

# Que la transition écologique soit, et la transition numérique fut.

Marie GARIN<sup>1</sup> Achille BAUCHER<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Université Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, CNRS, Centre Borelli, 4 avenue des Sciences, F-91190 Gif-sur-Yvette, France

<sup>2</sup>Laboratoire d'Informatique de Grenoble, bâtiment IMAG, 700 Avenue Centrale, 38400 Saint-Martin d'Hères, France

**Résumé** – Cet article discute la rhétorique promouvant le numérique au nom de son rôle supposément capital dans le développement durable, à l'aune du processus sociotechnique de constitution des savoirs liés à la quantification des Impacts Environnementaux du Numérique (IEN). Revenant sur les conditions historiques et sociales qui ont animé l'idée d'un numérique au service de l'écologie à travers le concept du découplage entre croissance économique et dégradations environnementales, nous souhaitons inviter la communauté scientifique à une réflexion collective quant à la pertinence de ses recherches face à l'urgence écologique

**Abstract** – This paper debates the rhetoric promoting Information and Communication Technologies (ICT) in the name of its supposedly crucial role for sustainable development in the light of the sociotechnical process of knowledge constitution related to the quantification of the environmental impacts of ICT. Revisiting the historical and social conditions that have animated the idea of a green transition enabled by digital technologies by means of decoupling between economic growth and environmental damages, we invite the scientific community to a collective reflection on the relevance of its research in front of ecological emergency.

## 1 Introduction

Dans une démarche inspirée de la Théorie Critique, nous proposons une historicisation et sociologisation des discours promouvant le numérique au nom de l'écologie<sup>1</sup>. Dans le champ des Science and Technology Studies (STS), il est possible de schématiquement distinguer deux paradigmes en fonction de la prédominance que l'on attribue à l'une ou l'autre des composantes de la dichotomie « technologie et société » : déterminisme technologique, qui considère que l'organisation sociale est façonnée par la technologie, et constructivisme technologique, pour lequel la technologie est un artefact cristallisant les rapports sociaux. En adoptant tout d'abord une perspective constructiviste d'analyse des controverses, nous analyserons les cadrages normatifs du rapport entre numérique et écologie portés par les arènes<sup>2</sup> politiques, économiques et scientifiques. Nous adopterons enfin une perspective inspirée du déterminisme technologique afin de questionner la trajectoire écologique à laquelle nous mène une société numérisée et où l'Intelligence Artificielle (IA) se généralise. Convoquant des concepts essentiels de la philosophie de la technique et des STS, nous invitons à ce qu'une réflexion véritablement critique émerge dans notre communauté à propos de la pertinence des recherches que nous menons à l'heure du ravage écologique.

Au cours de cet article, nous utilisons la taxonomie d'Impacts Environnementaux du Numérique (IEN) suivante. Les effets de premier ordre sont ceux engendrés par ce qui consti-

tue le numérique : la fabrication, l'utilisation et la fin de vie des infrastructures, réseaux et équipements. Seront dénommés effets de second ordre ceux relatifs aux applications du numérique : optimisation, efficacité et substitution, ainsi qu'effet rebond direct. Enfin, seront qualifiés d'effets de troisième ordre les effets rebond indirects, transformations systémiques et changements structurels de la société induits par le numérique.

## 2 Promesses

### 2.1 Numérique et développement durable

Face au constat de l'accélération des dégradations environnementales, du dépassement de plusieurs limites planétaires, nombre d'instances internationales promeuvent comme horizon normatif le développement durable, aussi appelé croissance verte. À défaut de remettre en question la croissance économique, du Sommet de Stockholm à celui de Rio, la perspective commune défendue par les grandes institutions publiques et privées demeure la croissance économique ; pariant de la sorte sur un possible dépassement du couplage entre cette dernière et ses conséquences écologiques, aussi appelé *découplage*. Cette notion sous-tend la décorrélation absolue et conséquente entre la croissance économique (souvent calculée par l'indice du PIB) et ses dégâts environnementaux souvent représentés à travers la consommation de matières premières. Le développement durable est, encore aujourd'hui, largement relayé par nombre d'institutions<sup>3</sup> et repose sur une large gamme de promesses d'innovations technologiques, d'ajustement politiques et d'incitations au changement de comportement. Soulignant le rôle fondamental de l'optimisation de l'éco-efficacité — la réduction de l'intensité des impacts environnementaux ou de l'usage de ressources par unité de valeur économique produite — comme levier principal de ce découplage, l'arène

<sup>1</sup>« Historiciser la théorie ne signifie pas céder au relativisme, qui réduit les concepts aux conditions extérieures (en particulier sociologiques) de leur apparition, ni à voir dans l'histoire un tribunal appelé à se prononcer sur la vérité de la théorie. Il s'agit plutôt de concevoir les constructions théoriques comme des réponses actives à des situations historiquement déterminées, situations dont elles s'emparent pour en révéler des contenus de vérité qui transcendent les conditionnements dont elles sont issues tout en en portant la marque indélébile. » Stathis Kouvelakis, *La critique défaite. Émergence et domestication de la Théorie critique*, Éditions Amsterdam, 2019

<sup>2</sup>Sur la représentation de l'espace social en tant que mosaïque d'arènes, nous renvoyons à P. B. Joly et C. Bonneuil, *Science, Techniques et Société*. Éditions la Découverte, 2013.

<sup>3</sup>Voir, entre autres, les 17 objectifs de développement durable de l'agenda 2030 adoptés par les 193 États membres de l'ONU

politique opère ici un cadrage normatif partiel de la question écologique [1]. Les Technologies de l'Information et de la Communication (TIC), dites numériques, sont alors identifiées comme principal moteur de l'éco-efficacité, l'imaginaire socio-technique d'immatérialité à leur encontre n'étant sûrement pas en reste. Il est important de rappeler que le numérique ne s'est pas déployé de manière autonome dans la société mais que sa diffusion a été largement soutenue par de nombreuses politiques publiques ainsi que des investissements massifs pour son développement. Par exemple, à travers les Programmes Cadre de Recherche et de Développement Technologique (PCRDT), principaux outils de la politique européenne en matière de recherche, de développement et d'innovation, octroyant une grande part des financements aux TIC<sup>4</sup>. L'exemple paradigmatique fut la Stratégie de Lisbonne, axe de politique économique de l'Union Européenne actée en 2000 par ses États membres qui déploya un large éventail de politiques publiques afin de numériser la société (numérique à l'école, dématérialisation des services publics, accès à un internet massif et peu cher, etc.). Dans l'arène politique française, le numérique est invariablement dépeint comme « un levier au service de la transition écologique », voire « l'outil le plus puissant à notre disposition pour faciliter cette transition pour lutter contre les problèmes environnementaux »<sup>5</sup>.

## 2.2 Processus de constitution des savoirs

Les années 90 signent une accélération du déploiement du numérique, très largement soutenue par une volonté politique de promotion de ces technologies, comme nous venons de le rappeler. Conjointement, de premiers travaux de recherche relatifs aux IEN sont conduits, majoritairement en suivant la méthodologie ACV (Analyse de Cycle de Vie). Cette dernière ne pouvant qu'évaluer l'impact de premier ordre d'un produit ou d'un service, la littérature scientifique se limitait donc tout au plus à l'évaluation de sous-secteurs du numérique. Il est important de préciser que les données nécessaires à la quantification sont majoritairement détenues par la sphère économique, ce qui pose nécessairement des questions de transparence et d'accessibilité. Dans les années 2000 émerge du milieu majoritairement universitaire une méthodologie s'efforçant de quantifier les IEN de manière holistique, en particulier, incluant les effets de second et troisième ordres, dits indirects. Ces travaux, que Béchadergue [1] qualifie d'*approche scientifique*, insistent sur le fait que **la majorité des impacts négatifs sont dûs aux effets indirects**. Parmi cette littérature, *The Future Impacts of ICTs on Environmental Sustainability* s'attelle à donner une vue d'ensemble des IEN à horizon 2020, incluant effets directs et indirects. Seulement, ces derniers étant incertains, les résultats de l'étude présentent des intervalles de prévision très larges (+32% à -29% de GES par exemple), révélant ainsi la pluralité des trajectoires sociotechniques possibles.

En 2007, dans un contexte où l'attention aux questions écologiques est grandissante, une étude secoue les différents acteurs : le cabinet de conseil Gartner annonce que « Le sec-

<sup>4</sup>Voir les 4ème et 5ème PCRDT, dotant chacun les TIC de plus de 3 Milliards€

<sup>5</sup>Site du gouvernement français [ecologie.gouv.fr](http://ecologie.gouv.fr), pages *Numérique responsable* et *Colloque numérique et environnement*.

teur des TIC représente 2% des émissions mondiales de CO<sub>2</sub>, un pourcentage équivalent à celui du secteur de l'aviation. » L'année suivante, la GeSI (Global Enabling Sustainability Initiative), coalition d'entreprises du secteur des TIC, entre en lice. En collaboration avec The Climate Group et le cabinet McKinsey, ils sortent le rapport *SMART 2020 : Enabling the low carbon economy in the information age*. Cette étude est emblématique d'une littérature, que Béchadergue [1] qualifie d'*approche industrielle*, adoptant une méthodologie qui bien qu'ayant des similitudes avec l'approche précédente, s'en distingue nettement par leurs périmètres largement orientés<sup>6</sup>. En effet, dans ce rapport, un cadrage opportun est adopté, restreignant les IEN aux seuls GES émis par la consommation d'énergie et, de manière plus significative, **réduisant les impacts considérés aux effets de premier ordre et aux effets de second ordre positifs**, ignorant de la sorte les effets considérés comme les plus significatifs par l'*approche scientifique*. La conclusion de ce rapport est sans équivoque : le numérique permettra de réduire les émissions de GES des autres secteurs de 15% à horizon 2020, compensant ainsi les impacts relatifs à ses infrastructures par un facteur 5.5, et il est donc « un acteur clé dans la lutte contre le changement climatique, malgré son empreinte carbone croissante » (*SMART 2020*). Par la suite, ce cadrage a été largement repris, notamment dans les autres rapports produits par la GeSI, promettant un potentiel d'évitement du numérique toujours plus conséquent : un facteur 7.2 pour *SMARTer 2020* en 2012, et enfin un facteur 9.7 pour *SMARTer 2030* en 2019. Malgré les travaux ayant mis en lumière les négligences et inexactitudes, sur lesquels nous reviendrons par la suite, ainsi que le constat que les prédictions ne se sont pas réalisées, ces rapports sont régulièrement pris comme cadrage de référence par de nombreux travaux de recherche, et sont cités dans des documents de travail de nombreuses institutions nationales et internationales. Ainsi, rien qu'en France, les rapports de la GeSI étaient encore mentionnés dans un document de France stratégie en 2021. L'extrait du *Rapport sur le changement climatique 2015, France & Benelux* de l'ONG CDP (Carbon Disclosure Project), inauguré par un texte de la ministre de l'écologie française de l'époque, est paradigmatique de la rhétorique attenante à cette littérature.<sup>7</sup>

## 3 Critiques

Dans cette partie, nous examinons de manière critique les notions de découplage et d'effet d'évitement du numérique en nous appuyant sur des littératures spécifiques à l'économie et aux IEN. Au regard de ces éléments, nous formulons l'hypothèse suivante : croyances idéologiques et mécanismes de production d'ignorance (tant délibérée que fortuite) nous empêchent-ils de collectivement prendre la mesure de la trajec-

<sup>6</sup>« Dès le départ, tout le monde savait que les conclusions du rapport seraient positives. Le business, c'est le business ! Tout cela, c'est d'abord du marketing, un « marketing vert » dont l'objectif est de toujours mettre en avant des chiffres positifs. », extrait d'un entretien avec une personne ayant travaillé sur *SMARTer 2030*. Guillaume Pitron, *L'enfer numérique, Voyage au bout d'un like*, Les Liens qui Libèrent, 2021

<sup>7</sup>« Les technologies digitales sont un levier clef pour découpler la consommation de ressources et l'émission de carbone de la croissance. Selon l'étude *SMARTer 2030* de [la] GeSI, les TIC peuvent permettre une réduction de 20% des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> d'ici 2030, par rapport à 2015. Ceci montre qu'il n'est pas nécessaire de faire un choix entre une économie et la protection de l'environnement. »

toire écologique que vers laquelle nous dirige le choix d'une société du numérique et de l'IA ?

### 3.1 L'attente messianique du découplage

Rappelons que, malgré l'urgence à infléchir notre pression sur les écosystèmes, nombre d'institutions de la sphère politique (entre autres) ne remettent pas en cause l'horizon d'une croissance économique, faisant le pari d'un découplage absolu et conséquent. Or, cette éventualité est de plus en plus contestée par une littérature (voir entre autres [8, 4]) affirmant que cela n'a jamais été observé, qu'aucune preuve empirique ne motive cette hypothèse, et qu'il est très peu probable que cela se produise tant pour les matériaux, l'énergie, que les GES. La conclusion d'une revue de la littérature sur le découplage ayant analysée plus de 179 articles publiés entre 1990 et 2019 [7] est sans appel : « Cette affirmation doit être étayée par des plans détaillés et concrets de changement structurel qui définissent en quoi l'avenir sera différent du passé. Sinon, la justification de l'affirmation reposera sur la possibilité abstraite du découplage ; une possibilité abstraite qu'aucune preuve empirique ne peut réfuter mais qui, en l'absence de preuves empiriques solides ou de plans détaillés et concrets, repose, en partie, sur la foi. » Cette affirmation nous semble de la plus grande importance dans le sens où, croire au découplage ou encore à l'effet d'évitement du numérique — alors qu'à l'échelle globale cela n'a jamais été observé — ne peut relever que de l'idéologie.

Intéressons-nous maintenant au présumé effet d'évitement du numérique. Le dernier rapport de la GeSI sorti en 2015, *SMARTer 2030* concluait de la manière suivante : « Ce rapport montre que les TIC peuvent permettre de réduire de 20% les émissions mondiales de CO<sub>2</sub> d'ici à 2030, et donc de maintenir les émissions aux niveaux de 2015, et de dissocier efficacement la croissance économique de la croissance des émissions. » Force est de constater que, malgré la numérisation croissante de la société, ces émissions ont explosé (les émissions mondiales annuelles par habitant ont augmenté de 15% entre 1990 et 2019), l'extraction de matières premières progresse à un rythme effréné (augmentation de 113% entre 1990 et 2017 alors que la population n'a augmenté de que 40%) à un taux augmentant plus rapidement que celui du PIB mondial — donc un couplage de plus en plus prononcé [3]. Quant aux promesses des rapports de la GeSI, l'analyse détaillée de Roussilhe [5] conclue qu'elles sont basées sur des hypothèses « qui sont aujourd'hui largement mises à défaut par la littérature scientifique existante ». Il semble très probable que ces rapports relèvent de stratégies visant la défense d'intérêts économiques comme le remarque Béchadergue [1]<sup>8</sup>.

Nous partageons avec la littérature mentionnée dans la section précédente le constat que ce sont les effets indirects qui sont les plus cruciaux de par le caractère diffus, pénétrant tout les aspects du quotidien du numérique. Il convient donc de considérer celui-ci moins en tant que secteur indépendant —

<sup>8</sup>« Car dès lors qu'un processus décisionnel est miné d'incertitudes, de nombreux travaux traitant de la science comme activité de production d'ignorance suggèrent que l'exploitation de cette incertitude par certains acteurs peut relever de stratégies conscientes visant la défense d'intérêts »

bien que les effets de premier ordre ne soient pas négligeables — mais plutôt comme agissant sur les autres secteurs, modifiant leurs dynamiques. Dès lors, un constat s'impose : **une quantification** des IEN à l'échelle globale (tant géographique qu'en terme d'ordres des effets) **est impossible**. Cette incertitude, couplée à l'urgence d'inverser la dynamique actuelle, doit mener à une très grande prudence si l'on souhaite être sérieux et conséquent en la matière. La question de la trajectoire écologique vers laquelle la numérisation du monde oriente la société n'est pas technique mais bien sociotechnique (*a minima*). Elle ne peut donc pas se restreindre au calcul des émissions de GES (ou autres métriques) induites, cadre auquel elle est souvent réduite par les arènes politiques et économiques. C'est pourquoi il nous semble crucial de se référer à la philosophie de la technique ainsi qu'aux STS afin de nourrir une réflexion quant au type de société que charrient le numérique et l'IA, que nous dénommerons désormais le *dispositif IA*.

### 3.2 Le numérique et l'IA, pour quelle société ?

Dans « Do Artifacts Have Politics ? », grand classique des STS, Langdon Winner dépeint les choix politiques cristallisés dans les dispositifs techniques, d'une configuration particulière au dispositif en soi. De la même manière qu'une société ayant fait le choix du nucléaire entraîne une certaine trajectoire sociotechnique (nécessité de la centralisation et de la militarisation), il est crucial d'interroger ce qui pourrait être intrinsèque à une société numérisée : quelle est la politique de ces technologies ? Cette discussion soulève une première question : celle des conditions nécessaires au fonctionnement de ce dispositif. Plus nous dépendons de ce dispositif, plus nous dépendons de ce qui est essentiel, aujourd'hui, à son fonctionnement : mondialisation de l'économie, centralisation de la société pour l'installation et le maintien des infrastructures du numérique, industrie minière pour l'extraction de la très grande variété de matériaux qui constituent les appareils numériques, etc. Les dispositifs technologiques dominants établissent des dépendances à certaines infrastructures, certains systèmes, dispositifs ou encore modes d'organisation — et contribuent ainsi à la dynamique opposant les trajectoires sociotechniques les unes aux autres, pouvant mener à des situations de verrouillage.

Un deuxième point s'articule autour des formes spécifiques de pouvoirs qui sont renforcées par ce dispositif. En particulier, les « leviers » que représente le numérique ne concernent pas indistinctement tous types d'activités mais favorisent en priorité certains secteurs ou acteurs économiques. Nous spécifierons les formes de pouvoirs que le dispositif IA consolide en exposant certaines de ses caractéristiques les plus déterminantes. L'une d'entre elles réside dans la vitesse et la puissance de calcul permettant de traiter de grandes quantités d'information de manière centralisée. La force inédite de ce dispositif réside dans le couplage de cette centralisation et d'un transfert d'information instantané et diffus à faible coût, induisant ainsi le dépassement des limites habituelles dues à la distance géographique. L'impression d'immatérialité ainsi que les faibles coûts d'adoption d'un nouvel usage accélèrent sa dissémination dans le temps et dans l'espace. En particulier, le numérique a permis l'expansion,

à l'échelle mondiale, du fret (transports de marchandises), du stockage et de la manutention en facilitant la gestion de l'information ; système d'identification par codes barres, puces RFID. L'efficacité de ces technologies a globalement joué un rôle d'accélérateur dans de nombreux secteurs économiques à travers l'optimisation des moyens logistiques, gestionnaires et organisationnels, menant à des gains de productivité considérables. Ces particularités jouent un rôle majeur dans l'accélération de la production et de la consommation de biens et services ainsi que dans la diffusion de tendances et de modes de vie à des échelles très larges.

Le numérique permet ainsi de rendre plus efficace et d'optimiser la gestion de flux mais, contrairement à l'effet d'évitement annoncé, ces gains ont été largement contrebalancés par l'effet rebond. Aussi appelé paradoxe de Jevons, il désigne le phénomène d'augmentation globale de la consommation due à un gain d'efficacité censé la réduire. Un exemple classique est le suivant : on s'attend à ce que l'amélioration du rendement des moteurs entraîne une diminution de la consommation globale d'essence, mais elle augmente car la diminution du coût entraîne l'allongement des distances parcourues. Ce défi avait déjà été identifié concernant le numérique par l'Information Society Forum qui, dès 1998, concluait : « Bien qu'il y ait toujours eu l'espoir de traiter les problèmes imminents en appliquant de nouvelles solutions techniques puissantes, cette voie n'a été couronnée de succès qu'à court terme ; à long terme, elle a presque invariablement conduit à une aggravation de la situation. » Bien que l'effet rebond ne soit pas systématique, la rapidité et la facilité avec laquelle le numérique peut se déployer — notamment pour les spécificités évoquées plus haut — laissent à penser qu'il y serait particulièrement enclin<sup>9</sup>. Étudié dans la littérature économique sous le nom de postulat de Khazzoom–Brookes, Saunders [6] argue que dans un cadre néoclassique de croissance économique, il y a de grandes chances que cet effet soit inévitable et encore plus exacerbé. L'auteur du rapport examinant les allégations des rapports de la GeSI conclut dans ce sens : « Aujourd'hui, il semble que les gains d'efficacité et d'optimisation permettront généralement d'augmenter la productivité et le flux de matière et d'énergie associé, pas de le stabiliser ou de le réduire. » [5]. De plus, la recherche de ces gains, en lesquels tant d'espoirs sont placés, est susceptible de renforcer cette impasse. En effet, l'optimisation de certains systèmes ou infrastructures réaffirment leur importance dans la structuration de notre société. Ces choix techniques augmentent ainsi dangereusement notre dépendance envers eux, et nous engageant sur le long terme dans une trajectoire écologique non viable.

## 4 Conclusion

Cet article propose une analyse de la rhétorique des arènes politiques et économiques ayant historiquement contribué à considérer les technologies numériques comme une opportunité pour la transition écologique. Nous avons relevé que le contenu de ces discours s'appuie dans une large mesure sur une production de savoirs dont le cadrage est opportunément restreint et dont les hypothèses sont mises en défaut par la littérature existante, participant de la sorte à une production d'igno-

<sup>9</sup>Certains chercheurs appellent cela le rebond digital [2]

rance manifeste. Le contexte socio-historique de l'affirmation d'un rôle bénéfique du dispositif IA pour l'écologie ne peut que nous enjoindre à un redoublement de vigilance. Comme de nombreux travaux le mentionnent, la spécificité d'une centralisation de l'information couplée à son transfert de manière instantanée et diffuse à faible coût, ainsi que le contexte économique dans lequel nous sommes, indiquent que le numérique est enclin à des risques d'effets rebonds massifs et prolifiques. Il semble donc très probable que les transformations structurelles et sociétales induites par le dispositif IA participent à l'accélération des dynamiques actuelles à l'heure où il est impératif de les inverser. Face à ce constat, nous ne pouvons que pointer l'irrationalité des injonctions à la poursuite de la numérisation au nom de l'écologie, avec l'agriculture numérique par exemple, portées par l'arène politique jusque dans nos laboratoires. Dès lors, ces éléments devraient plutôt nous astreindre à considérer sérieusement l'hypothèse que le numérique puisse être incompatible avec une trajectoire écologique souhaitable. Bien qu'il soit impossible de décrire précisément la manière dont l'accélération de la numérisation et du développement de l'IA transformera la société, l'importance des directions empruntées aujourd'hui par la recherche scientifique est telle que cela devrait nous inciter, *a minima*, à adopter un principe de précaution. Les discours actuels ainsi que les subventions massives adressées à ce secteur, sans réelle prise en compte du passé, semblent malheureusement relever plus de la croyance idéologique que d'une véritable tentative de reprise de contrôle de notre trajectoire sociotechnique. Le dernier rapport publié en 2022 de l'OCDE sur les impacts environnementaux de l'IA l'illustre parfaitement : après avoir admis que nous ne sommes pas en mesure de quantifier ses impacts indirects, ce rapport conclut néanmoins que « l'IA doit faire partie de la solution ». C'est pourquoi il nous semble nécessaire d'oser sortir de notre rôle d'universitaire afin d'endosser celui de citoyen-e, et d'inviter la communauté scientifique à penser et à organiser la fin de ses recherches à vocation d'optimisation et de déploiement du dispositif IA au nom du risque d'accélération de l'annéantissement du vivant auxquelles elles participent aujourd'hui.

## Références

- [1] B. BÉCHADERGUE : À la recherche de l'empreinte perdue. enquête sur le processus sociotechnique européen de constitution de savoirs relatifs aux impacts environnementaux du numérique. École des hautes Études en sciences sociales (mémoire), 2021.
- [2] V. COROAMĂ et F. MATTERN : Digital rebound - why digitalization will not redeem us our environmental sins. *In ICT for Sustainability*, 2019.
- [3] ONU : *The Sustainable Development Goals report, Goal 12 : Responsible Consumption and Production*. 2019.
- [4] T. PARRIQUE, J. BARTH, F. BRIENS, J. SPANGENBERG et A. KRAUSPOLK : *Decoupling Debunked. Evidence and arguments against green growth as a sole strategy for sustainability. A study edited by the European Environment Bureau EEB*. 2019.
- [5] G. ROUSSILHE : *Que peut le numérique pour la transition écologique ? État des lieux de l'empreinte écologique du numérique et étude de ses impacts positifs annoncés pour la transition*. 2021.
- [6] H. D. SAUNDERS : The khazzoom-brookes postulate and neoclassical growth. *The Energy Journal*, 13:131–148, 1992.
- [7] T. VADÉN, V. LÄHDE, A. MAJAVA, P. JÄRVENSIVU, T. TOIVANEN, E. HAKALA et J.T. ERONEN : Decoupling for ecological sustainability : A categorisation and review of research literature. *Environmental Science & Policy*, 112:236–244, 2020.
- [8] J. D. WARD, P. C. SUTTON, A. D. WERNER, R. COSTANZA, S. H. MOHR et C. T. SIMMONS : Is decoupling gdp growth from environmental impact possible? *PLOS ONE*, 11(10):1–14, 2016.