on the role of the scientific community facing of this inertial situation and attempt to propose some solution ways through the value theory concepts and a relation with the EMC science.

1 Introduction

L'humanité vit sans doute un moment unique et décisif dans sa courte histoire. Nous avons développé une base de connaissances scientifiques qui permet de bien mettre en évidence, comprendre, observer et mesurer que les modifications des processus de la biosphère sont d'origine anthropique (cf. les synthèses du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat – GIEC et de la Plateforme Intergouvernementale Scientifique et Politique sur la Biodiversité et les Services Ecosystémiques – IPBES en Anglais). Et pourtant les indicateurs écosystémiques s'érodent toujours rapidement selon les Nations Unies [1] mettant en danger l'habitabilité de la planète pour le monde du vivant : L'anthropocène et l'actuelle extinction de masse est un consensus scientifique. Alors l'humanité tente de s'organiser pour sauver ce qu'il peut l'être par des scénarios de transition énergétique à faible émissions de GES, une accélération du déploiement des technologies dites « dématérialisées » et de l'intelligence artificielle, ou encore de la colonisation spatiale, etc... Ceci conduit à interroger en quoi l'usage massif de technologies salvatrices conduirait à la soutenabilité des processus de la biosphère. Cette question étant immensément profonde et sans nul doute impossible à argumenter finement dans un texte court. Ce papier tente de donner des éléments quantitatifs pour amener la réflexion qualitative et cherche à susciter un réveil axiologique.

Puisque ces technologies salutaires promeuvent l'électrification des machines et la densification des fonctions électroniques numériques rapides, des fonctions électroniques de puissance pour les convertisseurs ou bien encore le stockage dans des batteries, le débat est proposé à la communauté scientifique et technique de la compatibilité électromagnétique. Car cette discipline doit prendre sa responsabilité éthique étant par construction intégrée dans cette histoire. La volonté de cette réflexion est de ré-ancrer le problème du rapport entre la civilisation occidentale et l'essence du monde naturel dans la sphère collective, évacuer la vision fragmentaire, pour servir un progrès, un futur soutenable.

2 Vers un monde soutenable

Depuis 1973 par la démonstration du rapport Meadows et sa dernière mise à jour de 2022 [2] que les courbes de prélèvement des ressources ne peuvent pas restées éternellement au-dessus des capacités régénératives de la biosphère, la dégradation des écosystèmes ne cesse donc de s'accélérer. Depuis que la notion de limites planétaires mettant en jeu l'habitabilité de la Terre a été introduite en 2009 par le Stockholm Resilience Centre [3], ces limites ne cessent aussi d'être dépassées [4]. Six des neuf limites ont été dépassées en 2023 et une septième limite sur le point de l'être¹ (acidification des océans). C'est comme si tétanisé par l'enjeu, en ayant malgré tout une parfaite connaissance et une parfaite compréhension scientifiques des problèmes, l'humanité ne peut pas agir. Incapables d'enrayer les processus, nous poursuivons une trajectoire exponentielle de prélèvement des ressources. Dans ce contexte de dégradation environnemental, un sujet semble prédominant, il s'agit de l'urgence climatique comme le souligne Christian Amblard, directeur de recherche honoraire au CNRS dans une tribune du journal Le Monde du 04 Février 2021². Il est clair que ce sujet est primordial, urgent et décisif au regard des conséquences sur les déstabilisations géopolitiques et du nombre de victimes qu'un réchauffement mondial non atténué provoqueraient. Il est indéniable que réduire drastiquement les émissions mondiales de gaz à effet de serre est un impératif pour atténuer les effets du changement climatique. Toutefois, la focalisation sur ce problème unique conduit à tenir un raisonnement linéaire, en silo, fragmenté et en locus interne établissant une solution limpide : il suffit de décarboner les processus par recours l'énergie électrique dite « verte » (cf. les analyses basées sur les neurosciences de l'essayiste Vincent Mignerot [5]). Ce qui est paradoxal du point de vue des processus écosystémiques. Ce schéma de conservatisme doit être réellement interrogé avant de se précipiter dans quelconques solutions, étant donné que les problèmes du changement climatique et de l'intégrité de la biosphère ne peuvent pas être traités de façon isolée [6]. Une autre façon d'exprimer ce paradoxe peut se trouver dans le concept de barrière supraliminaire de Günther Anders. Façonné par le philosophe lui-même, il parle d'un seuil au-delà duquel l'esprit humain est incapable « de penser et de se représenter les effets induits et les actions générées par l'utilisation des produits de la technologie ». Dans le même temps que ce développement technologique frénétique 17 objectifs diversifiés et simultanés de développement durable³ sont proposés par les Nations Unies et intégrés dans les politiques RSE des entreprises Européennes. Ces objectifs ne tiennent pas compte facilement des interactions mutuelles, alors le concept de soutenabilité vise à établir une comptabilité plurifactorielle afin d'équilibrer la balance des différents effets positifs et négatifs intégrant la finitude des ressources, la démographie et les capacités régénératives dans les activités humaines.

Alors en quoi la CEM peut-elle contribuer et quelle en serait la place dans une démarche de soutenabilité mondiale ?

3 Electrification, dématérialisation et Intelligence Artificielle

Sous l'angle de vue qu'il existe un problème majeur à traiter en priorité, à savoir l'atténuation du changement climatique, la solution engagée est la décarbonation de l'énergie car environ 80% de l'énergie primaire mondiale provient de la combustion de sources fossiles⁴ émettrices de CO₂. C'est un raisonnement volontairement simplifié à ce stade, mais il s'agit bien schématiquement de la réponse proposée par l'Agence Internationale de l'Energie (EIA en anglais) dans son scénario paru en 2021 « Net Zero 2050 » [7]. Il existe bon nombres de scénarios de décarbonation de l'énergie, ce que l'on nomme transition énergétique, qui vise donc à passer d'un état du système industriel (80% thermo-industriel) à un autre état (~100% Electrique) dans un intervalle de temps de 30 ans à un niveau de consommation de l'énergie finale en croissance annuelle. Cette simple reformulation, interpelle conceptuellement. Si l'on déroule la chaîne causale cela implique un développement de technologies clés à déployer massivement. Tenir ce type de scénario revient à multiplier par 3 en 20 ans les capacités installées depuis 2020 en photovoltaïque, en éolien, des réseaux de transports électriques et à multiplier par 25 en 20 ans le nombre de voitures électriques selon la même EIA [8]. Cela fait au total 11 technologies clés qui reportent une pression sur l'exploitation des ressources abiotiques, soit environ un besoin d'extraction de 80Mt de métaux hors infrastructures (acier et ciment) [9]. Se pose alors une limite d'extraction potentielle, selon Olivier Vidal la quantité de métaux à produire pour les 30 prochaines années dépasserait la quantité totale de métaux, en cumulé, produite depuis l'antiquité [10]. Les taux de croissance tendanciel de consommation des principaux métaux se situe entre 2 et 6%, et atteignent plus de 10% pour les métaux de spécialisation notamment pour les panneaux photovoltaïques,

¹ Page 55 du rapport "Planetary Health Check 2024", Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK); Member of the Leibniz Association, Telegraphenberg A 31, 14473 Potsdam, Germany; 2024, site web: planetaryhealthcheck2024_report.pdf

² https://www.lemonde.fr/idees/article/2021/02/04/l-urgence-environnementale-ne-se-reduit-pas-a-l-urgence-climatique_6068775_3232.html

³ <https://www.agenda-2030.fr/17-objectifs-de-developpement-durable/>

⁴2022: 503 702 PJ d'énergie Fossile pour 622 187 PJ d'énergie totale, stable entre 80%-82% depuis 1990 [Energy Statistics Data Browser – Data Tools - IEA](#)

les éoliennes, les batteries et les composants électroniques [11]. Les besoins miniers pour satisfaire ce scénario nécessiteraient selon [12] d'utiliser 50 millions de km² de surface terrestre, soit 37% des terres émergées en excluant l'antarctique. Il faut prendre quelques précautions sur le maillage réalisé, mais l'ordre de grandeur reste vraisemblable [13]. De plus, une énorme pression est reportée sur les systèmes biologiques, qui sont des puits de carbone naturels et qui donc absorbent le CO₂. Ces capacités de stockage de carbone étant elles-mêmes en forte réduction à cause du changement climatique [14]. Cette pression intense est toujours justifiée selon [12] et [13] car 8% des mines seraient en zones protégées, 7% dans des forêts primaires et 16% en région sauvage. Ce en quoi l'étude [12] conclue que « les impacts que l'on souhaite éviter par le recours aux plans de transition énergétique, pourraient être dépassés par les impacts associés (à la production, l'utilisation et la gestion) des matériels de la transition énergétique, du fait des matières premières minérales et métalliques associées ». Ceci illustre bien que la biosphère est un système complexe, dynamique et en interaction. Il va sans dire que l'exploitation minière occasionne également d'autres externalités négatives comme la pollution de l'air et des sols, le pompage et la toxicité de l'eau et l'acidification des pluies entraînant des réactions en chaîne sur les écosystèmes et aux conséquences sanitaires, sociales et culturelles profondes et irréversibles pour les habitants [15].

Au demeurant, admettons que ceci n'est finalement pas si grave, qu'il faut avant tout atténuer le changement climatique, alors poursuivons la chaîne causale. Admettons également que les déploiements des techniques de capture et séquestration du CO₂, que les filières de l'hydrogène et de la bioénergie soient également opérées sans atteinte aux autres limites planétaires. Alors les secteurs difficiles à décarboner pourraient le devenir comme l'agriculture (engrais), les transports de marchandises (camions, porte-conteneurs) et la construction (acier et ciment). Malgré tout, le déploiement du système énergétique 100% électrique devra gérer les intermittences des sources d'énergie et la colossale diffusion des collecteurs à travers le réseau, optimiser les rendements et les opérations logistiques, assurer sa propre maintenance, etc... et donc des systèmes de gestion et d'automatisation devront s'appuyer sur des algorithmes efficaces portés par des data center puissants relayés par de nombreux terminaux mobiles. Ce qui pousse l'accélération du déploiement des technologies du numérique et ouvre grand la porte à la sainte assistance de l'intelligence artificielle⁵ (IA) pour gérer cette complexité folle. Ceci conduisant alors à amplifier la pression sur les ressources abiotiques cette fois pour les technologies du numérique et de l'IA. Sans compter que l'augmentation de la demande en énergie électrique supplémentaire sera considérable (environ +20% de la production électrique mondiale) [16][17]. Il est également connu et démontré que les gains d'efficacité énergétique des équipements numériques sont systématiquement dépassés par l'augmentation de la consommation globale, il s'agit de l'effet rebond [18]. Et il y a même un sur-couplage entre la croissance économique du numérique et la consommation énergétique notamment par les reports d'usage offerts par le numérique, plus la technologie devient efficace et déployée plus la consommation énergétique globale augmente [19]. Cette logique va donc intensifier la production de composants électroniques, PCB, équipements et terminaux mobiles, infrastructures et réseaux de communication hauts-débits, fibres optiques, câbles sous-marin et justifiant même le déploiement des méga-constellations de satellites en orbite basse à renouveler tous les 5 ans. A ce jour le secteur des TIC représente plus de 4% des émissions de GES [20][21] avec une proportion très importante liée à la seule fabrication (environ 37%) [20]. Derrière cela se cache la réalité physique liée à la complexité fabrication des composants semi-conducteurs dont les émissions du scope 1 et 2 augmentent de 13% en 1 an [22]. Au-delà de l'indicateur d'émission de GES l'empreinte matérielle des composants et terminaux électroniques est démesurée. Pour s'en rendre compte il faut regarder les près de 1 000 étapes de transformation nécessaires à partir de l'extraction de matières abiotiques. Il faut changer de métrique et adopter le MIPS (*Material Input Per unit of Service*) [23] qui quantifie le ratio entre la masse de l'objet fini et la masse de l'ensemble des ressources nécessaires à sa fabrication. A titre d'illustration l'ordre de grandeur pour un smartphone qui composé de plus de 50 métaux possède un MIPS de 1 200/1, mais ce qui bat tous les records c'est le MIPS pour un circuit intégré qui de 16 000/1 [24]. Ainsi il est possible d'estimer les impacts environnementaux liés à la fabrication et aux usages des technologies du numérique par un apport circulaire et en intégrant les limites planétaires comme résumé dans les rapports de GreenIT [25], reposant sur des indicateurs multiples tels que l'épuisement des ressources abiotiques et fossiles, le forçage radiatif (changement climatique), la consommation en eau, la création d'ozone photochimique, la pollution de l'eau, de l'air et des sols, l'écotoxicité humaine, la biodiversité, les radiations ionisantes, etc... Indicateurs que l'on retrouve également dans la réglementation Européenne pour l'évaluation de l'impact environnemental [26]. Ainsi, ces rapports montrent, à titre d'exemple, que l'empreinte environnementale annuelle des services numériques globaux (usage, terminaux, réseaux et centre de données) de l'Union Européenne en 2019 était :

⁵ Qui n'a rien à voir avec l'intelligence humaine, cf. déclaration Luc JULIA (co-créateur de *Siri*) dans les Echos Par Marie Bellan, Publié le 5 juin 2020 « On peut parler de capacité cognitive ou mémorielle augmentée, mais pas d'intelligence telle qu'elle se définit pour nous, humains. Certes, les capacités de calcul de l'IA sont impressionnantes. Et le « machine learning » est un formidable outil. Mais la machine ne sait qu'apprendre et reproduire ce qu'elle a déjà vu, là où l'humain se sert de bien d'autres choses, beaucoup plus difficiles à modéliser qu'une image. Avec un autre avantage très net : la consommation d'énergie d'un humain, pour le même résultat, est infiniment inférieure à celui de la machine. Notre intelligence a encore de beaux jours devant elle ! »

- 185 Mt CO₂e (soit 370 000 aller-retour à 500 passagers entre Paris et New York, soit 63 ans d'exploitations à 16 avions par jour), soit 4,2% des émissions de GES en Europe⁶
- Ressources abiotiques 5 760 t éq. Sb (Antimoine) soit 111 t d'or éq.
- 571 Mt de matériaux déplacés (soit le poids équivalent à 9,2 milliards d'être humain de 62kg)
- 116 Mt de déchets (soit le poids de 1,87 milliards d'êtres humains de 62kg)
- 283 TWh d'énergie finale (9,3% de la consommation électrique européenne ou 32 344 000 de radiateurs de 1kW allumés durant 1 an).

Ce qui illustre bien que les technologies de dématérialisation sont extrêmement matérielles bien au contraire. L'accélération du déploiement des technologies du numérique, portée par l'IA, conduit à regarder encore de plus près les capacités de stockage et les débits des télécommunications qui s'apparenteraient (sans même compter le déploiement de l'IA) à autre goulot d'étranglement. La demande de capacité de stockage et de débits de télécommunications suit une trajectoire exponentielle depuis 1986 [27]. Au point que l'industrie des semi-conducteurs en 2021 avoue que les technologies actuelles ne seront pas soutenables matériellement dans un futur proche à cause de l'explosion des quantités de données générées dans le monde [28]. Selon ce rapport en 2024 la quantité de données (annuelle) stockées se situe entre 10 ZB (10²² Octets) et 100 ZB (10²³ Octets), elle devrait monter à une valeur comprise entre 10²⁴ et 10²⁸ octets d'ici 2040. Pour les technologies actuelles basées sur des wafers en silicium, la demande en silicium métal qualité électronique (>9N) sera de 10¹⁰kg pour 10²⁶ octets dépassant ainsi d'un facteur 50 les capacités de production mondiales des wafers en 2040 [28]. Tout ceci vient renforcer l'étude [29] sur 48 métaux critiques utilisés pour le numérique et la transition énergétique (hors acier) qui montre que la pression sur les ressources métalliques deviendrait incontrôlée et en particulier sur les métaux de spécialités comme l'Indium, l'Argent, le Sélénium, le Tellure, le Platine, le Palladium, le Cadmium, le Germanium, le Dysprosium, le Néodyme, le Gallium, le Tantale, où la demande sera multipliée par un facteur entre 5 et plus de 15 d'ici 2050 selon les métaux [29]. A cela il faut ajouter la quantité colossale, de l'ordre des Mt par an, des autres métaux critiques comme le Cuivre, l'Aluminium, le Lithium, le Cobalt, le Zinc, le Nickel et le Chrome qui sera multipliée par un facteur entre 2 et 5 d'ici 2050 [29]. Un calcul d'ordre de grandeur basé sur les données connues d'énergie nécessaire pour extraire les atomes des précieux métaux [30] croisées avec la trajectoire de la demande métallique pour 2050 [29] donne environ 80 PWh⁷ pour la totalité des usages (transition énergétique et déploiement du secteur des TIC), soit 2,75 fois les capacités installées en énergie électrique⁸ ou 68% de l'énergie finale totale consommée dans le monde en 2022⁹ rien que pour l'extraction et le raffinage de 18 métaux (hors acier). Il faut noter que cela ne tient pas compte de la baisse de la concentration dans les gisements lors de l'exploitation où l'énergie nécessaire augmentera à mesure que la concentration diminue. Cet ensemble de contraintes vu par l'industrie des semi-conducteurs pousse à promouvoir encore d'autres solutions technologiques, en rupture, pour baisser la demande énergétique du secteur des TIC tout en conservant un déploiement exponentiel des matériels électroniques. Le SRC propose dans son rapport de 2021 [28] 5 axes dits de « changements sismiques » qui orientent la recherche vers des technologies encore peu mature (stockage ADN, capteurs neuromorphiques, mémoires pour processeurs quantiques, ordinateur quantique, algorithmes post-quantique, etc...) qui demanderont encore une complexité supplémentaire d'assemblage des atomes du tableau de Mendeleïev, occasionneront des effets rebonds sur la consommation, etc...

Pour terminer le constat, concernant la dématérialisation ultime (qui est au contraire très matérielle comme démontré ci-avant) de l'accès à internet haut-débit partout et tout le temps amené par le déploiement de près de 100 000 satellites, situés en orbite basse, il s'agit là d'une expérience de géo-ingénierie incontrôlée. Au-delà de la tragédie esthétique pour le ciel et son observation, du risque de collision pour l'expérimentation du syndrome de Kessler, un autre désastre environnemental est à craindre. En effet, puisque ces satellites, constitués d'environ 250 kg d'aluminium, sont situés en orbite basse leur destin sera de rentrer dans l'atmosphère terrestre occasionnant ainsi une transformation en nanoparticules d'oxyde d'aluminium (30 kg pour 250 kg d'aluminium) engendrant une déplétion de la couche d'ozone [31]. Sans oublier le coût matière pour la fabrication des satellites et des lanceurs spatiaux dont les cadences de tirs seront très élevées. Enfin, la course à l'occupation débridée du « *NewSpace* » se passe dans un contexte de compétition dérégulée servant des intérêts privés mettant en danger la souveraineté des nations en conclusion du rapport de l'académie des sciences de mars 2024¹⁰.

⁶ [Site internet de l'EEA](#) : Data Viewer sur les émissions et les absorptions de GES, envoyées par les pays à la CCNUCC et au mécanisme de surveillance des GES de l'UE [Publié le 15 Avril 2024 modifié le 13 Août 2024].

⁷ Calcul basé sur les taux de rendement énergétique exprimés en MJ/kg pour l'extraction de 18 métaux (Al, Ag, Cu, Zn, Si, Li, Ni, Co, Nd, Dy, Pr, Pb, Sn, In, Ga, Ta, Cd et Pt) selon la Table 4.2 [30] multipliée par la quantité maximum extraite en Mt en 2050 selon [9] et [29] pour chacun des 18 métaux, puis converti en PWh (1J = 0,00027778 Wh).

⁸ 29 PWh selon l'EIA - [Energy Statistics Data Browser – Data Tools - IEA](#)

⁹ 117 PWh selon l'EIA - [Energy Statistics Data Browser – Data Tools - IEA](#)

¹⁰ Rapport de l'Académie des sciences - 30 mars 2024, Grandes Constellations de Satellites : Enjeux et Impacts. Résumé page 4. Web : https://www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/rapport_constellations_satellites_2024.pdf

4 Discussion

Après avoir tenté de décrire la complexité de la situation par des analyses quantitatives, la discussion proposée maintenant est qualitative. La situation étant bien évidemment critique, le changement climatique doit être atténué, les émissions réduites urgemment, la transition énergétique doit s'opérer et notre dépendance aux sources fossiles doit être drastiquement réduite, tout ceci est indiscutable. Toutefois, cela ne doit pas se faire en amplifiant des effets délétères mettant à mal cette même stratégie. La description du contexte faite dans les parties précédentes illustre que la compétition aux ressources va se renforcer. Au-delà des aspects environnementaux, ceci augmentera considérablement l'exposition aux risques pour toutes les industries, organisant le fonctionnement de notre société. La démonstration qu'aucune technologie est neutre en GES ou autres perturbations des processus de la biosphère étant faite, c'est donc une question de choix, de priorités, de sociétés vivant ensemble et non d'accélération de technologies de salvatrice qui sont délétères [32]. Cela nécessite de faire évoluer le modèle actuel, de pouvoir repenser notre rapport à l'environnement et autres, ce qui est une réelle opportunité de progrès et de continuité de développement, autre que par la surconsommation des ressources.

Comme dans la tragédie grecque du *Phèdre* de Platon, le Pharmakon est à la fois le remède et le poison selon à qui Platon s'adresse. Il n'y aurait donc aucun remède inoffensif comme développé par Jacques Derrida, tout est question de dosage¹¹. Alors pouvons-nous en déduire que la recherche de solution technique n'est pas la solution à nos problèmes mais qu'elle est le problème ?

Comme la compatibilité électromagnétique s'attache à rendre compatible la coexistence d'équipements électroniques et électriques, c'est dans l'étymologie même du mot clé compatibilité que se trouve un chemin de pensée. Au sens d'être *compatible avec* dérivé du latin *compati*, et *pati* c'est *permettre* ou *admettre*. Il s'agit là d'un axiome dont la finalité est la coexistence des entités dans l'environnement. Exercer la compatibilité c'est aussi faire des compromis, des renoncements, pour que cette coexistence soit permise et que chacune des entités existe sans altération irréversible des existences mutuelles avec lesquelles le système (ou la Nature *Spinozienne*¹²) est en relation.

La compatibilité électromagnétique faisant partie de la physique, basée sur l'étude de la force de l'interaction électromagnétique, issu du modèle standard de la physique des particules, nous avons certains enseignements hérités de cette science à remettre au premier plan de la réflexion.

Nous avons appris de l'expérience Lorenz et de son étrange attracteur que la petite perturbation introduite par le stockage des solutions avec moins de chiffres significatifs fut suffisante pour donner une dynamique complètement différente aux systèmes dynamiques différentiels non-linéaires [33]. Ce que l'on nomme aussi la théorie du chaos ou l'effet papillon. Cela nous rappelle que nous pouvons donc nous tromper fortement sur nos modèles et nos prédictions. La mécanique quantique et le principe d'incertitude (ou d'indétermination) d'Heisenberg¹³ nous enseignent que tout est déterminé et non déterminable à la fois. Comme le rappelle l'expérience de pensée de Pierre-Simon Laplace et son génie rebaptisé « démon de Laplace ». Nous ne disposons pas d'une intelligence permettant de voir le passé et le futur, nous demeurons avec l'incertitude. Ceci est renforcé par le théorème de l'incomplétude de Kurt Gödel¹⁴ qui nous dit qu'aucune théorie mathématique est entièrement démontrable. La barrière supraliminaire d'Anders qui démontre notre limite psychique à appréhender les impacts de nos technologies, ce qui convient à dire que de nombreuses choses échappent à notre perception. Les démonstrations en sens sont grandement étayés dans les ouvrages de Vincent Mignerot [5] sur les biais cognitifs et les raisonnements en locus interne sur le sujet de la transition énergétique. Il ne faut pas oublier l'extrême fragilité de l'apparition de la vie sur Terre issue des lois physiques et des intrigantes coïncidences des valeurs des constantes fondamentales de l'univers comme nous le rappelle le principe anthropique développé par Brandon Carter [34], en prenant le soin d'écarté les aspects théologiques qui connotent une finalité du tout. Tout cela doit inciter à une certaine modestie et modération envers les idées technophiles salvatrices au profit d'axiomes qui nous reconnectent au réel et de choisir ce que nous voulons faire collectivement.

¹¹ *Phèdre ; La pharmacie de Platon*, Jacques Derrida, illustre l'ambivalence des techniques comme quelque chose à la fois de bon et de mauvais, douloureux et bénéfique sous l'angle de la pharmacie puis le concept de pharmacologie est élaboré par Bernard Stiegler qu'il étend à l'ensemble des outils techniques, corporels, politiques et sociaux.

¹² Baruch Spinoza, *Éthique*, Seuil, Paris, 2010 (1677), E4, Proposition II, p. 365.

¹³ L'interprétation souvent erratique du principe dit d'incertitude élaboré par Werner Heisenberg aux conséquences philosophiques désastreuses développées par Etienne Klein, invite à comprendre que les objets quantiques ne peuvent pas avoir les propriétés qui sont attribuées aux objets classiques et que par conséquent leur observation par ces mêmes propriétés, comme la position et la vitesse, occasionne un contresens qui échappe à notre représentation du réel. [La physique quantique, ça déménage ! La chronique d'Étienne Klein | \(philomag.com\)](#)

¹⁴ « L'interprétation dépend du lien entre mathématiques et réalité. Pour un non platonicien, ce théorème dit que, dans une axiomatique donnée, il y aura toujours une proposition indécidable, un énoncé dont le statut – vrai ou faux – n'est pas déterminé au sein de cette axiomatique. Le mathématicien a alors tout loisir de décider que cette proposition indécidable est soit vraie ou soit fausse. Ce faisant, il complète l'axiomatique en question en lui ajoutant un nouvel axiome. Mais pour un platonicien, le théorème de Gödel énonce qu'il y aura toujours, à l'intérieur d'une axiomatique, une proposition à la fois vraie et indémontrable » Etienne Klein, <https://www.philomag.com/articles/anatomie-dun-theoreme-la-chronique-detienn-klein>

5 Conclusion

La place de la CEM dans un monde soutenable doit être celui d'un état d'esprit scientifique reconnecté au réel, comme pour l'ensemble des sciences et des techniques *in fine*. Accepter son propre impact tout en faisant face aux déséquilibres. Ce n'est pas la multiplication et l'hyper-densification des systèmes électriques et électroniques qui intensifieront nos problématiques de CEM à résoudre qui doivent nourrir nos réflexions, mais comment s'en passer ? Comment concevoir différemment pour favoriser la circularité et le réemploi des matières ? Comment réduire la consommation d'énergie et de matière ? Comment réparer et maintenir les systèmes pour qu'ils durent le plus longtemps ? La notion de limites (ou de gabarits à ne pas dépasser et de seuils de susceptibilité à tenir) est la dimension essentielle de la CEM car tout est en relation, le respect de ces limites assure la coexistence mutuelle des équipements et des systèmes. Alors pourquoi ne pas étendre cette notion de limites à respecter à d'autres facteurs ?

La réponse n'est dans un premier temps ni technique ni quantitative elle est axiologique, éthique et ontologique. Un collectif de chercheurs a publié récemment un article très bouleversant sur l'état du monde en mettant l'accent sur les 28 boucles de rétroaction et points de bascule agissant sur le climat [35], rappelant ainsi l'immense complexité du système biosphérique. Ce collectif est enfin sorti de la réserve et la neutralité qui caractérise la prescription scientifique. Cette belle trahison est indispensable car c'est une trahison pour favoriser la vie. Car l'avenir de l'humanité est en jeu et peut être encore entre nos mains. Les conséquences du dérèglement climatique doivent être atténuées dès maintenant et de manière durable et sans autres atteintes aux limites de la biosphère : « Nous devons réduire de toute urgence les dépassements écologiques et poursuivre immédiatement des mesures d'atténuation et d'adaptation à grande échelle au changement climatique pour limiter les dommages à court terme. Ce n'est qu'en prenant des mesures décisives que nous pourrions préserver le monde naturel, éviter de profondes souffrances humaines et garantir que les générations futures hériteront du monde vivable qu'elles méritent » [35].

Cela appelle à trahir l'inertie d'un système immoral, mortifère et artificiel qui est en place pour l'amour, l'esthétique et le merveilleux du monde naturel, comme le souligne régulièrement Aurélien Barrau¹⁵. Adopter une conscience morale et une philosophie *Spinoziste* promouvant la puissance d'être avec les joies qui en découlent, l'humain n'étant pas « à part » de la Nature¹⁶, « c'est ainsi que nous serons le plus utiles aux autres ». Nous devons faire preuve de courage, d'audace, d'éthique, de cohésion collective et enfin sortir des réserves et des implicites, ne plus accepter l'inacceptable.

Informations essentielles

Cet article est proposé à titre de réflexion et est une démarche personnelle menée par son auteur en marge de ses activités professionnelles, sans prétendre représenter les vues de son employeur, qui a engagé de son côté de nombreuses démarches liées à la décarbonation de ses activités.

Cet article n'est pas rédigé pour être péjoratif envers les agissements ni les convictions des lecteurs, il s'agit d'une tentative de critique qualitative essentielle sur la finalité des activités de recherche et de développement technologique pour engager un rapport au réel soutenable.

¹⁵ Aurélien Barrau, *L'Hypothèse K: La science face à la catastrophe écologique*, éditions Grasset, 18/10/2023, EAN : 9782246837145, pp. 87-145

¹⁶ Frédéric Lenoir, *Le Miracle Spinoza*, Fayard, Paris, 2017, pp. 14-222.

Références bibliographiques

- [1] UICN Red List Index, BirdLife International, plateforme de la Global SDG Indicators Database (extraction au 21 mars 2023). Traitements : SDES, mars 2023. [Érosion de la biodiversité | La France face aux neuf limites planétaires \(developpement-durable.gouv.fr\)](#)
- [2] Meadows De., Meadows Do., Randers J., *Les Limites à la croissance* – Edition Spéciale 50 Ans - 03/03/2022 - ISBN : 978-2-37425-332-9.
- [3] Rockström, J., Steffen, W., Noone, K. et al. A safe operating space for humanity. *Nature* 461, 472–475 (2009). <https://doi.org/10.1038/461472a>
- [4] Richardson K. et al., Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Sci. Adv.*9, eadh2458 (2023). DOI:10.1126/sciadv.adh2458
- [5] Mignerot V., *L'Énergie du déni, nouvelle édition - Avons-nous vraiment l'avenir du climat entre nos mains ?* - 20/01/2023 - ISBN : 978-2-37425-383-1
- [6] Gardner, C.J., Struebig, M.J. & Davies, Z.G. Conservation must capitalise on climate's moment. *Nat Commun* 11, 109 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13964-y>
- [7] IEA (2021), Net Zero by 2050, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>, Licence: CC BY 4.0
- [8] IEA : Global Critical Minerals Outlook 2024 | The Role of Critical World Energy Outlook Special Report Minerals in Clean Energy Transitions. Licence: CC BY 4.0
- [9] Gregoir, L., & Van Acker, K. (2022). Metals for Clean Energy. Pathways to solving Europe's raw materials challenge. KU Leuven & Eurometaux
- [10] Vidal O., « Ressources minérales, progrès technologique et croissance », *Temporalités* [En ligne], 28 | 2018, mis en ligne le 03 avril 2019. URL : <http://journals.openedition.org/temporalites/5677> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/temporalites.5677>
- [11] Labbé, J. F. (2016). Les limites physiques de la contribution du recyclage à l'approvisionnement en métaux. *Annales des Mines - Responsabilité et Environnement*, 82, 45-56.
- [12] Sonter, L. J., Dade, M. C., Watson, J. E., & Valenta, R. V. (2020). Renewable energy production will exacerbate mining threats to biodiversity. *Nature Communications*, 11, 1-6.
- [13] Luckeneder S., Giljum S., Schaffartzik A., Maus V., Tost M., Surge in global metal mining threatens vulnerable ecosystems, *Global Environmental Change*, Volume 69, 2021, 102303, ISSN 0959-3780, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102303>
- [14] Ke, P., Ciais, P., Sitch, S.A., Li, W., Bastos, A., Liu, Z., Xu, Y., Gui, X., Bian, J., Goll, D.S., Xi, Y., Li, W., O'Sullivan, M., Souza, J.G., Friedlingstein, P., & Chevallier, F. (2024). Low latency carbon budget analysis reveals a large decline of the land carbon sink in 2023.
- [15] RAPPORT D'ÉTUDE, Controverses minières, Pour en finir avec certaines contrevérités sur la mine et les filières minérales, VOLET 1. SystExt, Novembre 2021, CC BY-NC-SA 3.0 FR. [RP_SystExt_Controverses-Mine_VOLET-1_Nov2021_maj.pdf](#)
- [16] Jones N., "How to stop data centres from gobbling up the world's electricity." *Nature* 561 (2018): 163-166.
- [17] Masanet E. et al., Recalibrating global data center energy-use estimates. *Science*367, 984-986 (2020). DOI:10.1126/science.aba3758
- [18] Gossart C., Rebound effects and ICT : a review of the literature. *ICT innovations for sustainability*, 310, Springer, pp.435 - 448, 2015, *Advances in intelligent systems and computing*, 978-3-319-09227-0. (10.1007/978-3-319-09228-7_26). (hal-01258112)
- [19] Lange S., Pohl J., Santarius T., Digitalization and energy consumption. Does ICT reduce energy demand?, *Ecological Economics*, Volume 176, 2020, 106760, ISSN 0921-8009, <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106760>.
- [20] Malmodin J., Lövehagen N., Bergmark P., Lundén D., ICT sector electricity consumption and greenhouse gas emissions – 2020 outcome, *Telecommunications Policy*, Volume 48, Issue 3, 2024, 102701, ISSN 0308-5961, <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2023.102701>.
- [21] Bieser J. C. T., Hintemann R., Hilty L. M., Beucker S., A review of assessments of the greenhouse gas footprint and abatement potential of information and communication technology, *Environmental Impact*

Assessment Review, Volume 99, 2023, 107033, ISSN 0195-9255, <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.107033>.

- [22] Pelcat M.. GHG emissions of semiconductor manufacturing in 2021. Univ Rennes, INSA Rennes, CNRS, IETR – UMR 6164, F-35000 Rennes. 2023. (hal-04112708v2)
- [23] Ritthoff, M., Rohn, H. and Liedtke, C., 2002. Calculating MIPS: Resource productivity of products and services.
- [24] Bordage F., *Sobriété numérique, les clés pour agir*, Buchet-Chastel, 2019
- [25] GreenIT.fr : Le numérique en Europe : une approche des impacts environnementaux par l'analyse du cycle de vie (NumE 2021), décembre 2021¹⁷. Web : [EU-Study-ACV-7-DEC-FR.pdf \(greenit.fr\)](#) ; AU-DELÀ DES CHIFFRES : Comprendre les impacts environnementaux du numérique et agir, décembre 2021¹⁸, Web : [EU-Study-Final-Au-dela-des-chiffres-FR_compressed.pdf \(greenit.fr\)](#)
- [26] Sala, S., Benini, L., Beylot, A., Castellani, V., Cerutti, A., Corrado, S., Crenna, E., Diaconu, E., Sanye Mengual, E., Secchi, M., Sinkko, T. and Pant, R., Consumption and Consumer Footprint: methodology and results, EUR 29441 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019, ISBN 978-92-79-97256-0, doi:10.2760/98570, JRC113607.
- [27] Hilbert M., López P. ,The World's Technological Capacity to Store, Communicate, and Compute Information. Science 332, 60-65 (2011). DOI:10.1126/science.1200970
- [28] Semiconductor Research Corporation, The Decadal Plan for Semiconductors: a pivotal roadmap outlining research priorities. Full Report, Chap. 2, Jan. 2021. Web: <https://www.src.org/about/decadal-plan/decadal-plan-full-report.pdf>
- [29] Watari T., Nansai K., Nakajima K., Review of critical metal dynamics to 2050 for 48 elements, Resources, Conservation and Recycling, Volume 155, 2020, 104669, ISSN 0921-3449, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104669>.
- [30] van der Voet, E. ; Salminen, R. ; Eckelman, M. ; Mudd, G. ; Norgate, T. ; Hischier, R. UNEP (2013) Environmental Risks and Challenges of Anthropogenic Metals Flows and Cycles, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. Web: [Risques environnementaux et défis des flux et cycles de métaux anthropiques | Panneau de ressources \(resourcepanel.org\)](#)
- [31] Ferreira, J. P., Huang, Z., Nomura, K.-i., & Wang, J. (2024). Potential ozone depletion from satellite demise during atmospheric reentry in the era of mega-constellations. Geophysical Research Letters, 51, e2024GL109280. <https://doi.org/10.1029/2024GL109280>
- [32] Couillet R., Poissonnier G., "Pourquoi et comment démanteler le numérique ?" GRETSI 2023
- [33] Lorenz E. N., 1963: Deterministic Nonperiodic Flow. J. Atmos. Sci., 20, 130–141, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1963\)020<0130:DNF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1963)020<0130:DNF>2.0.CO;2).
- [34] Carter, B., "Large number coincidences and the anthropic principle in cosmology.", in Confrontation of Cosmological Theories with Observational Data, 1974, vol. 63, pp. 291–298.
- [35] Ripple W. J., Wolf C., Gregg J. W., Rockström J., Mann M. E., Oreskes N., Lenton T. M., Rahmstorf S., Newsome T. M., Xu C., Svenning J. C., Cardoso Pereira C., Law B. E., Crowther T. W., The 2024 state of the climate report: Perilous times on planet Earth, BioScience, 2024;, biae087, <https://doi.org/10.1093/biosci/biae087>

¹⁷ Commandée par le groupe parlementaire européen des Verts / ALE, cette étude a été réalisée avec le plus haut niveau de transparence. Conforme aux standards les plus exigeants au niveau mondial, elle respecte notamment les normes d'Analyse du Cycle de Vie ISO 14040-44 et a fait l'objet d'une revue critique par un tiers indépendant.

¹⁸ Étude commissionnée par le Groupe parlementaire européen des Verts/ALE Projet piloté par GreenIT.fr, avec les membres de NegaOctet (DDemain, GreenIT.fr, LCIE CODDE Bureau Veritas, APL data center).