

Modes de décarbonation et problématiques de transition écologique

Decarbonation modes and ecological transition

Smaïl AÏT EL HADJ¹

¹ Réseau de Recherche sur l'Innovation, Paris, France, smail.aitelhadj@orange.fr

RÉSUMÉ. Cet article reprend, sous l'angle de la décarbonation, la recherche que nous avons menée dans l'ouvrage : Transition écologique et mutation technologique, ISTE Volume 42, London 2024. L'article met en évidence et décrit les trois grandes voies de la décarbonation qui correspondent à trois problématiques de la transition écologique : celle de la décarbonation corrective par captation et stockage du CO₂ émis, à système technico-économique inchangé, une décarbonation fondée sur une problématique de transition écologique, centrée sur une mutation technologique, substitution de technologies décarbonées à des technologies carbonées, principalement technologies de combustion. Enfin, devant la difficulté d'atteindre un niveau de décarbonation satisfaisant c'est une troisième problématique de transition écologique de recomposition de nos modes de production, de consommation et de transports essentiellement fondés sur des modes de décarbonation, fondés sur la sobriété et la diminution du niveau d'activité qui se met en place. L'importance de l'enjeu de la décarbonation feront que ces trois systèmes de décarbonation continueront à fonctionner en synergie.

ABSTRACT. This article presents, with an explicit angle on decarbonisation, the research that we carried out in the book: Ecological Transition and Technological Change, ISTE Volume 42, London 2024. The article highlights and describes three main decarbonisation paths, corresponding to three ecological transition issues: decarbonization as mitigation through capture and storage of emitted CO₂ with an unchanged technical and economic system; decarbonization as a solution to the ecological transition matter, centred on technological mutation, introducing decarbonised technologies as a replacement of fossil-fuel-based technologies, mainly combustion technologies. Finally, in view of the difficulty of achieving a satisfactory level of decarbonization, a third ecological transition issue is taking shape, namely the reorganization of our production, consumption and transport patterns, based essentially on sobriety and a reduction in the level of activity. The importance of the challenge means that these three decarbonization systems will continue to work in synergy.

MOTS-CLÉS. Réchauffement climatique, décarbonation corrective, décarbonation technologique, substitution technologique, diversification, affinement de la fonction, sobriété.

KEYWORDS. Global warming, climate chance, corrective decarbonisation, technology decarbonisation, technology substitution, diversification, solution enhancement, sobriety.

1- Introduction

L'analyse de l'ensemble des processus de décarbonation montre un approfondissement progressif de ceux-ci en termes de transformation de l'activité humaine constituant la transition écologique. La décarbonation s'est amplifiée et approfondie selon trois grandes problématiques qui correspondent à l'ampleur de transition écologique mise en œuvre pour l'obtenir.

La première forme de réponses à l'excès de carbone a été corrective, fondée sur la récupération des gaz carbonés, sur des techniques de captage et de stockage confiné, sans aucune modification des activités à l'origine de cette production excessive de gaz à effets de serre (GES). Il s'agit en fait d'une politique prothétique de *décarbonation corrective*. La nécessité d'une décarbonation à la fois plus efficiente et plus générale a conduit à la remise en cause des technologies les plus émettrices de gaz carbonés et à leur remplacement par des technologies non carbonées. C'est le premier processus de transition écologique qui fonde la décarbonation sur une remise en cause et la transformation d'une part croissante du système technologique, phase que l'on pourrait appeler la *décarbonation technologique*. L'insuffisance des effets de ce type de décarbonation et la prise de conscience que l'émission de GES se trouve dans pratiquement toutes les dimensions de l'activité humaine amène à une troisième problématique de la transition écologique celle centrée sur l'organisation de la sobriété de l'ensemble des activités humaines, modes de production, de consommation, de circulation voire de loisirs. C'est l'intégration des processus de décarbonation dans la *problématique de transition écologique globale*, ceci d'autant que la décarbonation n'est qu'une des formes de dégradation écologique de l'Anthropocène et se trouve combinée avec les nécessités d'économie des matières premières et d'énergie, de suppression des pollutions de tous ordres, de la préservation des espaces et de la biodiversité.

L'expérience du processus de décarbonation entamé à début de la décennie 1990 montre que cette succession des modes de décarbonation correspond à ces trois problématiques de transition écologique, introduisant des transformations de plus en plus profondes des formes de l'activité humaine vers des modes de production, de consommation et de transport radicalement nouveaux. Nous allons montrer comment ces problématiques de transformation successifs se déploient dans l'ensemble de la société et finalement coexistent et se combinent, avant que la troisième réorganise les deux premières.

2-La problématique corrective, de l'excès de CO₂ première phase de la décarbonation

La première réponse de décarbonation a consisté dans le développement de modes de décarbonation correctifs consistant à capturer et stocker le carbone déjà émis par l'activité humaine ; ceci sans aucune problématique de transformation technologique, économique ou sociétale. Deux modes principaux ont été développés : le stockage mécanique et la séquestration biologique du CO₂.

2.1. Le stockage du CO₂

Le captage, première phase de ce process, consiste à récupérer le CO₂ émis en particulier lors de processus industriels tels que la production d'électricité, d'acier ou de ciment, pour le stocker dans le sous-sol afin de l'isoler de l'atmosphère. Le CO₂ ainsi capté ne vient donc plus s'accumuler dans l'atmosphère et ne contribue plus au réchauffement climatique¹.

Le CCS (Carbon Capture and Storage) n'est pas une technologie nouvelle : le captage et la séparation du CO₂ ont été mis en œuvre dans l'industrie depuis des décennies ; l'injection de CO₂ dans le sous-sol a été pratiquée depuis les années 1970 pour la récupération assistée du pétrole. Le captage du CO₂ se concentre sur les activités industrielles à forte concentration d'émissions de ce gaz : les industries lourdes, à forte intensité thermique telles que la sidérurgie, la cimenterie, le raffinage, la chimie et la pétrochimie, qui de plus, **ne disposent pas à ce jour de technologies de substitution qui leur permettraient de réduire massivement leurs émissions de CO₂.**

Le CCS comprend trois phases :

Le captage : Le CO₂ est séparé des autres gaz produits lors de l'utilisation des combustibles fossiles dans ces industries. La finalité du procédé est de capturer le carbone avant que celui-ci ne soit émis dans l'atmosphère. Il existe trois grandes approches pour réaliser cette capture : la postcombustion, la précombustion,² et l'oxycombustion³.

Le transport : une fois capté, le CO₂ est compressé et déshydraté pour être transporté jusqu'au site de stockage géologique, soit via des gazoducs, soit dans des citernes jusqu'à une zone de stockage.

Le stockage : il consiste en l'injection du CO₂ récupéré dans les sites d'anciens gisements de pétrole et de gaz, d'anciennes veines de charbon ou de formations salines ou dans des formations rocheuses souterraines très profondes (- 800 mètres ou plus de la surface terrestre). Ce type de formations géologiques profondes est considéré par les scientifiques comme assez solide pour contenir le gaz, pendant des centaines voire des milliers d'années.

Le procédé du stockage offre l'avantage d'une possibilité de réponse rapide et massive à l'accumulation du CO₂ atmosphérique : « Il est estimé que la technologie de captage, stockage géologique pourrait, d'ici 2050, contribuer à hauteur de 19% à la réduction globale des émissions de GES »⁴. Mais ce dispositif présente deux inconvénients majeurs. Le premier est le caractère gigantesque de l'investissement à mettre en œuvre pour pratiquer cette solution (que des experts évaluent à l'équivalent de l'ensemble du parc technique de la pétrochimie mondiale). Le second est son effet négatif sur l'orientation de la lutte contre la carbonation mondiale qui amène à concentrer l'action sur la neutralisation d'une masse de gaz carbonique produite et potentiellement en croissance, plutôt que de mener une action massive pour la réduction de la production de CO₂ et pour la recherche de la neutralité carbone.

2.2-La Séquestration-transformation biologique du CO₂

¹ <https://www.club-co2.fr/fr/content/le-cscv-en-deux-mots> consulté le 23/04/2022

² Les techniques de captage et stockage du CO₂, *Industrie et technologies*, n° 993-994, Décembre 2016, pp. 49-55

³ <https://www.hellocarbo.com/blog/compenser/stockage-co2/> consulté le 23/04/2022

⁴ <https://www.club-co2.fr/fr/content/le-cscv-en-deux-mots>, consulté le 23/04/2022.

Cette séquestration biologique prend deux formes : le renforcement et la réactivation de la capture du CO₂, par la préservation des espaces verts et plantations de haies et de forêts. La séquestration du CO₂ se pratique ainsi à grande échelle dans les espaces végétalisés notamment forestiers.

Une deuxième forme de **séquestration naturelle par des micro-organismes est aussi développée**. Des « puits de carbone » ont été imaginés **via le processus de photosynthèse des microalgues**. Les microparticules produites pourraient être ensuite récupérées pour être ré-utilisées comme engrais. L'utilisation du CO₂ pour nourrir des cultures de microalgues permettrait de produire, par photosynthèse, des molécules à haute valeur telles que des biocarburants, des antioxydants, des colorants. Nous identifions là une première forme de décarbonation purement corrective, qui n'implique aucun changement, aucun processus de transition écologique, sauf la création d'activités nouvelles prothétiques de capture et de stockage du CO₂.

3-La décarbonation par changement technologique

La *décarbonation technologique* consiste dans le remplacement de processus de production et de transport, ou de technologies carbonées par des technologie décarbonées, dans pratiquement tous les domaines de l'activité humaine [PAP, 2020]. Ces modes de décarbonation s'insèrent dans la problématique de transition écologique par recomposition du système technologique [AIT, 2024, 2020].

3.1-La valorisation du CO₂

La valorisation du CO₂ consiste en la génération de nouveaux procédés technologiques permettant de transformer le CO₂ en matières premières industrielles. Cette valorisation sans transformation du CO₂, comprend trois applications principales :

- L'utilisation traditionnelle du gaz carbonique pour la récupération assistée des hydrocarbures.
- Le CO₂ est valorisé dans la carbonation des eaux et boissons gazeuses.
- Le dioxyde de carbone est utilisé aussi pour la surgélation des produits alimentaires.

Un second niveau de valorisation est de transformer le CO₂ en des matières premières utilisables dans des applications industrielles, chimiques ou biologiques⁵. Plusieurs voies chimiques récentes apparaissent, très prometteuses d'une valorisation massive du CO₂ :

- Le CO₂ peut être méthanisé pour utilisation en combustion (déjà pratiquée dans l'automobile) et produisant conjointement de l'hydrogène.
- Le CO₂ peut être valorisé sous forme d'alcool (méthanol, éthanol). De nombreux acteurs industriels s'intéressent à la valorisation du CO₂ en méthanol via l'hydrogénération directe⁶. L'entreprise islandaise, **Carbon Recycling International (CRI)**, travaille au **recyclage du carbone pour produire du méthanol renouvelable**, à partir de CO₂ et de l'hydrogène).
- Le CO₂ est valorisé dans la production, par synthèse organique, d'urée et d'acides carboxyliques, notamment l'acide salicylique,
- La minéralisation/carbonatation émerge comme nouveau procédé de fabrication du béton. Ces grands utilisateurs d'énergie et forts émetteurs de CO₂ étudient différentes filières : la minéralisation du CO₂ sous forme de carbonates (Skyonic, Calera, etc.), la production de polycarbonates (Bayer, Novomer, etc.), etc. La valorisation industrielle du CO₂ ouvre, à la différence des méthodes de captage-stockage naturelles, une génération de technologies nouvelles dédiées à ce domaine.

3.2-La décarbonation technologique dans le domaine de l'énergie

Un lieu privilégié de la décarbonation technologique est le secteur énergétique avec la substitution de nouvelles formes de production d'énergie en remplacement de la production énergétique à base de combustion.

- La disparition de la production d'électricité par combustion d'énergie fossile

La transition écologique visant à atteindre la neutralité carbone dans le domaine énergétique, implique de réduire, voire d'éliminer, toutes les formes de production d'énergie fondées sur la combustion des énergies primaires fossiles [VEL, 2021]. La structure de production énergétique par source d'énergie primaire en 2040 projetée par l'Agence Internationale de l'Energie (AIE), prévoit que la part des sources fossiles passerait de 60 % à 16,4% selon le scénario volontariste.

⁵ *Les filières de valorisation du CO₂*, Record, PDF, Septembre 2014.

⁶ <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/climat-environnement-et-economie-circulaire/reduire-les-emissions-industrielles-co2-captage-et-stockage-du-co2>, consulté le 23/04/2022

- Le recours aux énergies renouvelables

Dans une trajectoire conforme à l'Accord de Paris, les énergies renouvelables formées par l'énergie solaire, éolienne, et hydraulique devraient représenter en 2040 entre 44% et 67% de la production d'énergie électrique mondiale contre 26% en 2019⁷.

Les trois technologies énergétiques alternatives susceptibles d'assurer dans l'avenir la plus grande partie de la demande énergétique sont les énergies dites renouvelables fondées sur la captation des énergies naturelles : l'énergie hydraulique, déjà importante dans la récente période industrielle avec le grand hydraulique de barrage, les énergies solaire et éolienne. Mais d'autres formes d'énergies alternatives sont explorées telles que la récupération de chaleur, l'énergie géothermique, l'énergie biologique à partir de la production de biogaz, et enfin la récupération d'énergie : aussi bien sur les installations industrielles que numériques.

L'énergie solaire

L'énergie solaire comprend deux filières de production : la plus importante, la filière photovoltaïque et la filière à concentration.

L'énergie solaire photovoltaïque a progressivement été développée dans la plupart des domaines d'activité et d'utilisation privée, elle est présentée comme pouvant couvrir l'ensemble de la production d'énergie [UN, 2017].

La puissance installée mondiale en matière de solaire photovoltaïque s'élevait en 2019 à 627GW.

L'énergie solaire thermique à concentration est d'apparition relativement récente, elle remonte à la fin des années 1970. Le principe est d'obtenir de très hautes températures par la concentration des rayons solaires à partir de miroirs. Cette très haute température réchauffe un liquide caloporteur, qui par un échangeur, génère de la vapeur d'eau, alimentant une centrale électrique.

L'énergie solaire de concentration n'est pas d'usage universel, car elle nécessite de fort niveau d'ensoleillement de plus de **2000 kWh/m²/an**. Ce qui limite l'implantation possible de ce type de production d'énergie aux zones chaudes, méditerranéennes ou semi-désertiques, avec la contradiction que la mise en œuvre de cette production d'énergie nécessite une forte consommation d'eau pour le nettoyage de miroirs et lentilles. Des pays comme le Maroc, l'Espagne ou les États-Unis par exemple, voient des projets de centrales se multiplier sur leurs sols, comme le projet DESERTEC : projet de 20 centrales solaires à concentration au Sahara, représentant une capacité de production de 700 TW/h. L'AIE estime que l'électricité produite par ce type de centrales pourraient représenter 11% de l'électricité mondiale en 2050.

L'énergie éolienne

L'énergie électrique éolienne terrestre atteint aujourd'hui sa maturité : en 2023, les installations éoliennes dans le monde ont augmenté de moitié en puissance par rapport à 2022. Elles ont eu lieu dans 54 pays. En puissance installée cumulée, le parc éolien mondial a ainsi passé la barre du térawatt, en atteignant 1 021 GW à fin 2023 (soit 13% de plus qu'à fin 2022)⁸.

Le développement de l'éolien terrestre commence à rencontrer une limite de densité qui favorise le développement de l'éolien en mer, dit éolien *off-shore*. L'implantation maritime au large permet d'éviter la plupart des inconvénients (intermittence, bruits) de l'éolien terrestre, il génère une stabilité de fonctionnement due à la puissance quasi-constante des vents en mer, particulièrement en zone océanique de l'hémisphère nord. L'éolien offshore favorise ainsi une montée en puissance tendant au gigantisme des turbines, passant d'une puissance de 6 mégawatts de puissance unitaire et d'un diamètre de pales et de 150 mètres, en 2018, à des turbines, projetées d'ici 2030, de 20 mégawatts et d'un diamètre de pales jusqu'à 250 mètres [PAP, 2020, 2017]. A l'opposé, est développé de l'éolien de petite dimension, en turbines carénées (pour réduction de bruit), pour implantations urbaines. L'éolien apparaît ainsi comme la forme la plus prometteuse, avec le photovoltaïque, de production des énergies renouvelables.

Le retour de l'hydraulique.

Le grand hydraulique de barrage étant aujourd'hui saturé dans ses capacités, on voit apparaître d'autres formes d'utilisation moins intensives de la puissance hydraulique, par les solutions de microcentrales, qui possèdent l'avantage d'éviter les grands bouleversements telluriques.

⁷ Scénarios de l'agence internationale de l'énergie 2019,

<https://www.citepa.org/perspectives-energetiques-mondiales-2019-weo-laie-publie-son-rapport-de-reference/>

⁸ [https://www.connaissancedesenergies.org/en-2023-leolien-mondial-franchi-une-barre-symbolique-240426#:~:text=dans%20la%20production-,Monde,nucl%C3%A9aire%20\(9%2C6%25\)](https://www.connaissancedesenergies.org/en-2023-leolien-mondial-franchi-une-barre-symbolique-240426#:~:text=dans%20la%20production-,Monde,nucl%C3%A9aire%20(9%2C6%25)) consulté le 25 février 2024.

On estime que la capacité installée mondiale de la petite hydroélectricité est de 75 GW, avec 173 GW de potentiel inexploité. La petite hydroélectricité au fil de l'eau représente plus de 75% des 3700 centrales hydroélectriques prévues ou en construction dans le monde. La production de centrales hydro-électriques de petite hydraulique (< 100Mw) est évaluée à 79 TWh/an sous les contraintes écologiques les plus strictes, et à 1 710 TWh/an dans les meilleures conditions⁹.

La micro-hydraulique tend nettement à se focaliser sur les hydroliennes fluviales disposées en surface dans une barge ancrée dans le fleuve, ce qui permet de constituer des « fermes d'hydroliennes ». Ces installations, d'une capacité d'environ 100 KW, d'un fonctionnement permanent, ne nécessitent qu'un dispositif et une infrastructure légères et peu invasives, échappant ainsi aux contraintes écologiques qui entravent le développement de la micro-hydraulique sur site fixe. Elle est donc appelée à un important développement¹⁰.

Cette micro hydraulique se développe aussi sur l'énergie hydraulique des mers principalement fondée sur l'énergie des mouvements et courants des marées. L'exploitation de l'énergie marémotrice est aujourd'hui plus portée par des formes décentralisées d'exploitation : mini-turbines immergées, appelées « hydroliennes ». Les hydroliennes marines sont la forme maritime des hydroliennes fluviales traitées ci-dessus. Les hydroliennes, du fait de la densité de l'eau, sont plus puissantes que les éoliennes, et sont, de plus, peu exigeantes en termes d'infrastructure, étant posées sur le fond des mers et des océans.

L'énergie géothermique

Dans ses deux applications majeures, la production d'électricité et de chaleur, la géothermie est donc encore aujourd'hui marginale, loin derrière les énergies fossiles et d'autres énergies renouvelables telles que l'hydroélectricité, le solaire photovoltaïque ou encore l'éolien. En production électrique d'origine géothermique, la puissance totale installée est avec une production de près de 72 TWh, de 0,3% de la production électrique mondiale.

3.3-La décarbonation des transports par changement technologique

Les transports sont responsables de plus d'un cinquième des émissions de CO₂, à l'échelle mondiale. Le transport routier représente 94% du total des modes de transport. Les autres formes de transport émettent pour l'aérien 2,9% du total des transports, pour le transport maritime 2,42 % et seulement pour le ferroviaire soit 0,37 % du total des transports. Ce poids très important du transport, dans la crise écologique, va entraîner très rapidement la génération de réponses technologiques innovantes pour le décarboner.

- Le transport routier

Le système automobile atteint une limite critique d'effets sur l'environnement dus principalement aux rejets massifs de CO₂ de sa motorisation mécano-thermique. C'est dire l'intensité de la pression au changement que produit cette situation critique. Elle entraîne, dans un premier temps, une forme de réponse purement technologique centrée sur la motorisation : la suppression des motorisations thermiques et leur remplacement général par des technologies de propulsion généralement à base électrique.

La réponse initiale : la mutation de la technologie de motorisation des transports routiers.

Les opérateurs de l'automobile, les constructeurs et leurs concepteurs, qui sont ainsi menacés, à court terme, de disparition de leur technologie centrale (la motorisation thermique), ont entamé très rapidement une réponse alternative, en s'appuyant sur la seule technologie disponible à court terme : la technologie du moteur électrique. Il reste que l'effet de décarbonation de cette transition électrique n'est pas parfait du fait du système d'alimentation par batteries qui a une très forte empreinte écologique [SCH, 2018].

Pour dépasser les limites encore fortes de la motorisation intégralement électrique il a été développé parallèlement une combinaison entre la motorisation électrique et le dispositif thermique antérieur : la motorisation hybride. Les moteurs hybrides, sous diverses configurations, semblent apporter un compromis acceptable entre le niveau de rejets et le niveau d'autonomie du véhicule, pour un surcoût aussi acceptable de complexité de la solution. Le courant de création de ces véhicules « hybrides » a vite été considérable et rapide. La propulsion électrique connaît un développement parallèle dans sa solution la technologie de la pile à combustible alimentée à l'hydrogène. La propulsion électrique/hydrogène est un dispositif de moteur électrique alimenté par une pile à combustible transformant le carburant hydrogène en électricité à partir de la fusion de

⁹ <http://www.hydrauxois.org/2022/07/> Le potentiel effectif de valorisation des sites de micro-hydraulique dépend du niveau de contraintes environnementales prises en compte pour permettre leur exploitation.

¹⁰ https://www.sciencesetavenir.fr/nature-environnement/developpement-durable/l-hydrolienne-fluviale-le-graal-energetique_18650 Consulté le 5 mars 2023.

l'hydrogène et de l'oxygène, activée par un catalyseur, ce fonctionnement ne rejetant que de l'eau. Il reste que ce mode de propulsion connaît des obstacles majeurs, tenant à ses conditions de production et de transport.

Un second niveau de réponse technologique, la reconfiguration du système technique automobile

Le changement radical de la motorisation automobile, ainsi que la digitalisation du véhicule à travers le système de voiture autonome, vont entraîner une recomposition profonde de l'architecture automobile, il s'agit de ce que l'on nomme couramment le *véhicule autonome*, qui, avec la constitution d'un circuit routier automatisé va permettre la décarbonation par fluidification de la circulation routière.

- Le transport aérien

Les nuisances environnementales du transport aérien

Les émissions de GES du transport aérien sont évaluées à 1,5 % des émissions mondiales, mais ce chiffre sous-estime l'impact réel de l'avion sur le réchauffement climatique¹¹. Au niveau des émissions de CO₂ par voyageur et par kilomètre, l'avion vient en tête du classement des plus polluants, dans des proportions similaires à la voiture individuelle.

Les réponses technologiques pour réduire les émissions

La première est de poursuivre les progrès de rendement général du véhicule avion comme de son environnement opérationnel. Dans ce domaine, vient en premier l'amélioration structurale du véhicule aérien par les réductions de poids et les modifications de géométrie permettant une réduction de trainée. Est en cours aussi la réduction des rejets par l'électrification de l'ensemble de l'activité au sol des aéronefs : roulage au sol par moteurs électriques, et alimentation électrique externe pour l'ensemble des activités de mise en condition au sol.

Mais les principales pistes de transformation touchent la propulsion avec l'amélioration des rendements et le recours aux carburants non conventionnels, vers des carburants minimisant les rejets de GES tels que les carburants alternatifs SAF (Sustainable Aviation Fuels) : carburants non fossiles, biosourcés, souvent issus de déchets organiques (résidus de graisses et d'huiles, résidus organiques agricoles, forestiers, industriels et urbains). Ceux-ci, fonctionnant en mélange, jusqu'à 50%, avec le kérozène peuvent réduire les émissions de CO₂ jusqu'à 85%. Cette possibilité de décarbonation rencontre une limite quantitative de disponibilité.

La décarbonation du transport aérien s'appuie aussi sur la génération de nouveaux types de propulsions comparables à ceux des autres modes de transport, sur trois pistes de motorisation : l'hydrogène, l'hybride, et l'électrique à batterie. Ces différentes technologies étant chacune dédiée à un segment du transport aérien : l'hydrogène pour les moyens et long-courriers, l'hybride pour l'aviation régionale et le tout-électrique pour les court-courrier et l'aviation légère.

Le recours à l'hydrogène est conçu, dans un premier temps, en utilisation comme combustible en substitut au kérozène. La solution de turbine à gaz à l'hydrogène, limitée au domaine des avions moyen-courrier et long-courrier, seule solution apportant une autonomie comparable à celle de la motorisation fonctionnant au kérozène, est encore à l'horizon lointain de 2035.

Les technologies de décarbonation de l'activité aérienne sont en émergence, particulièrement face aux contraintes particulières de cette activité. Mais selon les prévisions de l'Association du transport aérien international (IATA), le gain de décarbonation apporté par les solutions technologiques, notamment de remotorisation, ne compensera pas la continuation de croissance attendue du trafic aérien.

- Le transport maritime

L'impact environnemental du transport maritime

L'impact environnemental du transport maritime est multiple. Il s'agit d'abord des pollutions atmosphériques car le transport maritime¹² est d'abord un gros émetteur de GES. Les émissions de CO₂ de la flotte mondiale représentent 849 millions de tonnes en 2021, elles ont augmenté de 4,7 % entre 2020 et 2021. La pollution du

¹¹ <https://www.ecoco2.com/blog/limpact-reel-du-transport-aerien-sur-le-climat/>, consulté le 20 avril 2022.

¹² L'impact écologique du transport maritime :

https://fr.wikipedia.org/wiki/Impact_%C3%A9cologique_du_transport_maritime#:~:text=Elle%20a%20%C3%A9t%C3%A9%20abaiss%C3%A9e%20mer%20du%20Nord%20F%20Manche. Consulté le 20 avril 2021

transport maritime représente actuellement 3 % des émissions de GES dans le monde ; si le secteur n'entame pas de changements, les émissions s'élèveraient à 17 % d'ici à 2050¹³.

Les réponses technologiques

Opter pour d'autres énergies telles que le gaz naturel liquéfié et l'hydrogène est prometteur, comme pour les autres applications de transport mais peu opérationnel, la propulsion électrique à l'hydrogène est praticable seulement sur de petites unités, mais pour des trajets très limités comme les navettes portuaires ou les bacs. Généraliser dans les ports des systèmes d'alimentation électrique pour les navires à quai, qui permettent ainsi aux navires de couper leurs moteurs, et éviter de brûler du carburant pour produire leur propre alimentation électrique.

C'est aussi un développement important et rapide de la propulsion à voile¹⁴ qui est en cours appuyé sur cinq grands types de procédés innovants de la propulsion vélique des navires : les voiles souples, les voiles rigides, les cerfs-volants de traction ou aile de kite, les rotors et turbines éoliennes, tous systèmes de propulsion à haut rendement car optimisés structurellement, pilotés et réglés numériquement.

Ceci montre la multiplication possible d'innovations, pouvant naître d'une réflexion sur l'amélioration de l'insertion du navire dans son milieu et sur de nouvelles conceptions de l'architecture nautique pour la décarbonation.

- Le transport ferroviaire

Le transport ferroviaire est le moins polluant des modes de transport, cela est dû, principalement en Europe, à la large électrification des lignes intervenue dès les années 1920 et largement achevée dès les années 1960. Le transport ferroviaire, qui représente 6,7% des passagers kilomètres et 6,9 % du fret mondial (tonnes kilomètres) est responsable de 4,2 % des émissions mondiales de CO₂¹⁵.

C'est la motorisation thermique, aujourd'hui exclusivement diesel, qui est à l'origine de l'émission de CO₂ du transport ferroviaire. La transition écologique pour ce mode de transport va consister à éliminer cette motorisation pour la remplacer par une motorisation électrique à alimentation autonome qui semble, se concentrer dans ce secteur, sur la pile à hydrogène.

L'autre composante technique de l'amélioration du comportement écologique du transport ferroviaire est, comme dans le domaine automobile, la numérisation des réseaux et le développement du train autonome qui a pour fonction d'accroître le rendement des trains, d'en augmenter la capacité et ainsi de réduire le trafic tout en augmentant la capacité de transport et l'efficacité de circulation.

3.3-Mutation technologique pour la décarbonation des industries des matériaux et de la première transformation

Les activités de première transformation ont un impact environnemental élevé, principalement par le fait que cette étape est essentiellement fondée sur des process à très haute énergie thermique produite par la combustion d'énergies fossiles.

La sidérurgie

La production d'acier est responsable de 5 à 7 % des émissions mondiales de CO₂ dues à la réduction du minerai de fer et à une fusion, utilisant des sources d'énergie thermique d'origine fossile en général, principalement le charbon. Encore aujourd'hui plus de 70 % de l'acier est produit dans des haut-fourneaux au charbon.

La nouvelle piste pour décarboner la production d'acier est l'utilisation de deux supports nouveaux l'électricité et l'hydrogène. La mutation est celle de la réduction à l'hydrogène et de la réduction par électrolyse à anode inerte¹⁶. L'introduction de ces procédés va entraîner le renouvellement total de l'appareil de production sur ces nouvelles bases technologiques, mais appeler un accroissement considérable de la consommation d'électricité, potentiellement verte, dont les nouveaux procédés sont très consommateurs.

¹³ <https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2022/11/11/cop27-le-transport-maritime-un-secteur-polluant-qui-tarde-a-changer-de-cap>

¹⁴ <https://leshorizons.net/propulsion-velique-avenir-commerce-maritime/>

¹⁵ <https://www.climate-chance.org/wp-content/uploads/2019/03/new-les-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-un-atout-decisif-pour-le-rail.pdf> consulté le 01/05/2023

¹⁶ «Acier vert» : le défi du siècle », *Les Echos*, 11 octobre 2021.

Le ciment et les matériaux de construction

L'industrie du ciment est à l'origine de 6% des émissions de CO₂ mondial¹⁷. La production de ciment, principalement sous le procédé du ciment Portland, est un des dispositifs industriels le plus énergétivore et partant le plus carboné. Le nœud de ce problème se trouve dans la production du *clinker*, matériau de base du ciment, obtenu par chauffe d'un mélange de calcaire et d'aluminosilicates à haute température dans des fours à chauffe thermique à combustibles fossiles.

L'innovation radicale pour produire du « béton vert » est de supprimer cette phase initiale de transformation, de confection du clinker, comme l'a réussi, par exemple, la société française Hoffmann Green Cement Technologies¹⁸, qui a mis au point et breveté les ciments H-UKR, H-EVA et H-P2A, fabriqués à partir de coproduits industriels (laitiers de haut-fourneau, boues d'argile, gypses) qui forment à froid le ciment par une réaction moléculaire déclenchée par des activateurs et sur-activateurs. Ces procédés affichent un bilan carbone divisé par cinq par rapport à celui du ciment traditionnel¹⁹. Ainsi la tendance de transformation de l'industrie du ciment vers la neutralité carbone consiste principalement dans la substitution à la phase hautement thermique, principalement à l'origine des émissions massives de CO₂, d'une phase de production de produits équivalents, à partir d'une transformation chimique à froid.

L'industrie chimique

L'industrie chimique représente 25% des émissions de GES de la production manufacturière, en France. Ce qui va entraîner un renouvellement des processus chimiques au profit des processus fonctionnant à basse énergie (Sarrade, 2011). Les processus à basse énergie sont des procédés catalytiques générant des réactions chimiques plus rapides et à basse énergie. La chimie catalytique peut être étendue à la biochimie, avec l'utilisation de catalyseurs biochimiques que sont les enzymes.

L'industrie agro-alimentaire, qui représente le quatrième secteur de l'industrie manufacturière du point de vue des émissions de GES, est à l'origine du quart du bilan carbone mondial et donc devra connaître des innovations technologiques permettant de « décarboner » cette industrie, mais avec des innovations modifiant les processus carbonés communs à plusieurs industries, comme par exemple le remplacement des processus mécano-thermiques par des processus de technologies chimiques et biologiques.

3.4-Les réponses éco-technologiques dans l'agriculture

Le Haut Conseil pour le Climat précise que le secteur de l'agriculture compte en 2022 pour 19% des émissions de GES à l'échelle mondiale²⁰. Les stades amont des filières de production agricoles, notamment l'application des intrants, que sont les engrains, sont désormais les premiers postes d'émission, représentant 39% de leur total. L'utilisation des terres et les facteurs d'émission connexes représentent 38 % des émissions, tandis que 29% sont imputables à la distribution des produits agricoles, une part qui augmente et qui devrait continuer de croître.

La réponse technologique la plus radicale est d'envisager la disparition pure et simple de l'agriculture traditionnelle remplacée par des méthodes culturales artificielles comme les « fermes urbaines », soit même de décorrérer la production alimentaire de la production agricole au profit de moyens de culture cellulaire de production des produits alimentaires animaux et végétaux.

Les fermes verticales

Une des tendances technologiques de réponse à la crise de l'agriculture, en rupture déjà radicale avec l'agriculture traditionnelle est le développement de la culture « hors sol », le principe en étant « l'hydroponie »²¹, l'alimentation des végétaux par une solution liquide nutritive, sur un substrat neutre, ceci sur des structures multiniveaux, éclairées à la lumière artificielle, par des leds, dans des immeubles en hauteur, ce qui l'a fait qualifier d'« agriculture verticale » ou de « fermes urbaines ». Les avantages de cette formule sont multiples : l'économie d'intrants, les apports étant dosés avec précision ; sans engrains, les apports en nutriments étant directs et permanents ; et sans pesticide, vue la stérilité biologique de l'environnement de la plante. Ce dispositif permet la culture d'une densité de plantes au mètre carré beaucoup plus élevé que dans

¹⁷ Newsletter Actu environnement .com, 15 avril 2019, Rémi PIN « *Bilan carbone du ciment : comment la filière veut changer la donne* », consulté le 22 novembre 2021.

¹⁸ <https://www.ciments-hoffmann.fr/>

¹⁹ « Il décarbone l'industrie du ciment », Industrie et technologies, n° 1045, Septembre 2021 pp.4-5.

²⁰<https://climat.be/changements-climatiques/changements-observees/rapports-du-giec/2023-rapport-de-synthese>

²¹ <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/developpement-durable-hydroponie-7409/>, consulté le 6/02/2022

l'agriculture traditionnelle. Cette agriculture, très spécialisée par site est extrêmement productive²². Sur un exemple italien, le nombre de récoltes de basilic a pu être accru à 14 récoltes par an, au lieu de 4 par l'agriculture traditionnelle.

La plupart de ces fermes verticales sont implantées à proximité des zones urbaines voire dans les villes, ce qui réduit le coût écologique du transport, permettant aussi une production à maturité, tout en augmentant la traçabilité de la production alimentaire pour le consommateur.

Néanmoins ces fermes sont de grandes consommatrices d'énergie, représentent une continuation de l'agriculture intensive.

L'agriculture cellulaire

C'est une conception radicalement nouvelle de la production alimentaire (et pharmaceutique, cosmétique, matériaux) qui se développe avec l'agriculture cellulaire. On voit naître depuis une dizaine d'années (à partir de la floraison des compléments alimentaires) le développement d'une alimentation totalement transformée sur des procédés chimiques et biochimiques, aboutissant à une gamme de pates et liquides nutritifs, produits par ce que l'on appelle les *foodtech*. Un exemple récent en est le produit de la start-up finlandaise Solar-food²³, une protéine riche en nutriments, baptisée *Solein*, produite à partir d'une bactérie nourrie par de l'hydrogène et du CO₂ de l'atmosphère. Proche des caractéristiques du soja, elle servirait de base à la production de yaourt, de pain ou de pâtes. La construction d'une usine en a été lancée en 2021²⁴ et toute une série de start-up, développent des productions par cultures cellulaires de viandes de bœuf, notamment le premier « burger artificiel » en 2013²⁵, mais aussi de poulet²⁶ et même en 2021, de foies gras de canard cultivés en laboratoire.

Cette technologie s'est élargie au végétal, notamment pour produire des viandes végétales. On a vu récemment une *foodtech* française produire de très réalistes lardons végétaux. Ce qui constitue par ailleurs une réponse contemporaine à la diminution de consommation de viande, et à l'accroissement de la population végétarienne. Il semble que cette technologie puisse atteindre rapidement sa maturité, s'appuyant sur le puissant progrès de la biotechnologie. Elle présente de considérables avantages écologiques²⁷, en permettant de produire une viande, décarbonée, indemne de toute la lourde facture écologique de la production animale traditionnelle, libérant, de plus, une surface considérable de terre, produisant une viande exempte de tous les polluants qu'une viande naturelle peut contenir (pesticides, antibiotiques). Sa commercialisation bute actuellement sur deux obstacles : l'agrément de l'autorité européenne de sécurité alimentaire, et le niveau de prix élevé de ces produits.

4-La décarbonation par la sobriété et la transformation sociale

La constatation de l'inefficacité relative de la décarbonation par l'innovation technologique, amène à la recherche de limitation du niveau d'activité, à la sobriété de ses supports et de leurs fonctionnements, ce qui implique une réforme profonde de nos modes de production, de consommation, de communication, de transport. Le principe en est que toute activité est génératrice d'effluents carbonés et que la décarbonation globale doit s'ancrer dans la réduction d'activité d'une multitude de secteurs, même à bas niveau de carbonation [SIN, 2021]. Cette transformation est loin d'être générale, mais plusieurs secteurs d'activité fondent la décarbonation de leur activité sur la recherche de sobriété, le numérique et l'emballage par exemple. Cette problématique de transition écologique est pour la décarbonation de validité universelle, aussi si on peut en présenter ici quelques applications, son champ de transformation n'est pas fini et l'on peut en imaginer de nombreuses applications.

4.1-L'agriculture écosystémique et régénérative : un changement radical de mode de production

Le premier principe de l'agriculture régénératrice est de maintenir voire de développer sa capacité et son efficacité de production en limitant et en gérant son empreinte écologique. L'agriculture écologique recherche

²² Jungle, la start-up qui veut déployer le concept de fermes verticales en Europe, Les Echos, Mercredi 24 mars 2022.

²³ <https://solarfoods.com/>

²⁴ Soleil vert pour inspiration, Les Echos, Mardi 25 janvier 2022.

²⁵ Par la société néerlandaise Mosa Meat, pour le coût de 250 000 dollars pour 100 g.

²⁶ Article Wikipédia Agriculture cellulaire : https://fr.wikipedia.org/wiki/Agriculture_cellulaire, consulté le 15/02/2022.

²⁷ ActiMeat, L'agriculture cellulaire remplira-t-elle nos assiettes de demain, <https://www.actimeat.fr/lagriculture-cellulaire-remplira-t-elle-nos-assiettes-de-demain/> consulté le 15/02/2022.

une bonne productivité apportée par l'équilibre, la richesse et la puissance biologiques de son support, les sols riches en agents végétaux, animaux, bactériens qui sont les conditions de sa fertilité. Cette pratique culturelle est en opposition avec des techniques « dégradatrices du milieu » telles que les labours profonds, destructeurs de la structure des sols et de leurs composants biologiques.²⁸ De même, elle s'oppose à l'apport d'engrais artificiels rendu nécessaire par la stérilisation et minéralisation des sols générés par le labour ; et à l'apport d'herbicides de pesticides et de produits phytosanitaires, rendus aussi nécessaires par les déséquilibres biologiques générés par les pratiques agricoles traditionnelles.

Le second principe de l'agriculture régénérative est que l'agriculture ne peut vivre et se développer isolée de son milieu. L'agriculture régénérative doit s'attacher à régénérer et à maintenir l'équilibre écologique de son milieu environnant, (reforestation et restauration des haies, équilibre avec des espaces sauvages, entretien et création de zones humides, développement de la biodiversité végétale et animale). Ceci favorisant la régénération du milieu atmosphérique, la réduction massive des largages de carbone et leur captation croissante par le milieu [VAL, 2020].

4.2-La décarbonation du numérique et les parades d'usage de sobriété [PIT, 2021]

Une grande partie de la consommation énergétique et des rejets de CO₂ pourrait être épargnée par des modification d'usage et de modes d'utilisation du numérique, pour purger les espaces de stockages, détruire les données inutiles, y compris les données du cloud. Le gain obtenu est difficile à chiffrer et nécessite une action de masse pour représenter un gain significatif²⁹.

Cette sobriété de fonctionnement peut aussi être obtenue par l'utilisation de technologies alternatives sobres pour remplir des fonctions numériques comme regarder une vidéo sur le signal WiFi plutôt que sur la 4G, ce qui consomme 23 fois moins d'énergie. Abaisser la qualité de diffusion des vidéos est aussi un moyen puissant de réduire le coût énergétique : pratiquée par 70 millions d'internautes, elle épargnerait mensuellement 3,5 Millions de tonnes de CO₂. De même, généraliser l'extinction des boxes non utilisées comme de tous les terminaux numériques à commencer par les téléphones portables, refroidir les grands serveurs par une installation en zones arctiques [PIT, 201]. Il s'agit là d'innovations de décarbonation par transformation des usages.

4.3-La décarbonation par l'affinement de la fonction, l'exemple de l'Emballage

La sobriété par l'écodesign

Simplifier et alléger les dispositifs d'emballage, par le recours à l'écodesign, tendant à optimiser le design, minimiser le volume, le poids et l'épaisseur de la boîte et éventuellement le système de protection, repenser les formats existants, éliminer les espaces vides dans la boîte, supprimer les composants inutiles et les suremballages, réduire l'épaisseur du matériau et utiliser des matériaux moins denses ou alvéolaires, optimiser le centre de gravité et l'esthétique des boîtes pour éviter le besoin de « lest », définir des dimensions optimales pour la palettisation³⁰, représente un faisceau d'actions de sobriété et de recomposition de mode de production qui en permettent la décarbonation.

Pour les colis cartons par exemple, une entreprise propose aux entreprises des **colis en carton sur mesure**, permettant d'adapter la taille du contenant au produit qu'il contient, d'éviter le rembourrage, d'assurer une meilleure protection des et de limiter le gaspillage de ressources, tout en offrant une meilleure fonctionnalité d'usage.

Ainsi la problématique de la diminution de l'impact environnemental de l'emballage, porte autant sur des transformations architecturales et de design du système emballage, que sur des mutations de modes de circulation et de distribution des produits, voire à travers la remise en cause de *l'usage unique*, des modes de consommation.

4.4-La décarbonation par réduction d'activités et diversification des supports : l'exemple de l'automobile

L'effet de masse, l'importance du parc automobile et de sa croissance

²⁸ Le livre vert 2022, Editions le Pommier, Y.Capowitz, C. Pélosi, *Les sols agricoles et biodiversité*, pp. 166-171.

²⁹ Comme le World digital cleanup day, action de l'Estonienne Anneli Ohvril qui a réuni, en avril 2020, une centaine de millier d'internautes.

³⁰ Guide de l'Éco Design dans le packaging, Mai 2021, <https://www.upsidecs.com/wp-content/uploads/2022/02/upside-eco-design-guidelines-210923-fr.pdf>, Consulté le 13 juillet 2022.

Il reste que le niveau inacceptable de ces rejets, à technologie automobile constante, est le produit de l'importance massive du parc automobile mondial qui a atteint 2,2 milliards de véhicules en 2023³¹.

Le rythme de croissance actuel du parc automobile mondial, tiré en particulier par l'équipement automobile des pays émergents, pourrait, sans mesure corrective, le faire doubler d'ici à 2040, le portant à près de 4 milliards de véhicules. Les rejets de CO₂ de ce gigantesque parc passant, à constance quantitative de rejets, ainsi de 10,5 à plus de 20 gigatonnes de CO₂ par an (soit plus de la moitié des rejets mondiaux totaux actuels).

C'est alors une réduction du parc automobile qui devrait déjà être entamée par la diversification du parc de véhicules de transport personnel au profit de supports au fonctionnement décarboné (bicyclettes, ferroviaire, nautique, micro-aérien) devrait permettre une décarbonation significative du transport terrestre personnel.

La fin du « tout automobile » : la diversification des modes de transport

L'amélioration du rendement de rejet en CO₂ ne sera pas suffisante à l'échelle globale compte tenu de l'effet de masse du parc automobile et de ses conditions dégradées de fonctionnement (faible densité de passagers, encombrement). Un courant d'innovations de vecteurs de transports routiers hors automobile, voire hors milieu terrestre se développe en parallèle et en alternative à l'automobile.

Le premier niveau consiste dans la diversification des modes de transport routier : sont apparus récemment, de nouveaux vecteurs de transport dit de *micro-mobilité*. Il s'agit de systèmes de transport anciens et connus tels que le vélo et la trottinette, mais dont les fonctions ont été amplifiées par l'adjonction d'une propulsion électrique, affinée et optimisée elle-même par le développement de la motorisation électrique de l'automobile.

Ces modes de transport exclusivement urbains se sont considérablement développés en lien avec l'innovation sociale des systèmes collectifs d'usage (location, covoiturage, Uber...). Cette diversification s'appuie aussi sur un renouveau des transports publics grâce à leur numérisation et autonomie qui permet d'envisager la mise en service de navettes collectives, également à motorisation électrique, numérisées et pouvant ainsi optimiser, en temps réel, leur itinéraire sur l'ensemble des itinéraires individuels commandés par ses passagers.

Un autre niveau de diversification porte sur la diversification du transport personnel non terrestre. Il consiste dans le développement du *transport nautique*, encore pratiqué aujourd'hui d'une manière marginale. Ces vecteurs pourraient être amenés à un haut rendement fonctionnel et environnemental par la combinaison de la propulsion électrique et des nouvelles géométries de sustentation (foils).

La seconde voie est de détourner le trafic de transport terrestre sur du transport aérien en concevant et développant des navettes aériennes « dronisées »,³² permettant de résoudre, à bas coût environnemental, les problèmes d'encombrement urbains.

4.5-L'exemple de l'économie circulaire

Le recyclage et la réduction de déchets [LAC, 2021] est déjà en place avec, aujourd'hui, un taux de recyclage des emballages de produits ménagers de 69,6%, les **emballages plastiques étant recyclés seulement à 26%** dont 54% pour les bouteilles et flacons et 4% pour les autres emballages³³.

Réduire et supprimer l'emballage à usage unique, développer la réutilisation, mettre en place un **système de consigne** (réactivant les anciens systèmes de consigne, notamment d'emballages alimentaires), ce que l'on appelle désormais les *systèmes logistiques zéro déchet*.³⁴ Une des réponses en cours de développement actuellement consistant à réduire le coefficient d'emballage par le développement des circuits courts en constitue une autre voie [GAL, 2016].

4.6-La décarbonation par modification des modes de consommation

D'une manière générale la recherche de décarbonation par le changement des modes de consommation et la « sobriété » porte sur la réduction de la consommation par réduction de la demande de consommation nouvelle. Elle se fonde sur des mesures telles que la réduction directe de la demande, comme avec la recherche de diminution des voyages aériens ou le rationnement de l'accès aux grands sites touristiques. Elle recherche une réduction de la demande de consommation par allongement de la durée de vie des produits. Cette dernière est obtenue par des mesures telles que l'augmentation de la réparabilité, l'organisation de marchés de seconde main pour les biens de consommation, la suppression de « l'usage unique » pour les produits consommables.

³¹ <http://carfree.fr/parc-automobile-mondial-temps-reel.html>

³² <https://infos.ademe.fr/magazine-novembre-2022/decryptage/trois-strategies-pour-decarboner-le-transport-aerien/>

³³ <https://zei-world.com/blog/pro/limpact-environnemental-des-emballages-lenjeu-des-entreprises#>. Consulté le 13 juillet 2022.

³⁴ <https://www.pandobac.com/grand-public/2020-limpact-des-emballages-sur-lenvironnement/> Consulté le 13 juillet 2022

5. Conclusion

Les modes de décarbonation dont sont porteurs les trois problématiques de transition écologique, sont apparus successivement, correspondant à une maturation de la transition écologique et à une universalisation de la décarbonation des activités humaines. Ils sont appelés à coexister actuellement car l'efficacité limitée des modes de décarbonation des deux premières problématiques fait que tous les modes de décarbonation vont devoir continuer à être approfondis et mis en œuvre en parallèle. Ceci jusqu'à ce que la troisième problématique de transition écologique – de recomposition de nos modes de production, de consommation, et de transport et ainsi d'interaction avec l'environnement – ait un effet restructurant qui rende contradictoire et inutile un certain nombre de modes de décarbonation des deux premières problématiques. Le stockage du CO₂, par exemple va perdre de son utilité dans un système d'ensemble largement décarboné. Le correctif technologique de la motorisation automobile électrique à batterie, réponse d'urgence à la carbonations massive, correspondant à la deuxième problématique de transition technologique, perdra toute utilité dans un système de transport diversifié, sobre, tel qu'il semble se dessiner. De même le développement de l'agriculture écologique et régénérative va entraîner l'abandon des prothèses mécaniques et numériques apportées aux pratiques agricoles productivistes.

Ainsi la troisième problématique de la transition écologique va converger en un système harmonieux de nouveaux genres de vie, d'un système économique en cohérence avec un nouveau système technologique, qui permette un niveau de développement économique et social optimal, pour atteindre un niveau de décarbonation satisfaisant, ceci en synergie avec l'amélioration de toutes les autres variables écologiques (préservation des ressources, stabilisation des milieux et de la biodiversité...). Cette harmonisation du système social avec l'environnement, dont la décarbonation n'est qu'une des dimensions, va entraîner la génération de nouvelles formes d'activités, éliminant certains modes de décarbonation qui ont constitué des modes ponctuels liés aux logiques de fonctionnement technologiques, économiques et sociaux antérieurs.

Ainsi les modes de décarbonation des phases correctives et technologique de la décarbonation vont être recomposés par la phase systémique porteuse d'une cohérence d'ensemble au niveau sociétal, mais aussi par la généralisation de modes de production, de consommation et des transports intrinsèquement décarbonés. La tendance est donc de passer d'une décarbonation corrective ou de prothèse, à la généralisation de modes d'activités intrinsèquement non carbonés.

6. BIBLIOGRAPHIE

- [AIT, 2024] AÏT-EL-HADJ, S., 2024, *Transition écologique et mutation technologique*, ISTE éditions, Londres.
- [AIT, 2020] AÏT-EL-HADJ, S., 2020, Mutation technologique et transition environnementale, enseignements du cas de l'automobile. *Marché et organisation*, n° 39, Options stratégiques et systèmes d'innovation, L'Harmattan, pp. 185-206.
- [GAL, 2016] GALLAUD D., LAPERCHE B., 2016, *Economie circulaire et développement durable*, ISTE Editions, Londres.
- [LAC, 2021] LACY, P. et Alii, 2021, *Le manuel de l'économie circulaire*, MA éditions-ESKA
- [PAP, 2020] PAPON, P., Le progrès technique, clef de la transition énergétique, *Futuribles*, n° 436, Mai-juin pp. 23-39. [PIT, 2021] PITRON G., 2021, *L'enfer numérique*, Editions Les liens qui libèrent, Paris.
- [SAR, 2011] SARRADE, S., 2011, *La chimie d'une planète durable*, Edition Le Pommier, Paris.
- [SCH, 2018] SCHRADER, C., 2018, Les voitures électriques sont-elles écologiques, *Pour la science*, n° 493, Novembre, pp. 62-70.
- [SIN, 2021] SINAI, A., dir., 2021, *Politiques de l'anthropocène*, Sciences Po, Les presses, Paris.
- [UN, 2017] UN Environment, 2017, *Green Technology Choices: The Environmental and Resource Implications of Low-Carbon Technologies*, International resource panel report.
- [VAL, 2020] VALIORGUE, V., 2020, *Refonder l'agriculture à l'heure de l'anthropocène*, Edition Le bord de l'eau, Paris.
- [VEL, 2021] VELTZ, P., 2021, *L'économie désirable, sortir du monde thermo-fossile*, Seuil, La république des idées, Paris.