

L'horizon des possibles de la décarbonation de l'industrie : la fuite en avant technologique est-elle une fatalité ou d'autres solutions alternatives peuvent-elles être envisagées ?¹

The horizon of possibilities for industrial decarbonization: is technological progress inevitable, or are there other alternatives?

Sophie BOUTILLIER¹, Dorian MAILLARD²

¹ Université du Littoral-Côte d'Opale, Centre de Recherche sur l'innovation et les stratégies industrielles – Laboratoire de Recherche sur l'Industrie et l'Innovation, Sophie.boutillier@univ-littoral.fr

² Université de Lorraine, Laboratoire LOTERR - Centre de Recherche en Géographie, dorian.maillard@univ-lorraine.fr

RÉSUMÉ. La question du réchauffement climatique constitue en ce début de 21^e siècle un sujet de première importance tant sur les plans économique et social que politique et forcément écologique. Pour réduire les émissions de CO₂ ou décarbonation est l'objectif à atteindre pour les 20 ou 30 années à venir, via la neutralité carbone. Deux grandes options sont affichées pour atteindre cet objectif. La première s'inscrit dans une espèce de fuite en avant, en privilégiant l'innovation technique. La seconde met au contraire l'accent sur la sobriété énergétique et la redéfinition des besoins sociaux en soutenant un nouveau modèle socioéconomique.

ABSTRACT. At the start of the 21st century, global warming is a topic of paramount importance in economic, social, political, and, inevitably, ecological terms. Reducing CO₂ emissions, or decarbonization, is the goal for the next 20 to 30 years, via carbon neutrality. There are two main options for achieving this goal. The first involves a technical escape, focusing on technical innovation. The second, on the contrary, emphasizes exclusively energy efficiency and the redefinition of social needs by supporting a new socioeconomic model.

MOTS-CLÉS. innovation, environnement, décarbonation, sobriété énergétique.

KEYWORDS. innovation, environment, decarbonization, energy efficiency.

1. Introduction

Face au réchauffement climatique dont l'origine est indéniablement anthropique et à l'émission excessive de gaz à effet de serre, notamment de CO₂, la solution de bon sens, est forcément de décarboner les activités économiques (agriculture, industrie et services). Décarboner consiste en d'autres termes à réduire la consommation des énergies d'origine fossile (charbon, pétrole et méthane). Il ne s'agit, en effet, pas tant, comme l'étymologie du verbe pourrait le laisser supposer, de rabattre de nos usages tout recours à l'élément chimique carbone que d'éviter le déstockage d'un atome de carbone qui, lors de la combustion de la molécule fossile (méthane, pétrole, charbon), s'associe chimiquement au comburant (dioxygène) pour former une molécule fatale de dioxyde de carbone. Le défi est de taille puisque la combustion de ces molécules de carbone fossile représente toujours à l'heure actuelle près de 80% de l'énergie primaire utilisée dans monde².

¹ Ce numéro de *Technologie & Innovation* s'inscrit dans le cadre de l'ANR-IRETRA (Innovation, Réindustrialisation des territoires et transformation du Travail) et d'une convention de recherche avec la Confédération Générale du travail.

² <https://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/economie/article/l-energie-au-coeur-de-la-lutte-contre-le-changement-climatique>

Quatre options se présentent grossièrement: 1/ maintenir l'usage de ces molécules carbonées fossiles mais en s'assurant que les émissions résultant de leur combustion soient capturées, réutilisées, voire stockées avant leur libération dans l'atmosphère (captage-usage-stockage du CO₂) ; 2/ développer de nouveaux procédés techniques capables de se passer de ces molécules en les substituant par des ressources alternatives décarbonées (énergies renouvelables et/ou fissile) ; 3/ agir sur les effets plus que sur les causes en modifiant purement et simplement le climat, voire l'équilibre énergétique de la Terre par le biais de divers procédés chimiques (géo-ingénierie [DEG, 2024]) ; 4/ restreindre les émissions à la source par la réduction pure et simple des occasions d'émission, en optant pour des pratiques raisonnées d'optimisation (sobriété et coopérations), voire de décroissance des usages, ce qui implique de revoir de façon fondamentale le modèle économique et industriel développé depuis le début du 19^e siècle (début théorique de l'anthropocène selon les travaux de Paul Crutzen [DEG, 2024]).

Loin d'être substituables l'une à l'autre, ainsi que l'on tend communément à le penser, ces options doivent en réalité être pensées de manière systémique et cumulative. Les trois premières options s'avèrent, en effet, à double tranchant dans la mesure où le progrès technique est toujours appréhendé comme la solution privilégiée, le modèle industriel de croissance basé sur l'exploitation des ressources (non renouvelables) et des hommes n'y étant commodément pas remis en question [DAV, 2025]. La construction d'éoliennes et de panneaux solaires nécessite l'exploitation de terres rares³ et par conséquent l'intensification de l'exploitation minière [IZO, 2024], elle-même génératrice d'émission de CO₂ et de dégâts sur la biodiversité. De même, pour ce qui est du captage-usage-stockage du CO₂, l'idée sous-jacente est que l'on peut continuer à émettre sans limite, les émissions de CO₂ devenant d'une part, une source commerciale de matière première valorisable dans le cadre d'une espèce d'économie circulaire quasi-miraculeuse (d'énergies, comme le e-fuel, voire d'autres intrants, comme par exemple des engrains, du ciment, etc.)⁴ ; d'autre part, un faux problème, le captage atmosphérique du CO₂ permettant de remettre sous terre les gaz à effet de serre que l'homme a émis au cours des millions d'années de son existence. De son côté, la géo-ingénierie reste cantonnée au registre de la fiction puisque ses techniques restent bloquées au stade d'expérimentations, aussi bien coûteuses en devises qu'émettrices de CO₂. Il serait donc hautement déraisonnable de faire reposer sur une seule de ces options tous nos espoirs, et efforts, de mise en œuvre effective de nos impératifs (eux intraitables) de décarbonation.

L'ampleur du changement engendrée par l'évolution du climat est telle qu'elle a conduit à l'émergence du concept de l'anthropocène, soit à une nouvelle ère géologique (qui pour la première fois dans l'histoire de la Terre est le produit de l'action humaine). Ce concept est bien sûr largement rediscuté, mais il a le mérite d'exister traduisant en cela le grand intérêt que lui accorde la communauté scientifique [BON, 2016 ; DEG, 2024]. Le concept de l'anthropocène met clairement en évidence une corrélation positive entre croissance économique et pollutions en raison d'une pression croissante sur les ressources naturelles. Quels sont les modèles économiques qui permettent de le justifier et surtout comment réduire les émissions de CO₂ grâce des mesures de politique publique appropriées ? La croissance économique génère en effet l'augmentation des émissions de CO₂, puisque l'on construit des usines, des routes, des machines... Dans les années 1950, Kuznets [KUZ, 1955] avait établi un lien entre croissance économique et inégalités sociales considérant que la croissance économique entraîne dans un premier temps une augmentation des inégalités sociales, puis une baisse de celles-ci grâce, précisément, aux surplus de richesse créée. Quelques décennies plus tard, Grossman et Krueger [GRO, 1995] reprennent la théorie de Kuznets pour expliquer, en substance que la pollution augmente avec la croissance économique, avant de décroître, les ressources additionnelles produites étant (au moins en partie) réinvesties dans la lutte contre la pollution. Ce type de théories a bien évidemment fait l'objet de critiques, car si les pays riches sont relativement peu pollués (en dépit de leur rôle pionnier en matière d'industrialisation, c'est parce qu'ils disposent d'une réglementation stricte sur le plan

³ <https://librairie.ademe.fr/energies/492-terres-rares-energies-renouvelables-et-stockage-d-energies.html#>

⁴ <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/climat-environnement-et-economie-circulaire/reduire-les-emissions-industrielles-co2-captage-et-stockage-du-co2>

environnemental. Celle-ci pèse logiquement sur leurs coûts de production, ce qui peut les conduire à développer de nouvelles technologies, certes moins polluantes, mais aussi à délocaliser leur production dans des pays plus pauvres, où les réglementations environnementale et sociale s'avèrent plus laxistes. La libéralisation économique et la mobilité croissante des capitaux ne font qu'accélérer ce mécanisme de course aux coûts bas et de dégradations environnementales dans les pays en développement [NOU, 2007].

Dans la même lignée, l'économiste américain William D. Nordhaus [NOR, 1991], prix Nobel d'économie 2018, considère qu'il existe une corrélation positive entre croissance économique, en tant que source de richesses, et lutte contre le réchauffement climatique, puisque c'est précisément grâce au surplus de richesse (et au progrès technique) que l'économie sera en capacité de produire des technologies novatrices permettant de lutter contre le réchauffement climatique, au premier rang desquelles l'intelligence artificielle. Ainsi, selon l'ONU⁵, l'intelligence artificielle peut aider à combattre et atténuer les effets du changement climatique par le biais de l'amélioration technique de la vitesse et de l'ampleur du traitement de données qu'elle permet. Cela omet, toutefois, que l'intelligence artificielle s'avère fortement consommatrice d'énergie (et par conséquent émettrice de CO₂) et d'eau. Par exemple, en 2024, les émissions de CO₂ de Google, causées par l'intelligence artificielle, ont augmenté de plus de 13% en un an et de 48% sur cinq ans (*Le Monde*, 2/07/2024).

Doit-on relire en ce début de 21^e siècle, le rapport Meadows [MEA, 1972] qui au début des années 1970 pointait déjà du doigt l'impossibilité d'une croissance infinie dans un monde fini ? Ce qui nous conduit dans le cadre de cet article introductif à discuter des deux types d'orientation en matière de lutte contre le réchauffement climatique, à savoir l'orientation technologique, ou technophile, et l'orientation qui privilégie la sobriété énergétique, une croissance du Produit Intérieur Brut (PIB) plus lente, voire la décroissance. On peut raisonnablement s'interroger sur l'orientation technophile, lorsque des procédés techniques nouveaux ou sensés l'être, comme le recyclage des déchets (via l'économie circulaire et l'écologie industrielle) [LUP, 2011], s'avèrent en réalité source de nouvelles pollutions ou favorisent la consommation de masse qu'ils sont pourtant censés combattre. Il en va tout autant de la décarbonation, thématique majeure de ce second numéro de *Technologie & Innovation*. Les nouvelles techniques pour décarboner l'industrie nécessitent des investissements très importants pour développer des techniques qui, pour nombre d'entre elles, n'ont pas fait leurs preuves en matière de réduction des émissions de CO₂ et s'avèrent bien souvent confrontées à des phénomènes bloquants de contestation locale contraignant leur déploiement effectif dans les territoires (ex. échec du projet de captage-usage-stockage Pycasso à Lacq dans le sud de la France)⁶. Le risque pèse donc de ne jamais concrètement atteindre les objectifs de décarbonation [TOU, 2025 ; BON, 2025], d'adaptation soutenable de nos modes de vie et de perpétuation de l'habitabilité du système-Terre.

2. La fuite sans fin vers le progrès technique

2.1. On n'arrête pas le progrès ?

On n'arrête pas le progrès ! L'introduction de cette expression remonte aux années 1890. Elle fut diffusée dans la presse à l'occasion de l'avènement des courses automobiles, dont l'intérêt ne sautait alors pas aux yeux d'une majeure partie de la population qui concevait l'automobile comme une machine sans intérêt et dangereuse [JAR, 2025]. Vieux de plus d'un siècle, ce vieil adage populaire reste pourtant des plus actuels en ce début de 21^e siècle. Face au mur du dérèglement climatique et de la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre, la solution vers laquelle Etats, et industriels, se tournent reste toujours et encore l'innovation technologique. En même temps, la solution se révèle des plus accommodantes puisqu'elle va dans le sens « business as usual », en permettant notamment de transformer (ce qui était jusqu'alors considéré comme) des déchets industriels inutiles

⁵ <https://news.un.org/fr/story/2023/11/1140337>

⁶ <https://www.humanite.fr/environnement/politique-industrielle/cest-lopacite-la-plus-totale-du-bearn-jusquau-bassin-parisien-limpossible-equation-du-stockage-carbone>

en levier de création de valeur marchande [DEG, 2024]. L'émergence d'un marché du carbone et d'un nouvel écosystème économique « innovant » de start up tournées vers le captage-usage-stockage du CO₂ en constitue une parfaite illustration. L'actualité se trouve aujourd'hui rythmée par l'expérimentation de nouveaux procédés, alors même que certaines techniques existent en réalité depuis la guerre froide et ont été développées pour répondre à des objectifs militaires. Mais, le développement de ces nouvelles techniques en matière d'ingénierie climatique est-il vraiment une surprise dans la société industrielle qui reste toujours tributaires des apories de la pensée moderne (dualisme nature-culture) et des excès de l'économie capitaliste. Ceux-ci conduisent, en effet, à la dégradation des liens entre les sociétés humaines et le substrat dont elles dépendent, en poussant notamment toujours plus loin l'exploitation des ressources naturelles sous toutes leurs formes [FOS, 2011]. Déjà au 19^e siècle, Marx montrait que le capitaliste exploitant, par exemple, une parcelle de forêt au titre de la propriété privée a en réalité bien peu d'intérêt économique à réaliser les investissements nécessaires au reboisement de sa parcelle et, ainsi, à la perpétuation de la ressource. Il a même, bien au contraire, intérêt à accélérer son épuisement pour deux raisons toutes simples qui sont purement économiques : 1/ tout délai supplémentaire dans la rotation du capital (soit une augmentation de la période d'immobilisation du capital) entraîne une diminution du taux de profit ; 2/ le développement du capitalisme entraîne une forte augmentation de la demande, et donc des prix, des matières premières de toutes natures auquel il ne peut que se faire un plaisir de répondre [HAU, 2022]. L'ensemble de ces considérations ne peut donc que nous conduire à réinterroger la vertu réelle du progrès technique.

2.2. Progrès social ou progrès technique ?

La notion de progrès est en réalité loin d'être neutre. Elle s'avère même des plus complexes. Le concept de « régime d'historicité » [HAR, 2003] constitue, en ce sens, un outil précieux de déploiement de celle-ci. Il se réfère à l'articulation que propose une société entre passé, présent et futur. Chaque société a sa propre conception du progrès (technique, philosophique, religieuse, etc.), certaines réussissant même à s'en passer [TER, 2010]. En Europe occidentale, la conception actuelle du progrès est le régime d'historicité qui s'est développé à partir de la Renaissance, avant d'être relayé par les Lumières et de s'épanouir avec les révolutions industrielles du 19^e siècle. Il se fonde sur une vision linéaire du temps, d'inspiration chrétienne, considérant que le futur sera toujours meilleur que le passé ou le présent. Ce n'est cependant qu'à partir du 19^e siècle que le progrès se trouve qualifié de « technique », présenté comme se conjuguant avec le progrès social, alors même que les ouvriers travaillaient dans les conditions très difficiles des manufactures (actionnées par les machines à vapeur) ou des mines. C'est à ce moment que la conception de l'avenir commence sa fusion progressive avec les techniques basées sur l'usage des énergies fossiles. De grands espoirs sont alors placés dans le charbon, puis le pétrole. Puis s'enclenche, à partir de la première moitié du 19^e siècle, « l'âge des machines ». La diffusion de ces dernières dans l'industrie s'est en réalité avérée, contrairement aux idées reçues, très lente. Fragiles au début du 19^e siècle, les machines n'envahissent les manufactures qu'à partir de la fin du 19^e siècle. Cette diffusion des machines dans la vie sociale s'est accompagnée de discours et de récits utopiques développant une vision évolutionniste et progressive de l'Histoire [JAR, 2016]. Marcelin Berthelot, chimiste français de la fin du 19^e siècle, explique par exemple que l'an 2000 sera caractérisé par le triomphe d'énergies nouvelles (à l'époque il s'agissait d'énergies basées sur la chimie de synthèse dans laquelle Berthelot plaçait de grands espoirs, et pas seulement pour l'énergie, mais aussi pour la santé et l'alimentation) qui auront débarrassé le monde des mines de charbon et par conséquent des ... grèves des mineurs [FRE, 2022] ! En un mot, les machines et les nouvelles énergies apporteront la paix sociale.

Aujourd'hui encore, nous restons subjugués par cette injonction, et peut-être davantage encore du fait du contexte actuel de lutte contre le changement climatique. L'histoire des techniques démontre, pourtant, que celle-ci est loin d'être linéaire puisqu'elle est marquée par des abandons, des renoncements, des interdictions [JAR, 2025], et par des promesses non tenues [EDG, 2003]. Tout cela, sans même parler des rapports de forces entre les firmes. La plus puissante d'entre elles peut

aujourd’hui imposer sa primauté technologique aux autres, conduisant à l’adoption progressive de *sa* technologie par les autres acteurs et, ainsi, à la formation d’une dépendance de sentier vis-à-vis de la technique dominante qui s’avère indispensable en dépit des externalités négatives qu’elle produit [ART, 1989]. Comment est-il, dès lors, possible, dans ces conditions, d’envisager la sortie des énergies fossiles ? Celles-ci restent toujours massivement utilisées par les entreprises, ce que favorise les progrès techniques réalisés dans les technologies de forage qui repoussent toujours plus loin les limites de la mise en exploitation du sous-sol et des fonds marins.

2.3. Le progrès technique bégaye

De même, certaines technologies qualifiées de « nouvelles » jettent en réalité le voile sur une réalité toute autre. Les promesses véhiculées autour de la mobilité hydrogène (décarbonée) en constituent un parfait exemple. Les premiers brevets déposés sur ce sujet remontent en fait à la fin du 19^e siècle, avant d’être abandonnés pendant plusieurs décennies, et de faire à nouveau, périodiquement (ex. lors des chocs pétroliers des années 1970) l’objet de l’attention des industriels et des Etats. De plus, en dépit de l’effervescence actuelle sur le sujet, la mobilité hydrogène est encore loin d’avoir fait ses preuves et commence même à empiriquement décevoir les espoirs que l’on plaçait en elle [MIC, 2024 ; LAM, 2021]. Ainsi, bien que les annonces industrielles sur le sujet défraient la chronique, l’avion à hydrogène appartient encore, concrètement, à un futur lointain.

Par ailleurs, les représentations du progrès technique tendent à focaliser notre attention sur les techniques qui sont effectivement parvenues à se substituer à d’autres [JAR, 2025], jetant, de ce fait, un voile sur toutes celles qui ne sont pas parvenues à atteindre cet objectif. On peut, par conséquent, raisonnablement s’interroger sur l’efficacité des techniques actuellement considérées comme au cœur de la décarbonation future de l’industrie. N’atteindront-elles jamais un degré suffisant de maturité pour se substituer à celles sur lesquelles se fondent le fonctionnement actuel (non soutenable) de la société industrielle ? Ne risquons-nous pas de passer à côté des impératifs de décarbonation si les industriels et les Etats misent tout sur des promesses technologiques qu’ils s’avèrent en réalité impossible de déployer opérationnellement ? C’est assez difficile de réaliser des projections sur ce sujet sans sombrer dans la science-fiction. Bien que cette dernière ne soit, au demeurant, pas exempt d’intérêt [MIC, 2025], il convient de conduire un examen fin de ces questions au vu des investissements conséquents exigés par le développement de ces nouvelles techniques et de la longue durée d’amortissement qui y est associée.

Au dépit de ces raisonnables réticences, une seule solution continue aujourd’hui de s’imposer au sein de l’agenda institutionnel en vue de lutter contre le dérèglement climatique : l’innovation techn(olog)ique verte. Ces « éco-innovations » [OCDE, 2010] sont considérées comme des outils essentiels de l’avènement d’une croissance verte, toute innovation de produit, de procédé ou d’ordre organisationnelle s’y trouve bienvenue tant qu’elle garantit la croissance économique et le maintien des conditions de vie des pays développés. Celles-ci se retrouvent au cœur de l’agenda institutionnel des différents plans européen (*Green Deal*, 2020), français (*Plan de Relance France 2030*, 2021), et même étatsunien (*Inflation Reduction Act*, 2022), chargés d’accompagner la mise en œuvre des engagements de réduction des émissions de CO₂ pris par ces pays dans le cadre des différentes « Conférences des Parties » ou COP. Dans le cas français, l’accent est plus particulièrement mis sur les filières énergétiques nucléaire (avec un nouveau type de réacteur, de plus petite taille) et hydrogène (dit « vert », produit à partir de l’énergie renouvelable), la décarbonation de l’industrie (grâce notamment à l’électrification des procédés), la mobilité électrique et le développement d’une aviation bas-carbone. Depuis plus récemment (2023), une attention se trouve également portée du côté du captage et stockage du CO₂, tout d’abord *on-shore* (stockage géologique sur le sol métropolitain), mais également, à présent, face aux multiples blocages rencontrés par les quelques projets envisagés, *off-shore* (stockage géologique au large des côtes françaises). Un rapide bilan de ces projets montre clairement qu’ils ne sont pas matures et restent largement bloqués au stade de l’expérimentation. Cela est d’autant plus le cas, aujourd’hui, que la conjoncture économique est marquée par une baisse significative du prix du pétrole, qui n’a jamais été aussi bas depuis ces quatre dernières années (*Le*

Monde, 18/05/2025). Dans de telles conditions, pourquoi investir des millions d'euros ou de dollars pour en réduire la consommation ? Malgré cela, les espoirs placés dans l'innovation technique pour faire face au réchauffement climatique sont tels que l'idée d'une nouvelle « révolution industrielle », censée alimenter l'émergence d'une croissance verte, s'impose aujourd'hui dans les considérations institutionnelles européennes. Cela se traduit dans la conception d'une industrie dite 4.0, voire 5.0 [BOU, 2024], qui associe digitalisation et lutte contre le changement climatique. La digitalisation des procédés industriels est, en effet, censée assurer un suivi renforcé de la consommation d'énergie d'équipements industriels traditionnellement fortement consommateurs d'énergies fossiles et d'eau, et, ainsi, favoriser l'optimisation de la gestion des ressources mobilisées. Pourtant, ce que l'on nomme « croissance verte » réside dans une nouvelle forme d'exploitation de la nature [TOR, 2021]. La nature entre dans la logique capitaliste. Pour ne citer qu'un exemple, les forêts ne sont plus des espaces de biodiversité animale et végétale, mais sont devenues des puits de carbone qui font l'objet de transaction entre les pays et/ou les entreprises, pour atteindre la neutralité carbone fixée par les accords internationaux, d'autant plus la neutralité carbone ne signifie pas forcément une baisse des émissions de carbone, mais un équilibre entre émissions et absorption grâce aux puits de carbone. La solution réside par conséquent moins dans l'innovation technique (qui est la cause du problème), mais dans la sobriété énergétique, voire la décroissance.

2.4. Des leviers technologiques très variés

Pourtant, la sobriété énergétique fait bel et bien partie des solutions envisagées pour réduire les émissions de CO₂. Selon l'ADEME⁷, les différents leviers technologiques de décarbonation industrielle se répartissent en quatre groupes :

1/ Sobriété, efficacité énergétique et récupération de la chaleur fatale : Il s'agit de privilégier des actions qui réduisent les consommations en énergie, mais aussi les consommations de matières afin, en aval, de limiter la production de déchets. L'accent y est, à la fois, mis sur l'efficacité énergétique via le remplacement des équipements peu performants, ainsi que sur l'avènement de nouveaux paradigmes industriels censés optimiser l'usage-gestion des ressources entre actifs industriels (économie circulaire et écologie industrielle) ;

2/ Modification des intrants de matières : Cela suppose l'utilisation de matières premières issus du recyclage, que ce soit en métallurgie, plasturgie, papeterie, etc. ;

3/ Substitution des énergies fossiles par des énergies décarbonées : L'objectif poursuivi est de modifier le mix énergétique français, d'une part, grâce à la valorisation de ressources énergétiques renouvelables du type biomasse, géothermie, etc. ; d'autre part, par l'électrification directe (installation de fours électriques, de pompes à chaleur...) ou encore indirecte (production décarbonée d'intrants industriels : ex. hydrogène) ;

4/ Captage, usage et stockage du CO₂ : Le CO₂ peut être capté par différents procédés, réutilisé dans le cadre de procédés industriels (ex. production de e-fuel), et stocké géologiquement à terre ou en mer.

Pour l'heure, en dépit des mesures de politique publique lancées, selon la DGE⁸, le bilan de la décarbonation en France est assez mitigé. Entre 1990 et 2019, les émissions de l'industrie manufacturière ont baissé de 45%. Cette baisse qui a priori est tout à fait positive, résulte principalement de l'amélioration de l'efficacité énergétique des entreprises, de l'intensité en émissions de l'énergie et des procédés industriels utilisés, mais également d'une baisse de l'activité industrielle. Mais la baisse de l'activité industrielle a été deux fois moins importante que l'amélioration de l'efficacité énergétique et de l'intensité en émissions des procédés industriels. Par exemple, à ce jour, le recyclage est le principal levier de la décarbonation dans les industries de la sidérurgie et de l'aluminium, qui sont parmi les plus grosses émettrices de CO₂. Cependant, selon la Statistique

⁷ [file:///193.49.203.169/redirect\\$/boutilli/Downloads/DecarbonerLindustrieADEME2025.pdf](file:///193.49.203.169/redirect$/boutilli/Downloads/DecarbonerLindustrieADEME2025.pdf)

⁸ <https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/Publications/2023/Themas/themas-dge-n8-decarbonation.pdf>

Publique de l'énergie, des transports, du logement et de l'environnement (SDES)⁹, et au regard de nos propos introductifs sur les inégalités internationales sur le plan environnemental, les émissions associées aux importations représentent environ 56% de l'empreinte carbone de la France, réparties entre l'importation de biens et services destinées à la demande finale intérieure (23%), et aux importations de matières premières ou de produits semi-finis pour répondre aux besoins de l'industrie française (33%). Ainsi, alors même que les émissions territoriales ont baissé, les émissions importées ont augmenté. Ces données statistiques mettent en évidence le processus de délocalisation de la production industrielle et le schéma complexe de la division internationale de la production au niveau mondial qui perdure, voire s'intensifie [BER, 2006 ; MIC, 1998]. Depuis les années 1970, le commerce maritime mondial est passé de 2605 à 10 985 millions de tonnes de marchandises¹⁰, traduisant une intensification des échanges marchands, mais également de la division internationale du travail, d'échange de composants et de produits intermédiaires entre les entreprises [ALL, 2020]. La réduction des émissions de CO₂ semble donc au niveau international surtout constituer un jeu à somme nulle, puisque la réduction des émissions des pays développés se trouve largement compensée par une augmentation des émissions par les moins développés...

3. Du progrès aux régrès

3.1. Le revers du progrès technique

Cependant l'idéologie du progrès technique a toujours fait l'objet de fortes critiques. Déjà au 19^e siècle, le géographe Elisée Reclus affirmait que chaque progrès se payait par un « régrès » qui désigne une dégradation pour les êtres humains et la nature [JAR, 2025]. Cela s'inscrit dans la reconnaissance, par Elisée Reclus, de la capacité des êtres humains de se poser en « agents géologiques », capables de transformer la nature. Il démontre, en effet, que l'amélioration continue des conditions de vie de l'humanité s'accompagne d'un impact croissant de l'activité humaine sur le système-Terre, que ce soit par l'anthropisation des paysages ou du sous-sol, posant ainsi les bases de que nous reconnaissons aujourd'hui comme l'anthropocène. Par ailleurs, il reconnaissait déjà l'existence d'une diversité de conceptions du progrès et du développement, sans qu'il ne soit possible de leur attribuer un degré donné de supériorité, les « régrès » y occupant toujours un rôle central. La transformation des sociétés s'avère, ainsi, bien moins linéaire qu'on ne le pense, les sociétés dites civilisées n'étant pas toujours celles que l'on croit... [PEL, 2019].

Comme l'avait déjà pressenti Reclus, les choix techniques qui sont opérés par une société peuvent donc s'avérer lourds de conséquences (négatives) pour les générations futures. Globalement, les débats actuels relatifs au changement climatique le montrent clairement puisque nous avons d'ores et déjà à faire face à l'impact environnemental (le seuil fatidique des +1,5°C a été franchi en 2024) des émissions cumulées de l'activité industrielle humaine depuis la fin du 18^e siècle. Plus localement, les territoires qui s'étaient développés sur le déploiement de systèmes productifs fondés sur la consommation d'énergies fossiles (industries de base du nord et de l'est de la France) doivent aujourd'hui faire face à des situations cumulatives de crises démographique, sociale, économique et environnementale. Le Bassin minier du Nord-Pas-de-Calais en constitue un parfait exemple. Cœur vivant de l'activité charbonnière française, ce territoire jusqu'alors à dominante rurale a été profondément restructuré par le déploiement de l'activité charbonnière, au point de voir ses paysages, sa géologie, sa structure urbaine, sociale et culturelle profondément refaçonné pour servir l'optimisation économique des charbonnages (« système spatial de la mine » [BAU, 1994]). 35 ans après la fermeture du dernier puits de mine du bassin, le territoire reste toujours « durement touché par les fragilités sociales »¹¹, le déclin démographique de ses (anciennes) polarités minières, la croissance du vote d'extrême-droite et la difficulté des classes populaires fragilisées à s'adapter à cet

⁹ <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/empreinte-carbone-de-la-france-de-1990-2023>

¹⁰ <https://fr.statista.com/infographie/24533/commerce-maritime-mondial-evolution-volume-de-fret-maritime-de-marchandises/>

¹¹ <https://www.insee.fr/fr/statistiques/4214601>

environnement de vie en recomposition [MAI, 2024a]. De même, au-delà de ces seules implications socio-spatiales, les 250 communes du Bassin minier restent également sujettes à des risques cumulatifs d'affaissement minier, de pollutions résiduelles, d'émissions de gaz (remontée du fameux grisou) et d'inondabilité associés aux perturbations du sous-sol provoquées par l'activité minière [MEI, 1998]. Encore aujourd'hui, 74 stations de relevage des eaux doivent continument fonctionner pour éviter l'ennoiement de près des deux-tiers d'un territoire toujours habité par 1,2 million d'habitants¹². Le Bassin minier du Nord-Pas-de-Calais constitue l'archétype même du développement non-durable (dans le temps et dans l'espace), de l'impact d'une activité industrielle prédatrice des industriels sur leur environnement de vie qui, une fois l'exploitation devenue non-rentabilisable, plient bagage pour ne laisser derrière eux qu'un patrimoine immobilier vieillissant, une perturbation irrémédiable des écosystèmes locaux, une population ankylosée par un siècle de paternalisme, et des polarités urbaines dévitalisées. Charge alors à la collectivité de prendre le relais et d'accompagner la difficile reconversion [DAV, 2006] d'un territoire qui perd, au-delà de la seule question de l'emploi, les principes même de son existante et de son organisation urbaine, sociale et culturelle.

3.2. Les enseignements du passé

Cette situation se retrouve aujourd'hui (à divers degrés) dans de nombreux territoires ouest-européens similairement (re)façonnés par le déploiement des industries lourdes carbonées du 19^e siècle. Pour beaucoup d'entre eux, décarbonation rime aujourd'hui avec réindustrialisation. Le déploiement des éco-innovations nourrit l'espoir de voir s'implanter de nouvelles industries « vertes », sources de création d'emplois industriels durables, à même de faire oublier les désillusions des précédentes politiques de reconversion industrielle (échec des objectifs de substitution sectorielle). Après plus d'un demi-siècle de résilience empêchée, la dépendance de sentier des plus forts sur ces territoires interroge la validité de ces nouveaux espoirs de relance [MAI, 2024b]. Après tout, la désindustrialisation est un processus destructeur [FON, 2019 ; MIN, 2019] quasi permanent, au point que l'on pourrait parler de « désindustrialisation perpétuelle », puisque des phénomènes de ce genre étaient observables avant même l'entrée de l'humanité dans l'ère industrielle [MAR, 2013]. Des activités industrielles se développent sur un territoire donné au point de façonner sa géographie, son économie et sa culture, puis périclite pour diverses raisons (apparition d'une technologie concurrence, épuisement d'une source de matière première, apparition d'un nouveau concurrent, etc.) laissant des territoires désertés et des populations désœuvrées.

Pourtant le questionnement sur le changement climatique et sur ses conséquences économiques et sociales n'est pas nouveau. Il remonte à la Renaissance. Mais, pendant la période préindustrielle, les interrogations des scientifiques et des autorités publiques ne portaient pas sur les émissions de CO₂ que sur le cycle de l'eau, notamment en lien avec la question de la déforestation [FER, 2020]. Ce qui traduit manifestement les interrogations d'alors qui ne portaient pas tant sur l'industrie, que sur l'agriculture, la majorité de la population travaillant encore dans le secteur primaire (gestion de l'eau, déforestation, fertilité des sols, etc.). La pérennité de ces préoccupations, malgré la montée ultérieure de celles associées aux rejets de polluants atmosphériques, démontre surtout qu'un questionnement scientifique ne se substitue pas à un autre, mais, bien plutôt, qu'il s'empile sur les problématiques précédemment identifiées. Face à cela, les Etats et les industriels continuent de briller par leur manque de réaction, la réduction des émissions de CO₂ étant, avant tout, considérés comme une opportunité de création de valeur. Les éco-innovations retenues pour la décarbonation ne peuvent, en ce sens, être réduits à leur seule efficacité technique puisqu'elles s'avèrent également traversés par des enjeux économiques, politiques et territoriaux. Par exemple, la première unité de captage et de stockage du CO₂ (Sleipner : Norvège) fêtera en 2026 les 30 ans de sa mise en service (1996). Son implantation succéda à la mise en place d'une taxe carbone par l'Etat norvégien en 1991 qui ouvrit de nouvelles perspectives économiques favorables au déploiement du projet [CHA, 2021]. De même, détenue majoritairement par l'Etat norvégien, avec le concours de financements privés (Shell, TotalEnergie et Equinor), l'entreprise norvégienne Northem Lights a opté pour un investissement de 2,6 milliards

¹² https://sgn.univ-lille.fr/fileadmin/user_upload/sgn/documents/Apres-Mine - Dossier_pedagogique_Hdef_compressed.pdf

d'euros en faveur d'un nouveau projet de capture-stockage du carbone. Alors même que le site a été inauguré le 26 septembre 2024, les industriels-clients censés bénéficier de ces capacités disponibles de stockage se font toujours attendre... Cette difficulté repose principalement sur une problématique de viabilité économique : selon TotalEnergies, le coût du captage-convoyage-stockage d'une tonne de CO₂ s'élèverait à près de 150 euros pour un industriel implanté à Dunkerque, soit environ le double du coût actuel d'une tonne de CO₂ sur le marché du carbone européen (les quotas permettant de revendre ou d'acheter des droits à polluer) [PEC, 2025]. L'échec du projet Pycasso (bassin de Lacq) illustre enfin une dernière composante du problème : la difficulté de faire « atterrir » certaines technologies de décarbonation dans les contextes territoriaux où elles sont censées se déployer. Ce projet de captage-stockage de carbone prévoyait de profiter du gisement de gaz déplété de Lacq pour y injecter du CO₂ d'industriels implantés à travers l'ensemble de la région. L'enquête conduite par Alix Duval [DUV, 2023] démontre les blocages auxquels il a, toutefois, dû faire face de la part de l'écosystème politico-économique en place, qui a vu d'un mauvais œil le déploiement de cet usage concurrent du bassin et a su déployer une campagne efficace de communication pour décrédibiliser le projet auprès de la population locale. Cette dernière a notamment insisté sur le risque qu'il ferait peser sur la viabilité des activités, et emplois, industriels d'ores et déjà implantées sur le territoire.

3.3. Des institutions internationales qui ne jouent pas leur rôle

Ainsi, au-delà de ses seules dimensions technique et industrielle, la question du changement climatique est à la fois une question systémique et holistique puisqu'elle implique une variété d'acteurs, d'intérêts et d'enjeux reliés par des relations d'interdépendance très étroites. Face à cela, les institutions internationales sont censées jouer un rôle d'arbitre, neutre et objectif, ce qu'elles ne font que très imparfaitement. Comme le souligne Fressoz [FRE, 2025], ces institutions jouent un rôle important, et pas toujours positif, dans cette situation. L'historien revient notamment sur les limites des travaux du 3^{ème} sous-groupe du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), qui a pour rôle de proposer des solutions techniques pour lutter contre le réchauffement climatique [GAR, 2025 ; LEM, 2025]. Contrairement aux deux premiers sous-groupes du GIEC (étude des principes physiques/écologiques, et de l'adaptation, au dérèglement climatique), le sous-groupe 3 occupe une position bien plus politique du fait de sa capacité à orienter les choix techniques des Etats et des industriels pour lutter contre le dérèglement climatique. Ses préconisations ont donc un impact immédiat sur les politiques de décarbonation déployées par les Etats et forcément sur les décisions des industriels qui ne vont pas forcément dans les meilleures options pour réduire le dérèglement climatique. Il est en effet assez étonnant de constater que ce sont les Etats pétroliers qui plébiscitent le stockage/valorisation du CO₂. Pourquoi dans ces conditions investir dans des équipements coûteux pour réduire les émissions de CO₂ puisqu'elles sont susceptibles d'être valoriser, en dépit des déboires techniques précédemment exposés ?

L'ensemble des articles contenus dans ce second numéro de « Technologie & innovation » sur la décarbonation reviennent sur les différentes questions abordées au cours de cette introduction, permettant ainsi de développer les différents points précédemment évoqués.

Dans son article, Smail Aït El Hadj dresse un panorama global et actuel des techniques de décarbonation. Il décrit trois grandes voies de la décarbonation qui correspondent selon ses dires à trois problématiques de la transition écologique : 1/ celle de la décarbonation corrective par captation et stockage du CO₂ émis, à système technico-économique inchangé ; 2/ une décarbonation fondée sur la problématique de la transition énergétique, centrée sur une mutation technologique, par la substitution de technologies décarbonées à des technologies carbonées, principalement des technologies de combustion ; 3/ mais face à la difficulté d'atteindre le niveau de décarbonation satisfaisant, une troisième problématique est posée, celle d'une transition écologique de recomposition des modes de production, de consommation et des transports actuels, soit essentiellement fondés sur des modes de décarbonation reposant sur la sobriété et la diminution des niveaux d'activité. Selon Smail Aït El Hadj, ces trois modes de décarbonation ne vont pas se substituer, mais fonctionner en synergie, en raison de la dépendance de sentier générée par les énergies fossiles.

L'entretien réalisé avec David Lolo et Pierre Gilbert se focalise sur des choix non conventionnels en matière de décarbonation. David Lolo met l'accent d'une part sur la sobriété énergétique et Pierre Gilbert sur les nouvelles technologies, biosourcées. Si l'accent est mis par ces spécialistes sur l'innovation technique, leur choix ne peuvent être qualifiés de technophiles. Ils expliquent tous deux que l'avenir réside dans un nouveau mode de production moins énergivore, et surtout sur des technologies plus respectueuses de l'environnement. Les technologies biosourcées sont en effet issues de la matière organique renouvelable (biomasse) d'origine végétale ou animale, pour rompre avec l'intensification de l'exploitation des énergies fossiles.

A l'opposé des techniques de décarbonation reposant sur la sobriété énergétique et une utilisation raisonnée des ressources naturelles, Marine de Guglielmo Weber présente ces technologies du futur qui consistent dans la transformation pure et simple du climat par des procédés chimiques : la géo-ingénierie. Ces techniques du futur bénéficient depuis quelques années de plus de crédibilité et commencent même à être envisagées dans les débats internationaux sur le climat. Marine de Guglielmo Weber centre son propos sur l'analyse du processus de normalisation de la géo-ingénierie dans les instances internationales. Ce processus part d'une logique de compensation : dans les accords sur le climat, on distingue à présent la réduction facultative des émissions de CO₂ qui peuvent être « atténuées », c'est-à-dire capturées par le recours de capture du carbone, de la réduction obligatoire des émissions qui ne peuvent pas l'être. Cette logique de compensation a à la fois pour effet de normaliser les techniques de captage et stockage du CO₂ et la géo-ingénierie du carbone et de rendre optionnelles une partie des mesures de décarbonation. Si les techniques s'avèrent au point, les mesures de décarbonation pourront-elles être reportées ? En d'autres termes, comment passer d'une économie de la promesse à une économie de la dette, sachant que l'on n'aura plus à s'interroger si la réalité de l'Anthropocène, compte tenu des la capacité des industriels et des Etats à devenir de véritables apprenti-sorciers, voire de véritables sorciers.

La position de Célia Sapart sur cette question est quelque peu différente. Face à l'augmentation des émissions de CO₂, elle affirme avec raison qu'il ne faut plus procéder à de nouveaux forages pétroliers, considérant que les transports et une grande partie des procédés industriels peuvent être facilement électrifiés ou doivent l'être dans un délai raisonnable. C'est en ce sens qu'au mot « décarbonation », elle oppose celui de « défossilisation ». L'idée est par conséquent de laisser les énergies fossiles là où elles sont (c'est-à-dire sous terre) et de récupérer les émissions de CO₂ pour les transformer, tout en reconnaissant qu'il n'existe pas à ce jour d'estimation mondiale précise du rôle potentiel des techniques de captage/recyclage du CO₂ permettant d'atténuer les émissions, en raison des incertitudes liées aux scénario de coûts de l'électricité produite à partir des énergies renouvelables. Célia Sapart s'appuie sur le dernier rapport du sous-groupe 3 du GIEC pour appuyer ses dires.

La sidérurgie fait partie des industries les plus fortement émettrices de CO₂. Pourtant comme le souligne Jean-Pierre Birat, les industriels de l'acier travaillent depuis une quarantaine d'années à la décarbonation de leur activité. Cet intérêt réside en grande part dans les crises et difficultés auxquelles cette industrie est confrontée. L'objectif des industriels de l'acier est avant tout de réduire leurs coûts pour renforcer leur compétitivité. Bien que l'acier « zéro net » ne sera pas atteint avant 2050, si la démarche en cours ne rencontre pas trop de difficultés, Jean-Pierre Birat s'interroge sur le rôle de toutes les parties prenantes : les industriels, les Etats et l'Agence Internationale de l'Energie. Mais, comme nous l'avons déjà souligné à maintes reprises, les questions techniques ne sont pas purement techniques. La question de la décarbonation en général, comme de la sidérurgie ne se réduit pas à une question technique, mais également économique, sociale et politique. Comme les migrations internationales et les inégalités sociales, les émissions de CO₂ n'ont pas de frontières.

Si les émissions de CO₂ n'ont pas de frontières, nombre de territoires qui se sont développés grâce aux énergies fossiles, notamment le charbon, ont été confrontés à des crises économiques et sociales majeures en raison de la fermeture des mines. Des territoires ont été ainsi dévastés tant sur le plan industriel et écologique (exploitation tous azimuts des mines), mais également social via la fermeture des entreprises minières et de leurs sous-traitants. Ces territoires ont pourtant été les principaux acteurs

de la reconstruction de l'après seconde guerre mondiale. Le mot d'ordre était de gagner la bataille du charbon ! Face à cette situation, les responsables politiques locaux réagissent en développant de nouvelles activités compatibles avec la transition énergétique. L'Etat investit des sommes considérables pour soutenir le développement de nouvelles activités en lien notamment avec le souci d'assurer le mix énergétique du pays, privilégiant notamment la production d'électricité à partir d'énergies non carbonées. Dorian Maillard et Michel Deshaies décrivent de façon très détaillée la stratégie de réindustrialisation décarbonée du site d'Emilie Huchet et plus globalement du bassin houiller lorrain, dans l'est de la France et les difficultés de sa mise en œuvre. Un autre exemple d'une forte dépendance de sentier, pour des territoires qui pendant plusieurs décennies ont fait reposer leur économie sur des investissements spécifiques.

Face aux difficultés maintes fois mises en évidence dans le cadre de ce chapitre introductif, Jean-Pierre Micaëlli propose d'analyser ce qu'il nomme le procédé industriel décarboné (PID). Il s'agit de développer un système artificiel interagissant avec le système naturel (ou géosphère), social (sociosphère) et technique (technosphère), conçu selon les règles de l'ingénierie système durable (ISD). Il s'agit ainsi de formuler les éco-exigences, d'en architecturer les fonctions de manière à les rendre éco-harmonieuses pour identifier des pistes d'invention. Pour expliquer sa méthodologie, Jean-Pierre Micaëlli donne l'exemple de la clinkérisation en d'autres termes de la cimenterie, qui est avec la sidérurgie l'une des principales sources d'émission de CO₂ au niveau mondial. L'auteur prévient cependant le lecteur sur le fait qu'il s'agit d'un exemple théorique, en raison de l'absence de retour sur expérience en la matière. Mais l'intérêt majeur des travaux de Jean-Pierre Micaëlli réside dans cette combinaison originale qu'il propose entre sciences de l'ingénieur, sciences de la nature et sciences humaines et sociales. Jean-Pierre Micaëlli démontre au centuple que la décarbonation ne peut être réduite à une simple question technique, mais également économique, sociale, politique, tout en réinterrogeant le rapport de la société industrielle avec la nature. Contrairement aux dires de Jean-Baptiste Say, la nature n'est pas un immense magasin dans lequel l'on peut puiser pour satisfaire les besoins humains [BOU, 2016].

4. Conclusion

L'ensemble des textes réunis dans ce numéro de *Technologie & Innovation* montrent manifestement que rien n'est vraiment écrit, hormis sans doute le poids toujours écrasant des énergies fossiles dont les conséquences en termes d'émissions de CO₂ vont encore se faire sentir sur l'ensemble du 21^e siècle, même l'on arrêtait par exemple aujourd'hui l'exploitation de ces énergies. La dépendance de sentier, la force d'inertie du système industriel, est telle, qu'il devient difficile d'imaginer un monde décarboné, sauf à laisser la parole aux romanciers [HEG, 2024]. Nous avons essayé de présenter assez sommairement face à la nécessaire réduction des émissions de CO₂ les deux grandes options possibles : soit l'orientation technophile qui considère que le progrès technique est forcément la solution, quitte à transformer radicalement le climat de la Terre en jouant les apprentis-sorciers, soit à mettre l'accent sur les « régrès » générés par le progrès technique, et à imaginer un autre mode de consommation et de production.

Références

- [ALL, 2020] Allegret J.-P., Le Merrer P., Unal D., 2020, Renouveler les analyses de la division internationale du travail, *Economie de la mondialisation : une configuration en marche*, De Boeck Supérieur, 83-146.
- [ART, 1989] Arthur W. B., 1989, Competing technologie, increasing returns, and « lock-in » by historical events, *Economic Journal*, 99, 116-131.
- [BAU, 1994] Baudelle G., 1994a, *Le système spatial de la mine : l'exemple du bassin houiller du Nord-Pas-de-Calais*, Thèse de lettres, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne.
- [BER, 2006] Berger S., 2006, *Made in Monde. Les nouvelles frontières de l'économie mondiale*, Seuil.
- [BON, 2025] Bonnefous B., 2025, En France, le trop lent démarrage de la décarbonation, *Le Monde*, 18 septembre.

- [BON, 2016] Bonneuil C., Fressoz J.-B., 2016, *L'évènement Anthropocène. La terre, l'histoire et nous*, Points.
- [BOU, 2024] Boutillier, S, 2024, Révolution industrielle, industrie 4.0 et idéologie, *Marché & Organisations*, N°51, p. 13-42.
- [BOU, 2016] Boutillier S. Matagne P., 2016, Une histoire asynchrone de l'économie et de l'écologie, et de leurs « passeurs », *Vertigo*, 16(1), <https://id.erudit.org/iderudit/1037575ar>
- [CHA, 2021] Chailleur S., de Sartre X. A., 2021, L'acceptabilité au prisme du stockage géologique de CO2 : retour sur un débat non émergé, *Natures Sciences Sociétés*, Supp5, 12-24.
- [DAV, 2006] Daviet S., 2006, L'évolution du concept de reconversion : de la substitution d'activité au redéveloppement des territoires, In. Daumalin X., Daviet S., Mioche P., *Territoires européens du charbon*, Presses universitaires de Provence, 243-255.
- [DAV, 2025] Daviet S., Perroux S., Velut S., 2025, Modernisation écologique, territorialisation et gouvernance de la transition, *Annales de Géographie*, 764, 51-75.
- [DEG, 2024] De Guglielmo Weber M., Noyon R. 2024, *Le grand retournement*, Les liens qui libèrent.
- [DUV, 2023] Duval A., 2023, *Transition énergétique et enjeux géographiques des projets de décarbonation. L'exemple de trois territoires du Sud-Ouest : Lacq, Pau, Pays-Basque*. Thèse de géographie, Université de Pau et des Pays de l'Adour, à soutenir.
- [EDG, 2013] Edgerton D., 2013, *Quoi de neuf Du rôle des techniques dans l'histoire globale*, Seuil.
- [FON, 2019] Fontaine M., Vigna X., 2019, La désindustrialisation, une histoire en cours, *20&21 Revue d'histoire*, 144, 2-17.
- [FRE, 2024] Fressoz J.-F., 2024, *Sans transition. Une nouvelle histoire de l'énergie*, Seuil.
- [FRE, 2022] Fressoz J.-B., 2022, « The age of » et ses problèmes. Du phrasme matériel dans la lecture de l'histoire, *Revue d'histoire du 19^e siècle*, 64, 173-188.
- [FRE, 2020] Fressoz J.-B., Lochet B., 2020, *Les révoltes du ciel. Une histoire du changement climatique XVe-XXe siècle*, Seuil.
- [FRE, 2025] Fressoz J.-B., 2025, “In tech we trust : A History of Technophilia in the Intergovernmental Panel of Climate Change's (IPCC) Climate mitigation expertise”, *Energy Research & Social Science*, 127, 104280.
- [FOS, 2011] Foster J. B., 2011, *Marx écologiste*, Amsterdam.
- [GAR, 2025] Garric A., (2025), Le GIEC accusé de trop miser sur la technologie, *Le Monde*, 1^{er} septembre
<https://nouveau-europresse-com.ezproxy.univ-littoral.fr/Search/ResultMobile/0>
- [GRO, 1995] Grossman G., Krueger A., (1995), Economic growth and the environment, *Quarterly Journal of Economics*, 110(2), 353-377.
- [HAR, 2003] Hartog F., 2003, *Régimes d'historicité*, Seuil.
- [HAU, 2022] Haug T., 2022, *La rupture écologique dans l'œuvre de Marx. Analyse d'une métamorphose inachevée du paradigme de la production*, Thèse de philosophie, Université de Strasbourg.
- [HEG, 2024] Hegland J., 2024, *Dans la forêt*, Babelio.
- [IZO, 2024] Izoard C., 2024, *La ruée minière au XXIe siècle. Enquête sur les métaux à l'ère de la transition*, Seuil.
- [JAR, 2025] Jarrige F., Martin B., Flipo F., 2025, Le progrès technique peut-il être conservateur ?, *Bifurcation/s*, 2, 15-28.
- [JAR, 2016] Jarrige F., 2016, Les imaginaires du progrès technique, *Technocritiques*, 121-145.
- [KUZ, 1955] Kuznets S., (1955), Economic Growth and Income Inequality, *American Economic Review*, 65, 1-28.
- [LAM, 2021] Lamblin V., 2021, Hydrogène : une route encore longue, *Futuribles*, 444, 58-63.
- [LEM, 2025] *Le Monde*, 2025, Le GIEC est-il technophile ?, site Web du *Monde*, 2 septembre
<https://nouveau-europresse-com.ezproxy.univ-littoral.fr/Search/ResultMobile/2>
- [LUP, 2011] Lupton S., 2011, *Economie des déchets. Une approche institutionnaliste*, De Boeck.
- [MAI, 2024a] Maillard D., 2024a, « La dimension spatiale du ressentiment : proxémie discordante et territorialité de la dissonance dans le Bassin minier du Nord-Pas-de-Calais », *GéoProximitéS*, 4.

- [MAI, 2024b] Maillard D., 2024b, La territorialisation des enjeux de décarbonation dans le Bassin minier du Nord-Pas-de-Calais : une nouvelle opportunité de sortie d'« une transition sans fin » ?, *ASRDLF 2024 : Territoires, Créativité & Innovation*.
- [MAR, 2013] Marty N., 2013, Une désindustrialisation perpétuelle ?, *Rives Méditerranéennes*, 46, 63-80.
- [MEA, 1972] Meadows D., Meadows D., Randers J., 1972, *The limits to Growth*, Chelsea Green Publishing.
- [MEI, 1998] Meilliez F., 1998, Un exemple fructueux de développement non durable : le bassin minier Nord-Pas-de-Calais, *Annales des Mines*, 53-60.
- [MIC, 1998] Michalet C.-A., 1998, *Le capitalisme mondial*, Presses Universitaires de France.
- [MIC, 2025] Michaud T., Adatto L., 2025, Science-fiction et management de l'innovation, *Marché & Organisations*, 52, 5-24.
- [MIC, 2024] Michaud V., 2024, Transition énergétique et compétition entre technologies vertes. Le cas de l'hydrogène décarboné dans la mobilité, *Revue française de gestion*, 319, 115-141.
- [MIN, 2019] Minovez J.-M., 2019, La désindustrialisation en longue durée, *20&21 Revue d'histoire*, 144, 18-33.
- [NOR, 1991] Nordhaus W. D., 1991, To slow or not to slow: The economics of the greenhouse effect, *The Economic Journal*, 101, 920-937.
- [NOU, 2007] Nourry M., 2007, La croissance économique est-elle un moyen de lutte contre la pollution ?, *Revue française d'économie*, 21(3), 137-176.
- [OCDE, 2010] OCDE, (2010, L'éco-innovation dans l'industrie. Favoriser la croissance verte, OCDE, https://www.oecd.org/content/dam/oecd/fr/publications/reports/2010/01/eco-innovation-in-industry_g1ghbd93/9789264079557-fr.pdf
- [PEC, 2025] Pécout A., 2025, En Norvège, un site de stockage attend encore son carbone, *Le Monde*, 8 janvier.
- [PEL, 2019] Pelletier P., 2019, Révolution, évolution, progrès et régrès chez Elisée Reclus, *Arts et savoirs*, 12, <https://doi.org/10.4000/aes.2362>
- [TER, 2010] Terray E., 2010, La vision du monde de Claude Lévi-Strauss, *L'Homme*, 193, 23-44.
- [TOR, 2021] Tordjman H., 2021, *La croissance verte contre la nature*, La découverte.
- [TOU, 2025] Toulgoat M., 2025, La décarbonation trop lente de l'industrie, *L'Humanité*, 18 septembre.