

Décarbonation – une perspective sur les 30 dernières années et autres questions émergentes

Decarbonization – A Perspective for the Last 30 Years and Other Emerging Topics

Jean-Pierre Birat¹

¹ IF STEELMAN, Semécourt, France, jean-pierre.birat@ifsteelman.eu

RÉSUMÉ. Cet article aborde la question de la décarbonation en témoignant de la démarche suivie depuis une quarantaine d'année, en particulier dans la sidérurgie : une longue trajectoire, traversée de crises et de périodes d'intense créativité, qui semble maintenant se traduire en actes industriels, même si la vrai "zéro net" ne sera atteint qu'en 2050, si la démarche en cours ne rencontre pas trop d'obstacles. On s'interroge aussi sur le rôle respectif des grandes organisations, comme les états ou l'AIE, et celui des individus : les rôles des deux types d'acteurs sont intimement intriqués. On rappelle aussi que décarbonation doit aller de pair avec la préservation de la biodiversité ou la maîtrise de la pollution de l'air, mais aussi avec des questions plus sociétales et politiques comme les migrations et les inégalités. Enfin, on propose de prendre en compte l'agentivité de tous les êtres vivants et des objets inanimés pour aborder ces questions dans toute leur complexité.

ABSTRACT. This article deals with the decarbonization of the economy through a personal account of the trajectory followed by the steel sector. It experienced several crises followed by periods of intense creativity, and is now moving into industrial implementation, even if Net-Zero will not be achieved until 2050, supposing the process does not run into too many obstacles. One also questions the relative roles of large organizations versus that of individuals: but both are deeply entangled. Moreover, in parallel to decarbonization, biodiversity loss and air pollution should also be addressed, as well as more social and political issues such as migrations and inequalities. Lastly, there is a suggestion to take on board the agency of all living creatures and of inanimate objects in order to deal with these issues in all their complexity.

MOTS-CLÉS. Décarbonation, temps long, sidérurgie, rôle des organisations et individus, biodiversité.

KEYWORDS. decarbonization, long time, steel industry, role of organizations vs. individuals, biodiversity.

Introduction

Cet article aborde certaines questions importantes liées à la décarbonation de la société, mais qui restent le plus souvent dans l'ombre :

En nous référant au cas de la sidérurgie, nous montrerons d'abord comment la question a été identifiée, formalisée et explorée depuis plus d'une trentaine d'années avant de quitter le monde de la recherche et des études et de basculer dans celui des décisions d'investissement : une vision diachronique basée sur l'expérience personnelle de l'auteur, donc sur un témoignage, et, bien sûr, sur la littérature. Avec une question sous-jacente : pourquoi le processus d'identification du problème et de mise en œuvre de solutions a-t-il été aussi long ?

Nous questionnerons ensuite le rôle respectif des grandes organisations et des individus dans le basculement vers une société décarbonée.

Puis nous nous demanderons si parler de décarbonation suffit à identifier le problème auquel la société fait face ou si d'autres questions liées à l'environnement ne doivent pas lui être adjointes, telle que l'effondrement de la biodiversité, la pollution et ses effets sur la santé ; ou des questions plus générales comme les migrations et l'explosion des inégalités. Pour les traiter, il pourra être nécessaire d'adopter une approche encore plus large, en faisant appel à une analyse du rôle de la nature et des

objets créés par l'homme en termes de leur *agentivité* dans le fonctionnement de l'écosystème « planète terre ».

1. Une vision diachronique de la décarbonation, à travers l'exemple de la sidérurgie

L'histoire du changement climatique (CC) rapide et contemporain est récente, puisqu'elle n'a quitté le cercle restreint des spécialistes du climat qu'en 1992, à l'époque du Sommet de la Terre, organisé à Rio par les Nations Unies du 3 au 14 juin 1992. Elle est restée depuis dans la lumière médiatique [UN 92, UNFCCC 92]. Ce grand événement auquel ont participé 179 chefs d'Etat avait été précédé par des travaux d'approche à la fois scientifiques et politiques, qui avaient conduit à populariser les notions de *développement durable*, de *changement climatique*, de *biodiversité* ou de *foresterie durable*. On citera ensuite le *protocole de Kyoto*, signé lors de la COP 3¹ en 1997, où la première mise en musique des principes de Rio a été proposée [UNFCCC 97], et le *traité de Paris*, signé lors de la COP21 en 2015, qui est entré dans le détail des engagements contraignants à prendre par les états pour maîtriser le CC [UNFCCC 15].

On peut reconstituer cette histoire à partir de *différents corpus de sources*.

Les historiens, par exemple, traitent du changement climatique depuis que l'historiographie, portée par la Nouvelle Histoire et l'École des Annales, s'est ouverte à des événements hors du champ politique, Emmanuel Le Roy Ladurie jouant un rôle de précurseur en France avec sa célèbre *Histoire du climat depuis l'an mil* [LER 67]. Le climat en tant qu'acteur et moteur de l'histoire est maintenant devenu un champ d'étude en soi [CAM16], une sous-discipline de l'histoire, à distinguer de la *paléoclimatologie* qui relève du temps de la préhistoire ou même de la géologie [BER 12, JOU 19]. Les historiens ne se sont pas encore saisis du CC contemporain, probablement parce que l'horizon temporel est trop récent pour cette discipline, d'autant que les acteurs s'y adonnent à des exercices de prospective, qui eux sont tout-à-fait hors champ de l'histoire.

Les climatologues s'intéressent au climat d'aujourd'hui et le projettent sur un avenir proche, le 21^e siècle ou ceux qui suivent. Ce sont eux qui ont « inventé » le CC dont on parle ici. Leurs travaux forment la base des rapports du GIEC², dont 6 séries ont été publiées depuis les années 1990 [IPCC 23]. Ces publications sont cadencées avec les réunions des COP de la CCNUCC³, ce qui traduit le fait que ces travaux avancent en phase avec la définition de politiques climatiques par les gouvernements et les institutions internationales. C'est dans ces travaux, qui constituent probablement un des domaines de recherche scientifique les plus intensifs aujourd'hui, que le lien entre le changement climatique rapide, qui a lieu de nos jours, a été associé sans ambiguïté aux émissions anthropiques de gaz à effet de serre (GES) [ORE 04].

Les différents secteurs de l'économie à l'origine des émissions de GES se sont peu à peu approprié le sujet du CC, le traitant de différentes façons. A leurs côtés, les sciences de l'ingénieur, qui les accompagnent, se sont aussi lancés sur ces pistes, de même que les participants des écosystèmes industriels qu'ils définissent : par exemple, dans le cas de la sidérurgie, le *secteur minier*, le secteur de *l'énergie*, les grands gaziers, les grands équipementiers, la logistique mondiale des transports de matières premières, mais aussi les clients de l'acier comme *l'industrie automobile*. Les sources sont donc les publications techniques et scientifiques que produisent certains de ces acteurs, à la fois des articles originaux et des articles de synthèse, mais aussi des rapports, dont seulement certains ont été rendus publics, des communiqués de presse, des chapitres de livre, des sites internet, des films et des vidéo, des témoignages d'acteurs importants – dont le flot s'étend sur une quarantaine d'années, une profondeur temporelle et une diversité qui échappent largement aux moteurs de recherches, dont la myopie les restreint souvent au passé récent.

¹ Conference Of the Parties n°3

² GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

³ CCNUCC : Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques

On va maintenant spécialiser le récit sur la prise en compte du changement climatique par la sidérurgie.

Les premières réflexions sur cette thématique dans la sidérurgie remontent à la fin des années 1980, avant le sommet de Rio et la signature du protocole de Kyoto, et donc avant son émergence au grand jour. On trouve ainsi la trace de travaux français et japonais, qui ont donné lieu à des publications au début des années 1990 [BIR 93, OHN 94a, OHN 94b]. Il s'agissait d'initiatives prises par des chercheurs de l'IRSID⁴ et de Nippon Kokan⁵, dans le but d'explorer à la fois la nature et le volume des émissions de GES de la sidérurgie et de discuter comment les réduire. Les deux groupes se connaissaient et avaient échangé sur le principe de ces travaux. Des groupes de travail comme celui cité dans [BIR 93] ont d'abord publié des rapports conduits de façon confidentielle, puis les auteurs ont été invités à parler de leurs résultats dans différents fora. Le public de ces congrès spécialisés découvrait alors un phénomène encore peu connu, à savoir que la sidérurgie était un gros émetteur de GES, du fait de sa consommation de carbone (coke) dans les hauts fourneaux pour réduire le minerai de fer en métal, mais aussi qu'un grand nombre de voies de principe étaient ouvertes pour réduire ces émissions : la liste établie au tournant des années 1980-90 n'a pas vraiment varié depuis.

Les années 1990 ont été consacrées à l'appropriation par le secteur de la sidérurgie de ces questions. Un groupe de travail s'est réuni dès le début des années 1990 à l'IISI⁶ à Bruxelles en collaboration entre des producteurs d'aciers européens et a remis sur le métier les comparaisons de procédés publiées dans [BIR 93] avec des données partagées et confirmées par les participants [IISI 93]. Le rapport terminé en 1993 a circulé largement dans la sidérurgie mondiale et au-delà, bien qu'il n'ait pas été officiellement publié : il est cité dans le 2^e rapport d'évaluation du GIEC [IPCC 95] en 1995 et dans un résumé qui en a été fait en 1996 [MOO 96]. La réflexion collective de la sidérurgie conduite sous la houlette de l'IISI diffuse donc vers les groupes de travail du GIEC qui en ont à connaître.

Mais les publications dédiées à la sidérurgie restent rares dans les années 1990, car aucune équipe dédiée à cette thématique ne s'y consacre encore à temps plein.

C'est au tournant du siècle que les choses s'accélérent. De nombreux séminaires spécialisés commencent à être consacrés à ces questions, par exemple à San Diego en 1999 [TMS 99] ou à Toronto en 2001 [PIC 01]. Personnellement, je suis aussi invité à parler dans des conférences plus générales, comme à Pittsburgh en 2000 [BIR 99], à São Paulo en 2001 [BIR 01], à Pohang en 2002 [BIR 02], à Cleveland [BIR 03a], à Düsseldorf [BIR 03b] et à Beijing [BIR 03c], ces trois dernières en 2003. Les travaux du début des années 1990 ont été repris et approfondis à ces occasions [BIR 03d].

En arrière-plan, les sidérurgistes sont maintenant convaincus de la nécessité de réduire leurs émissions de GES (mais on ne dit pas encore de combien) et du fait que des études papiers et *in silico* sont dorénavant insuffisantes et doivent être relayées par des travaux à caractère expérimental : en effet, il est nécessaire de faire appel à des technologies de production d'acier qui ne sont pas encore mûres, c'est-à-dire des *technologies en rupture*, qui demandent donc des développements de type R&D.

Différents schémas se mettent en place, basés sur trois principes : (1) il est nécessaire de monter des projets collaboratifs, car les incertitudes sur les technologies sont trop grandes pour qu'une entreprise en porte une, à elle seule ; (2) il est nécessaire d'explorer plusieurs technologies en rupture en parallèle

⁴ Institut de recherche de la sidérurgie française, ou IRSID, dont l'acronyme est devenu à terme le nom complet. Cet organisme de recherche, créé en 1946, avait pour mission de travailler pour l'ensemble de la profession sidérurgique française : il était financé par des cotisations volontaires des entreprises. A la suite de la réunification du secteur sous l'égide d'USINOR puis d'ARCELOR, l'IRSID a été absorbé par cette société et est devenue *in fine* ArcelorMittal Research.

⁵ Nippon Kokan (NKK) était la seconde plus grande entreprise sidérurgique japonaises, en taille, créée après la seconde guerre mondiale. Elle a fusionné avec Kawasaki Steel en 2002, pour devenir JFE.

⁶ International Iron & Steel Institute, ou IISI, un organisme international basé à Bruxelles, créé en 1967, agit comme le syndicat professionnel de la sidérurgie mondiale. L'IISI est devenue *worldsteel* ou *World Steel Association* en 2008.

et de pouvoir les comparer entre elles, au fur et à mesure de leurs développement, car il n'y a pas de méthode, *hic et nunc*, pour en choisir une et une seule ; (3) des financements de recherche sont disponibles de la part des gouvernements ou d'organisations supranationales en Europe, en Asie et en Amérique pour soutenir ce genre de travaux à long terme, importants mais à caractère incertain, qui motiveront et soulageront les industriels.

En quelques mois deux programmes collaboratifs sont mis en place :

- L'un dans l'Union européenne, porté par le programme cadre (6^e) et par le programme RFCS, qui prend le nom de *programme ULCOS*⁷. Y participent 48 partenaires, industriels et chercheurs académiques de 11 pays de l'UE – dont la grande majorité des sidérurgistes européens. Il doit avancer en deux étapes : d'abord à partir d'une analyse exhaustive du possible en termes de procédés de production d'acier, exhiber un ou plusieurs procédés qui ont le plus de potentiel pour atteindre les objectifs du programme, c'est-à-dire réduire les émissions de GES de 50% au moins, au niveau de l'ensemble de l'usine sidérurgique (*gate-to-gate*, mais prenant en compte des émissions de scope I et scope II). Le programme démarre en 2004, il dure 5 ans et pourra déboucher sur une suite à plus haut TRL⁸, le programme ULCOS II. Arcelor puis ArcelorMittal assurent la coordination du programme.
- L'autre au niveau mondial, accueille les programmes asiatiques et américains ; ULCOS y est invité. Au Japon, un gros programme est lancé avec le financement du NEDO, *le programme COURSE 50*⁹ [COU 24]. Aux Etats-Unis, l'AISI¹⁰ finance lui aussi un programme. Les autres participants sont financés partiellement par leurs gouvernements. Ce programme prend le nom de *CO₂ Breakthrough Program* et démarre lui aussi en 2004.

Après la période d'incubation des années 1990, les années 2000 sont donc denses et hyperactives. Les états, ou les super-états comme l'Union européenne, sont impliqués par des financements importants de recherche et développement. En parallèle, les Nations Unies ou l'OCDE au travers des publications de l'IPCC solidifient leur récit scientifique et s'impliquent aussi d'autres manières, comme l'UNIDO¹¹ [UNI 10] ou l'IEAGHG¹² [SAN 13].

Les progrès sont consignés dans des rapports très détaillés, confidentiels ou non [FEI 14], mais qui échappent largement aux bibliographies des articles récents sur ces sujets. Des synthèses sous forme de publications classiques sont aussi néanmoins disponibles [LAR 09, MEI 13].

On peut considérer qu'à la suite de ces programmes, se substituent à une liste sèche de solutions possibles pour décarboner la sidérurgie des technologies ayant pris corps dans des essais de laboratoires, des essais pilotes et même sur de petits démonstrateurs, donc affichant des TRL de l'ordre de 5 ou 6 pour beaucoup d'entre elles. Ces études sont essentiellement des travaux à caractère scientifique et technique, issus de la communauté STIM¹³ : la question posée est de savoir si des technologies de production d'acier à bas carbone sont possibles, selon les règles du génie des procédés. On ne se préoccupe encore de rien d'autre.

Une question pourtant déjà essentielle reste peu abordée, celle de savoir combien coûtera un tel saut de technologies aussi bien en termes de coût d'investissements que de frais d'exploitation. Des chiffres circulent [SAN 13, BEL 09, BIR 09, RYN 07], mais presque dans l'ombre, quand ils ne sont pas codés [BIR 09]. De fait, après avoir compris que la décarbonation est techniquement possible, la

⁷ ULCOS : Ultra-Low CO₂ Steelmaking

⁸ TRL : Technology Readiness Level

⁹ COURSE 50 : Ultimate reduction of CO₂ in the steelmaking process through innovative technology for Cool Earth 50

¹⁰ AISI : American Iron & Steel Institute

¹¹ UNIDO : United Nations Industrial Development Organization

¹² IEAGHG : International Energy Agency (IEA) Greenhouse Gases

¹³ STIM : Science, technique, ingénierie, mathématiques

communauté des sidérurgistes prend conscience des coûts afférents et hésite à les envisager et même à en parler, devant certaines estimations qui s'élèvent à plusieurs centaines d'euros par tonne d'acier, soit une fraction importante du prix courant du métal. Des appels sont faits à des financements par les états [SAN 13], mais les états eux-mêmes sont alors encore dans l'incrédulité voire dans le déni vis à vis du CC. On ne se prononce pas non plus clairement sur le niveau de mitigation des émissions qui peuvent être atteintes, même si certains annoncent que 100% est à portée de la main si cela est nécessaire.

Les programmes de R&D en cours continuent sur leur lancée et c'est une des vertus des activités collaboratives que de posséder une grande inertie. ULCOS propose des technologies-phares pour continuer la montée de l'échelle des TRL jusqu'à de gros démonstrateurs ou à une première usine FOAK (*First of a kind*). COURSE 50 aussi [COU 24].

Une phase ULCOS II est lancée, autour des quatre et demi technologies sélectionnées, baptisées *technologies ULCOS* : un *haut fourneau avec capture et stockage du CO₂* (CSC) (ULCOS-BF ou TGRBF¹⁴), un *réacteur de réduction-fusion* (HISARNA), un *procédé de réduction directe au gaz naturel* avec CSC (ULCORED), un *procédé de réduction par électrolyse* de minerai de fer (ULCOWIN) et le « demi procédé », la *réduction à l'hydrogène* suivie d'une fusion dans un four électrique. Il est intéressant de noter qu'en cette fin des années 2000, le fait que l'hydrogène vert ait à être produit à partir d'électricité et d'eau paraît *hic et nunc* inaccessible à la sidérurgie qui se croit obligée de produire une filière complète, car les solutions pour créer un réseau d'hydrogène bas carbone ne sont guère décrites, à cette époque.

ULCOS-BF cherche un site industriel où s'implanter et c'est finalement celui d'ArcelorMittal à Florange, qui est sélectionné. Le programme conserve le soutien des sidérurgistes de ULCOS I et dépose une candidature au programme européen « NER-300¹⁵ », qui a été créé à cette époque pour apporter des subventions d'un ordre de grandeur supérieur à celui des programmes de R&D et donc pour permettre des montées significatives vers des TRL élevés.

Mais l'arrêt de la filière chaude de Florange par ArcelorMittal en 2013, suite à la crise économique « dite de 2009 », sonne le glas du projet TGRBF, qui avait pourtant reçu officiellement un financement par *l'Innovation Fund* à hauteur de plusieurs centaines de millions d'euros. C'est la fin du projet amiral d'ULCOS II.

Les autres projets se poursuivent à bas bruit, occultés par cette quasi-disparition du TGRBF : HISARNA¹⁶ à Ijmuiden chez Tata Steel [MEI 15] et ULCOWIN fait appel à des programmes complémentaires en changeant plusieurs fois de nom [LAV 16] : SIDERWIN¹⁷, puis VOLTERON [JOH 23]. Quant à ULCORED [KNO 09], il s'efface comme le sourire du chat du Cheshire, mais on peut y voir le précurseur des projets qui vont surgir au tournant des années 2020 en Suède tels qu'HYBRIT.

La crise de 2008 a donc conduit à la réduction des capacités de production d'ArcelorMittal, qui a choisi la fermeture du site le plus loin de la mer au prix d'une mise en sommeil d'un projet très ambitieux. Dans le grand public, c'est la fin de la sidérurgie lorraine qui a été mis en exergue, plutôt que la mise en sommeil d'un projet tourné vers l'avenir. Clairement, la montée en TRL envisagée à Florange était trop importante pour les principaux acteurs impliqués. Est privilégiée dorénavant la poursuite de projets moins ambitieux.

Les années 2010 sont une décennie où on parle encore de décarbonation de la sidérurgie, mais en continuant à rechercher d'autres solutions, si possible différentes de celles qui ont été étudiées et triées

¹⁴ TGRBF : Top Gas Recycling Blast Furnace

¹⁵ NER veut dire "New Entrant Reserve", une source de fond mis de côté par la Commission européenne pour attribuer des droites d'émissions de CO₂ à de nouveaux entrants dans l'union, budgétée mais non utilisée.

¹⁶ La plupart des noms de procédés cités dans ce paragraphe ne sont pas de vrais acronymes, mais des noms propres.

¹⁷ <https://www.siderwin-spire.eu>

dans les programmes précédents [BIR 21, DEM 21]. C'est en fin de cette période que l'expression « décarbonation » est inventée pour remplacer « sidérurgie à bas carbone ». On parle aussi de « sidérurgie zéro-carbone ou zéro-net ».

Le saut qualitatif vers des solutions à échelle industrielle attendra. Personne n'est prêt à tenter ce saut, en dehors des chercheurs eux-mêmes. Il n'y a pas encore d'injonction politique claire aux industriels pour agir. Les tentatives de contraindre les secteurs économiques, dont la sidérurgie, via le marché de droits d'émission de CO₂ ont été un échec : la valeur du carbone était en effet trop faible au regard des investissements nécessaires [IPCC 18, WWF 22]. Les économistes comprennent qu'ils doivent travailler un peu plus ces sujets et leurs travaux confirment les coûts élevés que les solutions à bas carbone impliqueraient [GUI 23, MIS 22, KER 23].

En outre, en parallèle avec les récits sur le CC, s'exprime *un puissant courant de déni*, porté par les climato-sceptiques, par des contradicteurs plus subtils ou plus simplement par des procrastinateurs. Les mécanismes de ce déni ont été analysés par des chercheurs en sciences humaines et sociales dans ce qui est devenu la discipline de l'*agnostologie* [FOU 14, ORE 15].

Le consensus scientifique étant dorénavant de plus en plus difficile à nier [ORE 04], le négationnisme s'est déporté ailleurs dans les années 2010 : par exemple, une cabale contre le CSC s'est déclenchée en Europe, affirmant, sans preuve, que la population était hostile à cette technologie¹⁸. Ensuite, le débat s'est porté sur la possibilité d'utiliser le CO₂ plutôt que de le géostocker et on a inventé l'expression CCUS (*Carbon Capture and Use*, *CSUC en français*) : cela a ouvert la porte à une grande variété d'options dont on a pu débattre très longtemps. On a aussi affirmé qu'il n'y avait pas de site de stockage de CO₂ en Europe en dehors du plateau continental de la Manche et de la mer du Nord ; ce n'étaient là que rumeurs sans fondement, mais elles suffisaient à bloquer des projets ou à les retarder. Des méthodes plus subtiles comme de ne pas citer les travaux anciens et donc de laisser croire qu'on doit partir d'une table rase, sont légion. Le fait de changer de vocabulaire, comme de parler de *Smart Carbon Usage* (SCU)¹⁹ ou de *Carbon Direct Avoidance* (CDA)²⁰ [EUR 19]), ou changer le nom d'un procédé (*ULCOWIN* devenant *SIDERWIN* puis, *VOLTERON*) permet de « gagner du temps », c'est-à-dire de ralentir les choses, pendant que les lecteurs réapprennent le nouveau vocabulaire, et de se donner un air « jeune et récent ». Une décennie de procrastination, donc.

A la fin des années 2010 se produisent deux événements déterminants : (1) l'accord de Paris à la COP21, en 2015, où une majorité d'Etats se prononcent sur le nécessité de viser un réchauffement au plus de 1,5°C ; et (2) la proclamation par la commission européenne de Ursula von der Leyen, dès son arrivée en fonction le 11 décembre 2019, du *Pacte Vert*, qui engage l'Europe à réduire ses émissions de 55% en 2030 par rapport à 1990 et de 100% (*le zéro-net*) en 2050 [EU 24a], avec une réduction intermédiaire en 2040 de 90% [EUR 24b] – ce qui revient à adopter au niveau de l'union européenne des règles déjà proposées dans des états-membres [ADE 21]. A la suite de l'UE, le monde entier s'oriente d'ailleurs vers sa propre version du zéro-net, qui devrait être atteint entre 2040 et 2070, selon les engagements des différents pays.

Ces déclarations à caractère politique assez générales sont suivies rapidement de communiqués des industries émettrices et de leurs associations, annonçant qu'elles s'engagent, *volens nolens*, vers le zéro-net. Ces déclarations sont accompagnées de feuilles de route systématiques plus ou moins détaillées, expliquant comment la transformation va être mise en œuvre : des plans industriels impliquant de lourds investissements sont lancés [BIR 23a]. Cependant, la sincérité de ces annonces ne sera jugée que dans plusieurs années, quand les intentions auront été traduites en actes objectifs et indiscutables, comme des engagements d'investissements pour commencer.

¹⁸ Alors que le projet ULCOS II de TGRBF s'acheminait sans difficulté majeure et sans rejet populaire vers le stockage du CO₂ de Florange dans des aquifères salins de la région de Verdun.

¹⁹ En lieu et place du CSC et du CUSC.

²⁰ C'est-à-dire le remplacement du carbone par d'autres réducteurs (hydrogène, biomasse ou électricité).

Un jeu d'annonces est d'ailleurs en cours, où des représentants de sidérurgistes européens prennent leur distance vis à vis de ces objectifs [PAR 24, COL 24]. On peut y lire un marchandage avec les gouvernements expliquant que le coût de l'hydrogène vert, en particulier, ne sera pas supportable par les entreprises sans subventions d'exploitation (on leur a déjà accordé de grosses subventions pour les investissements) - ou un écho des doutes négationnistes.

Comme le dit Bruno Latour [LAT 17], « le monde affronte un choc épistémique aussi violent que celui qui a révolutionné la culture occidentale lors de la Renaissance et de la Révolution scientifique ». Pourquoi cette transition se met-elle en place maintenant et de façon aussi unanime, alors que pas grand-chose n'a vraiment changé ? Parce qu'il était grand temps de le faire, qu'on parie que les réponses encore en attente vont se dévoiler en marchant ? Des réponses plus serrées devront être apportées dans l'avenir à ces questionnements par des politistes et des historiens.

Les gouvernements en Europe et ailleurs se mettent aussi à la manœuvre. Ils adoptent ou réécrivent des législations et des réglementations pour être en phase avec le Pacte Vert [RF 20, RF 23], mais surtout ils promettent de mettre à disposition de l'économie des fonds importants, à hauteur de centaines de milliards d'euros : 1000 milliards pour soutenir le Pacte vert en Europe sur dix ans d'ici 2030 [VIE 20], 369 milliards de US\$ pour financer l'*Inflation Reduction Act (IRA)* aux États Unis [LEV 23]. Des chiffres très importants, mais encore insuffisants par rapport au chiffrage de l'IEA, qui annonce un besoin global en financement de la transition écologique sur cette période à 3.000 milliards de US\$.

Noter la parution d'une grande variété de feuilles de routes, par exemple du secteur de l'énergie [IEA 21, RTE 22], ou des zooms sur des thématiques particulières comme celle de l'hydrogène [IEA 23]. Les Etats « nationalisent » les formulations européennes, par exemple [RF 24, RF 23], en reformulant des textes un peu plus anciens [BIR 20].

En analysant l'ensemble des feuilles de route annoncées ou en cours d'implémentation dans le secteur de l'acier [IPCC 18, COL 24], on retrouve les filières bas-carbone déjà mentionnées auparavant, à savoir : (1) l'utilisation massive de ferraille, à hauteur de la totalité du gisement disponible, avec fusion au four électrique à arc (FEA), (2) l'utilisation de la filière intégrée haut-fourneau-convertisseur - ou la réduction-fusion - avec Capture et Stockage du CO₂, (3) la réduction directe transitoirement au gaz naturel, puis, à terme, à l'hydrogène décarboné, (4) la réduction du minerai de fer par électrolyse, soit assez exactement ce qu'ULCOS avait annoncé en 2008. Noter que le zéro-net ne sera atteint que si de l'électricité décarbonée est disponible en abondance, de même que de l'hydrogène décarboné et un réseau de stockage géologique du CO₂. Ceci nécessitera aussi des investissements considérables, portés par des investisseurs privés ou par les Etats.

En Europe, au tournant des années 2010-2020, le choix privilégié s'est porté sur *l'utilisation d'hydrogène*, dans un consensus tacite entre industriels et pouvoirs publics [BIR 21], avec l'hypothèse implicite que cet *hydrogène sera vert ou rose* - la possibilité d'utiliser un hydrogène « fossile », *l'hydrogène blanc*, n'ayant alors pas encore été envisagée, mais elle offre un fort potentiel [PIR 23, AIM 23]. Ailleurs on parle aussi d'hydrogène, mais aussi de CSC, et l'électrolyse est émergente à bas bruit, en Europe, aux États-Unis et en Australie [BOS 24, ELE 24, FOR 23]. En Europe, la ferraille est amenée à jouer le premier rôle, car l'économie européenne engendre de grandes quantités de ferrailles liées à son long passé industriel, et dans la mesure où la région saura arrêter l'hémorragie de ferraille hors des frontières de l'UE et se la réappropriera. Noter que cela ne contribuera pas vraiment à des réductions globales d'émissions de GES.

L'attrance pour l'hydrogène, qui prend sa source dans le livre de Jeremy Rifkin de 2002 [RIF 02], est liée, pour les sidérurgistes, à une séparation annoncée des rôles entre producteurs d'acier et d'hydrogène et, pour les Etats, au fait que l'hydrogène est un « fluide » comme l'électricité dont l'utilisation offre un spectre presque universel. Les annonces de subventions importantes ont probablement joué le rôle de déclencheur dans le processus de battage médiatique qui a conduit aux

choix des industriels, soit des utilisateurs potentiels de cet hydrogène, soit des producteurs à partir d'électricité décarbonée. L'inflation d'annonces d'intention de construire des lignes de production semble cependant se dégonfler, *hic et nunc* [MAR 24, PEC 24].

On doit aussi mentionner que l'utilisation d'hydrogène en sidérurgie est beaucoup moins simple que l'exemple de HYBRIT [PEI 20] n'a pu le laisser croire, car la disponibilité de minerai de qualité adéquate (*DR-grade ore*) est probablement insuffisante dans l'état actuel de l'offre minière, ce qui conduit à envisager de fabriquer de la fonte à partir de pré-réduits à l'hydrogène, donc de ne pas pouvoir les fondre pour en faire de l'acier au four électrique à arc, qui ne peut accepter les fortes quantités de laitier liées à la gangue du minerai. Ceci explique aussi l'envolée de R&D en Australie, dont les minerais d'assez basse qualité ne peuvent être utilisés tels quels dans une filière de réduction à l'hydrogène [NAT 23], alors que le pays entend rester le premier producteur mondial de minerai de fer.

La transition abrupte, qui semble s'être produite en Europe au tournant des années 2010 et 2020, a eu une réplique d'égale ampleur en Chine, avec quelques années de décalage. Aujourd'hui, en 2024, un très grand nombre d'articles scientifiques signés d'auteurs chinois apparaissent et un gros projet industriel a été annoncé par BaoWu sous le nom de HyCROF, une feuille de route détaillée accompagnée de premières installations de démonstration, qui ressemble d'ailleurs beaucoup aux conclusions du programme ULCOS [WSA 23]. Rien de tout cela n'avait encore percé lors du séminaire IEA-Chine de 2019 [IEA 19], ce qui montre la soudaineté de la transition. En arrière-plan de ce bond en avant, la Chine a annoncé officiellement son intention d'atteindre la neutralité carbone en 2060, ce qui a certainement déclenché cette abondante activité sur la décarbonation de la sidérurgie au Pays du Milieu – les plans quinquennaux chinois ayant une force d'entraînement de l'économie chinoise plus évidente que les « *lois souples* » (*soft laws*) occidentales telles que le Pacte Vert sur leur propre territoire.

Ce qui précède fait écho directement au monde des STIM et à celui des affaires. Cependant, les données économiques sont peu nombreuses et les analyses qui les prennent en compte sont encore plus rares : le discours ambiant oscille entre l'espoir que les technologies zéro-net vont rapidement converger vers des coûts de fabrication de l'acier équivalents aux coûts actuels, et la quasi-certitude qu'un coût du carbone devra s'y ajouter, peut-être au niveau de plusieurs centaines d'euros à la tonne de CO₂ en 2050 [CRI 21] ou même beaucoup plus [BIL 24]. Dans ces conditions, il sera nécessaire non seulement de financer de lourds investissements pour réoutiller la sidérurgie en profondeur, mais aussi d'accepter des coûts de production plus élevés qu'aujourd'hui. Qui va payer ces surcoûts ? En Europe, les Etats ont commencé à participer aux financements des investissements, mais ce n'est qu'aux États Unis qu'une subvention de coûts de production (via une subvention à la production d'hydrogène vert) est en place : c'est cette négociation par médias interposés que lancent les sidérurgistes européens en annonçant, ni plus ni moins, qu'ils n'utiliseront pas la réduction à l'hydrogène [PAR 24], ce qui reviendrait à fermer une partie des usines sidérurgiques européennes. Il devient urgent qu'industriels et gouvernements, en Europe, se penchent ensemble sur ces questions !

2. Rôles du collectif et de l'individuel dans le changement climatique et la décarbonation

Dans la section qui précède, le lien entre consommation de ressources énergétiques fossiles et émissions de GES (53,8 Gt CO_{2eq} en 2022) a été considéré comme allant de soi et cette doxa a été appliquée à la sidérurgie : c'est parce que la sidérurgie utilise du coke et du charbon en grandes quantités qu'elle est une grosse émettrice de GES.

On peut décoder le lien entre émissions globales de GES et différents agrégats économiques : (1) l'énergie, d'abord, ce qui donne une dépendance de ces émissions à l'énergie fossile de 73% [IEA 23] ; (2) les matières premières (combustibles fossiles, mais aussi minerais, minéraux non-métalliques, biomasse), qui sont liées à 55% de ces émissions [BRU 24] ; (3) les différentes activités économiques (approvisionnement en nourriture, bâtiments et infrastructures, mobilité et production d'énergie) sont liées à 78% des émissions [LAM 21]. Ces différentes analyses se superposent et la sidérurgie, par

exemple, qui est à la fois une grande consommatrice d'énergie, de matières premières et une productrice de biens divers, se retrouve dans chacune de ces trois estimations à des niveaux différents. On a parlé ici de liens, mais le langage courant des médias est de parler de responsabilité, causale, voire morale ou éthique : la sidérurgie, dit-on ainsi, est responsable de 7% des émissions anthropiques de GES. Selon la présentation que l'on choisit, on peut construire des feuilles de route de décarbonation - ou au contraire entamer des polémiques ou des attaques en règle contre tel ou tel acteur.

La question est toute autre si on se rapporte aux individus. Comment analyser leur rôle par rapport aux émissions de GES et donc au changement climatique, en termes de cause, de responsabilité, de capacité de mitigation et d'impact - y compris en termes d'affect ? Il s'agit bien sûr de s'interroger sur *le rapport entre l'individuel et le collectif*.

On peut caractériser les individus par leur mode de vie (*life style*) et donc interroger l'importance de ce paramètre sur les émissions de GES :

- Une première approche est celle de l'IEA²¹ [IEA 23, page 16], qui a posé la question de la façon suivante : la cible du zéro-net sera atteinte, par rapport au niveau d'émissions de 2020, par trois leviers, (1) des technologies mûres disponibles sur le marché, (2) des technologies immatures, *hic et nunc*, encore en développement et (3) des changements de comportement des individus. Ce dernier levier est estimé à 3 à 5% de l'ensemble.
- Dans la référence [GIR 09], la question est abordée de façon différente : sur un échantillon de 14500 foyers suisses, observés entre 2000 et 2003, les déciles de revenus inférieurs et supérieurs affichent un écart d'émissions de GES par habitant, respectivement de 17 et 5 t d'équivalent CO₂. Le lien entre émissions des foyers selon leurs revenus est donc énorme : il ne peut être question de l'ignorer. On retrouve l'analyse de B. Latour développée dans la section suivante.
- Une autre approche est celle de l'IPCC (2022) [CREU 22], qui rapporte que « les mesures liées à la consommation telles que les régimes alimentaires comportant moins de protéines animales, des villes plus compactes et plus de transports en commun peuvent réduire les émissions de GES de 70% en 2050 ».

La première approche donne la part du lion à l'énergie et n'attribue qu'une portion congrue à l'influence des individus - en définissant l'individuel de façon fermée. La seconde prend utilise une tout autre approche. Et la troisième dit presque le contraire. La conclusion est claire : comparer quantitativement influences collective et individuelle n'a pas de sens !

Pour clarifier ces questions, on retiendra l'approche de Sæde Hormio [HOR 17], qui distingue les individus en tant que (1) tels, (2) que membres d'agents collectifs (citoyens d'un Etat, employés d'une entreprise, d'un syndicat, etc.) et (3) que constituants de collectifs non-organisés (consommateurs, pollueurs, membre occasionnel d'un réseau social, etc.). Elle s'interroge sur la *responsabilité morale* de ces différents types d'acteurs vis à vis du CC et des dégâts qu'il cause : (1) a une responsabilité directe, alors que (2) et (3) n'ont que des responsabilités partagées. Ces derniers sont complices des dommages causés par le changement climatique, continue-t-elle, soit via une intention participative, soit via une quasi- intention participative, mais dans les deux cas une participation marginale.

Beaucoup de textes traitent de la responsabilité vis à vis du CC : ils reprennent les analyses précédentes, mais aussi les déconstruisent, soit dans une analyse méta-éthique, soit en mettant en doute la notion de *dette écologique* [DEL 16, LAR 19]. Le livre de Jonas, qui traite du *principe responsabilité*, est la meilleure référence philosophique sur ces questions [JON 78].

Cette responsabilité est questionnée de différentes façons dans la société civile. Les individus concernés interpellent en effet les acteurs collectifs, comme l'état ou les entreprises, pour délit de pollution ou d'inaction, via des manifestations publiques (cf. la grève étudiante et scolaire

²¹ IEA : *International Energy Agency*, Agence internationale de l'énergie en français.

hebdomadaire pour le climat, *Fridays for Future* [FRI 24]), ou le dépôt de plaintes devant un tribunal [LEM 21].

Dans un autre domaine, les individus réagissent aux questions climatiques par un pessimisme voisin d'une dépression collective, *l'éco-anxiété* ou *solastalgie* [DUP 19]. « Un phénomène nouveau est apparu, lié à deux causes aux effets théoriques identiques : l'ère atomique et la catastrophe écologique. L'extinction globale est désormais envisageable, sinon assurée, en sorte qu'il y a désormais un horizon apocalyptique crédible, une espèce de mur infranchissable qui, au loin (.../...), clôt le temps. Voilà la nouvelle condition ontologique de notre désespoir » [DEL 19] cité par [TRU 24]. « Comment sortir de cette dépression individuelle et collective ? Tout d'abord en prenant au sérieux le désespoir. En le traversant de part en part. Notamment lorsqu'il a partie liée à la crise écologique ». Toutes celles et tous ceux qui sont affectés par l'état de la planète et particulièrement atteints par ce que l'on appelle l'éco-anxiété « témoignent d'une formidable capacité à s'ouvrir aux autres vivants et à vouloir habiter la Terre autrement », assure la philosophe Corine Pelluchon [PEL 23].

Une autre partie, elle aussi essentielle, de la dimension humaine de la décarbonation est que les mesures à mettre en œuvre pour la réaliser vont demander des changements profonds de comportement, d'attentes et d'adaptation de la part de personnes qui ne sont que des covoyageurs entraînés dans un flot qu'ils ne maîtrisent pas : des réactions de rejet à un niveau social et politique sont donc à attendre, comme l'exemple des gilets jaunes en France l'a montré [ROY 19, CLI 20].

3. Décarbonation, questions jumelles et autres voies de réflexion : la triple crise planétaire de l'ONU, le triptyque de B. Latour et l'agentivité des actants non-humains

Comme les animaux de l'apocalypse, le changement climatique ne vient pas seul : il est accompagné par *l'effondrement de la biodiversité* et par *la pollution atmosphérique* : l'ONU parle de *triple crise climatique* [UNFCC 22]. Il est donc insuffisant et incomplet de baser une analyse exclusivement sur les questions de décarbonation qu'on a traitées jusqu'ici dans cet article. Noter que les trois phénomènes sont liés depuis la conférence de Rio de 1992, où ont été créées en même temps les conventions des Nations Unies sur le changement climatique et sur la biodiversité (CCNUCC et CNUDB²²), alors que la pollution de l'air et les décès prématurés qu'elle cause étaient traitées par l'OMS²³ [OMS 24] : en outre, la Pacte Vert européen de 2019 prend en compte ces trois dimensions de la crise climatique (« Renforcer l'ambition climatique de l'UE pour 2030 et 2050, Une ambition *zéro pollution* pour un environnement sans substances toxiques et Préserver et rétablir les écosystèmes et la biodiversité »). Mais dans cet article, il n'y a pas la place pour traiter ces autres dimensions de la triple crise climatique. On l'a tenté ailleurs [BIR 20].

Dans [LAT 17], Bruno Latour reprend ce triptyque en le reformulant de façon politique et radicale. D'abord, il ne parle plus de changement climatique, mais de *nouveau régime climatique*, en entendant par là « le rapport des humains à leurs conditions matérielles d'existence », et il l'associe aux *migrations* et à *l'explosion des inégalités*. Ce triptyque permet d'expliquer à la fois le changement climatique mais aussi ses conséquences sur les peuples et les territoires qu'ils occupent et la difficulté à trouver des solutions communes du fait de la rupture de solidarité entre pauvres et nantis : exit les objectifs éthiques du développement durable, une partie de l'humanité imagine de se sauver sans se préoccuper des autres !

Pour dépasser les visions techniques, politiques ou technocratiques du monde, qui ont été évoquées jusqu'ici, il aller au-delà des disciplines STIM.

²² CCNUCC : Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques et CNUDB, Convention des Nations unies sur la diversité biologique

²³ OMS : Organisation mondiale de la santé (WHO en anglais)

Une première approche, à la mode, est de parler d'*anthropocène*, c'est-à-dire de postuler que l'action de l'homme et de sa civilisation sur terre a dorénavant une influence identique à celle des forces géologiques, au point de déterminer vers où se dirige de façon irréversible l'écosystème-terre. Ce vocabulaire a été proposé en 2000 par Crutzen et Stoermer [CRU 00, GUY 20] mais il rencontre des résistances de la part des géologues²⁴.

L'idée d'anthropocène n'apporte pourtant pas le renouvellement conceptuel que l'on recherche ici, car il insiste trop sur le rôle de l'homme en reconnaissant sa responsabilité sur le changement climatique, mais en sous-entendant qu'il a les moyens de le mitiger – ce qui est un point de vue technoptimiste. Par contre le modèle écologique du monde, qui distingue trois sphères imbriquées, la géosphère, la biosphère et l'anthroposphère, rappelle la disproportion entre les forces contrôlées par l'homme et celles qui mettent en mouvement les écosystèmes [BIR 17]. En outre, ce modèle met en avant tout ce qui échappe à l'anthroposphère et qu'on peut qualifier de non-humain. Ce qui conduirait à réexaminer le rôle de la biosphère, voire de la géosphère vis à vis de l'anthroposphère.

La *théorie de l'acteur-réseau* (ANT), formulée par Bruno Latour et ses coauteurs [LAT 99], apporte un outillage conceptuel pour avancer dans cette voie. En effet, cette approche propose de considérer des non-humains comme des actants (des acteurs) dans les grands ballets de l'univers et de la société. On n'a pas la place ici pour la développer en détail, mais on peut se référer à [BIR 23b, BIR 23c] et à toutes les références qui y sont citées. L'ANT insiste sur le fait que les actants, qu'ils soient humains ou non-humains, jouent de rôles symétriques, c'est-à-dire qu'ils *font tous preuve d'agentivité*. Dans le modèle des trois sphères, chacune d'entre elles joue un rôle tout aussi important, biosphère et géosphère autant qu'anthroposphère. Cette approche permet de mettre sur le même plan les trois dimensions du triple changement climatique, en particulier le climat et la biodiversité, qu'il faudrait considérer comme des actants. Le climat serait donc une force qui a forgé le destin de l'homme depuis la nuit des temps, même si l'homme, avec ses émissions anthropiques de GES a introduit une variante significative dans le scénario d'évolution de la planète.

Ces idées sont des pistes à explorer plus avant, des « reconnaissances à conduire, pour reprendre le langage de Baptiste Morizot, dans l'Inexploré [MOR 23]. Une abondante littérature commence d'ailleurs à le faire, depuis le point de vue de différentes disciplines non STIM. Jane Bennett, par exemple, armée de sa culture de philosophe, développe l'idée que la matière est dotée d'agentivité de différents points de vue [BEN 10]. Bernadette Bensaude-Vincent, avec le même genre de culture mais une connaissance plus STIM des matériaux, développe des thèses parallèles [BEN 22]. Baptiste Morizot lui aussi analyse le lien au vivant non-humain, animaux et plantes, avec son scalpel de philosophe, sa conscience écologique et son empathie avec Bruno Latour : il annonce la fin de la modernité et le besoin de s'interroger sur nos relations au monde, à cette nature, que nous ne comprenons plus, « le basculement dans le temps mythique, le temps au-delà du temps dans lequel se renégocient nos relations au monde ».

Conclusions

La décarbonation est un domaine de réflexion plus ancien que le mot lui-même. En se concentrant sur le cas de la sidérurgie, où l'auteur a été actif depuis plus de trente ans, on a présenté un panorama de la démarche suivie dans ce secteur économique au niveau mondial. C'est à la fois une revue des démarches entreprises issue de la littérature et un témoignage de leur évolution sur cette longue période, qui pourrait alimenter les travaux de vrais historiens dans l'avenir.

On a distingué quatre périodes: (1) les années 1990, où les sidérurgistes se sont appropriés les questions de changement climatique et ont analysé le rôle qu'ils y jouaient, c'est *la phase*

²⁴ La commission internationale de géologie s'est prononcée le 20 mars 2024 contre l'utilisation du mot *anthropocène* pour désigner l'époque dans laquelle nous nous trouvons. Il n'est pas certain, cependant, que cela suffise à faire disparaître le mot du vocabulaire ambiant !

d'appropriation ; (2) les années 2000, où ils sont passé à l'acte, en lançant plusieurs gros programmes de R&D coopératifs pour déboussoler les procédés en rupture qui seraient nécessaires pour réduire les émissions, c'est *la phase de recherche collective* ; (3) les années 2010, où la montée en TRL s'est heurtée à une crise économique, et où des activités de R&D se sont poursuivies, mais à bas bruit, c'est *la phase de procrastination* ; (4) les années 2020 et au-delà, où la marche, forcée cette fois, vers des solutions industrielles concrètes a été lancée de façon crédible, c'est *la phase de l'industrialisation et la marche vers le zéro-net*.

Trente-cinq ans pour trouver des solutions opérationnelles au changement climatique, cela peut paraître long. Ce n'est pas seulement le cas de la sidérurgie et tous les secteurs de l'économie prennent aussi beaucoup de temps. Il n'y a pas vraiment de méthode, *hic et nunc*, pour juger de cette lenteur, et ce sont les historiens qui devront traiter la question dans l'avenir.

Mais la décarbonation de toute la société implique beaucoup plus que la discussion des technologies que la sidérurgie a conduite dans son domaine : les individus, citoyens ou acteurs à différents niveaux de la société, ont un rôle important à jouer, comme d'ailleurs beaucoup le revendiquent. Le rôle respectif de l'individuel et du collectif est difficile à démêler, car il existe beaucoup de grilles de lecture de la genèse des émissions de GES et des responsabilités pour les dommages qu'elles causent. On en a amorcé une discussion.

Pour aller plus loin, il faut sortir des analyses de type STIM, donc faire appel à des approches issues des sciences humaines, comme la théorie de l'acteur-réseau (TAR), qui explique que la dynamique du changement climatique implique aussi la nature et les GES, qui font preuve d'agentivité aux côtés des humains et deviennent donc des actants dans cette transition. On a proposé des pistes et identifié des auteurs à lire pour édulcorer cette réflexion.

Faute de place, on n'a pas abordé les questions de compensation carbone [COM 22], qui rappellent celle des indulgences, qui avait déclenché le schisme protestant au 16^e siècle, ni les techniques de capture directe du CO₂ (CDC), qui sont fort controversées [DEP 24, DOO 22].

Références

- [ADE 21] *Transition(s) 2050. Choisir maintenant. Agir pour le climat*, ADEME, République française, 687 pages, novembre 2021
- [AIM 23] AIMIKHE V.J., EYANKWARE O.E., « Recent Advances in White Hydrogen Exploration and Production: A Mini Review », *Journal of Energy Research and Reviews*, vol. 13, N° 4, p. 64-79, 2023
- [BEL 09] BELLEVRAT E., MENANTEAU P., « Introducing carbon constraint in the steel sector: ULCOS scenarios and economic modeling », *La Revue de Métallurgie*, vol. 106, N°9, p. 318-324, 2009
- [BEN 10] BENNETT J., *Vibrant Matter*, Duke University Press, Durham, 2010
- [BEN 22] BENSUADE-VINCENT B., *Between Nature and Society: Biographies of Materials*, World Scientific Publishing Company, Singapore, 2022
- [BER 12] BERGER J.F., *Des climats et des hommes*, « Recherches », La Découverte, Paris, 2012
- [BIL 24] BILAL A., R. KÄNZIG D.R., « The macroeconomic impact of climate change: global vs. Local temperature », *NBER working paper series*, Working Paper 32450, 2024
- [BIR 01] BIRAT J-P., « Technological trends of the Iron and Steelmaking Industry », dans *Simpósio de Siderurgia no Século XXI*, São Paulo, 19-20 June 2001
- [BIR 02] BIRAT J-P., « The challenge of Global Warming to the Steel Industry, as seen from the standpoint of a European Steel Company », dans *POSCO Conference, Pohang*, 26-27 September 2002
- [BIR 03a] BIRAT J-P., « The challenge of Global Warming to the Steel Industry, a European viewpoint », dans *AISI CO₂ Breakthrough Program, Concept Discovery Workshop*, Cleveland, 2003
- [BIR 03b] BIRAT J-P., DANLOY G., HANROT F., HESS E., LE COQ X., « CO₂ mitigation technologies in the steel industry: a benchmarking study based on process calculations », dans *ICSTI*, Düsseldorf, 2003

- [BIR 03c] BIRAT J-P., « Global Warming, a challenge to the Steel Industry », dans *ISES'03*, Beijing, 28-30 Octobre 2003
- [BIR 03d] JP. BIRAT, F. HANROT, G. DANLOY, « CO₂ mitigation technologies in the steel industry: a benchmarking study based on process calculations », *stahl und eisen*, 123, N°9, p. 69-72, 2003
- [BIR 09] BIRAT J.-P., LORRAIN JP., DE LASSAT Y., « The cost tool », *La Revue de Métallurgie*, vol. 106, N°9, p. 337-349, 2009
- [BIR 17] BIRAT J.-P., « Musica Universalis or the Music of the Spheres », *Matériaux & Techniques*, vol. 105, 509, 2017
- [BIR 20] BIRAT J.-P., « How to tell the story of change and transition of the energy, ecological and societal systems », *Matériaux et Techniques*, vol. 108, 502, 2020
- [BIR 20] BIRAT J.-P., « Society, Materials and the Environment: the case of Steel », *Metals*, vol. 10, 331, 2020
- [BIR 21] BIRAT J-P., PATISSON F., MIRGAUX O., « Hydrogen Steelmaking, part 2: competition with other zero-carbon steelmaking solutions and geopolitical issues », *Matériaux et Techniques*, vol. 109, N°3-4, 307, 2021
- [BIR 23a] BIRAT J.-P., « Net-Zero transition: beyond the simple emphasis on hydrogen, did we miss anything? », *Matériaux & Techniques*, vol. 111, 201, 2023
- [BIR 23b] BIRAT J.-P., « Les matériaux sont socialement construits, mais ils font aussi preuve d'agentivité », *Matériaux et Techniques*, Vol. 111, N° 3, article 302, 2023
- [BIR 23c] BIRAT J.-P., « Matériaux et théorie de l'acteur-réseau, une clé pour renouveler l'analyse de cycle de vie ? », *Matériaux et Techniques*, Vol. 111, N° 3, 301, 2023
- [BIR 93] BIRAT J-P., ANTOINE M., DUBS A., GAYE H., DE LASSAT Y., NICOLLE R., ROTH J-L., « Vers une sidérurgie sans carbone ? », *Revue de Métallurgie*, vol. 90, N°3, p. 411-421, 1993
- [BIR 99] BIRAT J-P., VIZIOZ J-P., JEANNEAU M., SCHNEIDER M., DE LASSAT Y., « CO₂ emissions and the steel industry's available responses to the greenhouse effect », dans *Ironmaking & Steelmaking Conference*, Pittsburgh, 26-29 March 2000 et dans *Revue de Métallurgie-CIT*, vol. 96, N°11, p. 1203-1216, 1999
- [BOS 24] *Decarbonizing steelmaking for a net-zero future*, site internet de Boston Metal, 2024
- [BRU 24] BRUYNINCKX H., « Bend the trend, Pathways to a liveable planet as resource use spikes », dans *Global Resources Outlook 2024*, UNEP, Nairobi, 2024
- [CAM16] CAMPBELL B.M.S., *The Great Transition, Climate, Disease and Society in the Late-Medieval World*, Cambridge University Press, Cambridge, 2016
- [CLI 20] CLIFTON J., DE LA BROISE P., « The yellow vests and the communicative constitution of a protest movement », *Discourse & Communication*, N° 1–21, 2020
- [COL 24] LEIGH COLLINS, « This new technology could kill the business case for hydrogen in green steel production, Molten oxide electrolysis may prove to be a cheaper option than direct iron reduction — if start-up Boston Metal can demonstrate it works at scale », *Hydrogen Insight*, 7 mars 2024
- [COM 22] COMBE M., « Compensation carbone : quelles sont les limites du système ? », *Techniques de l'ingénieur*, actualités du 20 décembre 2022, 2022
- [COU 24] *COURSE 50 project, Japon*, CO₂ Ultimate Reduction System for Cool Earth 50 (COURSE 50) Project site internet
- [CREU 22] CREUTZIG F. ET AL., « Demand, Services and Social Aspects of Mitigation, chapter 5 in Mitigation of Climate Change », dans *Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, 2022
- [CRI 21] CRIQUI P., CRÉMEL S., POMMERET A. ET AL., *Les coûts d'abattement, Partie I, Méthodologie*, France Stratégie, Paris, 2021
- [CRU 00] CRUTZEN P.J., STOERMER E.F., « The Anthropocene », *Global Change Newsletter*, , N° 41, p. 17-18, 2000
- [DEL 16] DELORD J., « La responsabilité en crise face aux changements globaux », *Revue de métaphysique et de morale*, N° 89, p. 87-102, 2016
- [DEL 19] DELECROIX V., *Apprendre à perdre*, Rivages, Paris, 2019
- [DEM 21] DE MARÉ C., *Why both Hydrogen and Carbon are Key for Carbon Neutral Steelmaking*, Howe Memorial Lecture given on June 29 at the 2021 AISTech Conference, Nashville, 2021

- [DEP 24] DEPREZ A., LEADLEY P., DOOLEY K., WILLIAMSON P., CRAMER W. , GATTUSO JP., RANKOVIC A., CARLSON E. L., CREUTZIG F., « Sustainability limits needed for CO₂ removal - The true climate mitigation challenge is revealed by considering sustainability impact », *SCIENCE*, vol. 383, n° 6682, p. 484-486, 2024
- [DOO 22] DOOLEY K. ET AL., *The Land Gap Report*, The Land Gap organization, Melbourne, 2022
- [DUP 19] DUPONT M., « Histoire d'une notion : « Solastalgie » ou le mal du pays quand il est bouleversé, Inspiré du mot « nostalgie », ce néologisme inventé en 2003 par le philosophe australien Glenn Albrecht correspond à « l'expérience d'un changement environnemental vécu négativement » », *Le Monde* du 27 mars 2019, 2019
- [ELE 24] *Green Iron for Green Steel*, site internet de Electra, 2024
- [EU 24a] *Le pacte vert pour l'Europe - Notre ambition : être le premier continent neutre pour le climat*, Commission européenne, publié sur le site internet de la Commission, mai 2024
- [EUR 19] *Low-Carbon Roadmap-Pathways to a CO₂-neutral European Steel Industry*, EUROFER, Bruxelles, 2019
- [EUR 24b] *Recommendations for 2040 targets to reach climate neutrality by 2050*, Commission européenne, publié sur le site internet de la Commission le 6 février 2024
- [FEI 14] A. FEITERNA, A.M. ZAGARIA, C. FEILMAYR, O. ANSSEAU, A. HIRSCH, D. SERT, A. BODEN, C. ZEILSTRA, J.-P. SIMOES, M. PET-TERSSON, A. BABICH, M. GRANT, J. VAN DER STEL, A. LIN, L. SUNDQVIST, J. LÖVGREN, S. BORN, B.-E. SKÖLD, R. SCHOTT, W. KÜTT-NER, T. BÜRGLE, N. EDBERG, G. LOUWERSE, A. DELEBECQUE, J. ADAM, P. DIEZ-BREA, O. KERKKONEN, U. JANHSEN, M. HATTINK, M. SIHVONEN, N. EKLUND, *ULCOS top gas recycling blast furnace process (ULCOS TGRBF), Final report*, EUR 26414, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2014
- [FOR 23] *Fortescue breakthrough in making green iron matches GFG Alliance*, AU Manufacturing, 24 mars 2023
- [FOU 14] FOUCART S., *La Fabrique du mensonge. Comment les industriels manipulent la science et nous mettent en danger*, Folio Actuel, Paris, 2014
- [FRI 24] voir le site internet Friday for Future
- [GIR 09] GIROD, B., DE HAAN, P., « GHG reduction potential of changes in consumption patterns and higher quality levels: Evidence from Swiss household consumption survey », *Energy Policy*, 37(12), 5650–5661, 2009
- [GUI 23] GUILLEMETTE Y., CHÂTEAU J., *Long-term scenarios: incorporating the energy transition*, OECD economic policy paper, No. 33, 2023
- [GUY 20] GUYOT-TÉPHANY J., « Anthropocène, histoire du concept, dans Dictionnaire critique de l'Anthropocène », p. 57-61, CNRS Editions, 2020, 928 pages
- [HOR 17] HORMIO S., *Marginal participation, complicity, and agnotology: What climate change can teach us about individual and collective responsibility*, Academic dissertation, 16 December 2017, University of Helsinki Faculty of Social Sciences, 2017
- [IEA 19] *Renewable Energy for Industry and Fuels Workshop*, 可再生能源在工业和燃料中的应用国际研讨会, co-organisé avec l'IEA, 22-23 January 2019, Beijing
- [IEA 21] *Net Zero by 2050, A Roadmap for the Global Energy Sector*, IEA, Paris, 2021
- [IEA 23] *Global Hydrogen Review 2023*, IEA, Paris, 2023
- [IISI 93] « Carbon dioxide and the steel industry », dans *Committee on environmental affairs and committee on technology*, IISI, Brussels, 1993
- [IPCC 18] *Global warming of 1.5°C., dans special report 15, IPCC, Genève, 2018*
- [IPCC 23] IPCC, *Sixth Assessment Report*, IPCC, Genève, 2023
- [IPCC 95] IPCC, *Second Assessment, Climate Change 1995, A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC, Genève, 1995
- [JOH 23] *ArcelorMittal et John Cockerill annoncent la création de la première usine d'électrolyse du fer à basse température à l'échelle industrielle*, communiqué de presse de John Cockerill, 14 juin 2023
- [JON 78] JONAS H., *Das Prinzip Verantwortung*, 1979, trad.fr. *Le principe responsabilité*, Éditions du Cerf, Paris, 1991
- [JOU 19] JOUZEL J., *Climats passés, climats futurs*, Les grandes voix de la recherche, De vive voix, CNRS Éditions, Paris, 2019

- [KER 23] KERAMIDAS K., *Trajectoires pour la décarbonisation de l'hydrogène, de l'acier et du ciment : une approche de modélisation intégrant demande et production, Pathways for the decarbonisation of hydrogen, steel and cement: a modelling-based approach integrating demand and production*, thèse soutenue le 15/12/2023 à Grenoble, université Grenoble-Alpes, 2023
- [KNO 09] KNOP K., HALLIN M., BURSTRÖM E., « ULCORED SP 12 - Concept for minimized CO₂ emission », *Revue de Métallurgie*, vol. 106, N°10, p. 419-421, 2009
- [LAM 21] LAMB W.F. ET AL. (22 personnes), « A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2018 », *Environ. Res. Lett.*, 16 073005, 2021
- [LAR 09] *La Revue de Métallurgie*, 22 articles, vol. 106, N°9 et 10, 2009
- [LAR 19] LARRÈRE C., « Changement climatique : et si nous parlions de responsabilité ? », *Revue juridique de l'environnement*, HS18 (n° spécial), p. 159-173, 2019
- [LAT 17] LATOUR B., *Où atterrir, comment s'orienter en politique*, La Découverte, Paris, 2017, cité dans *Bruno Latour, 75, Philosopher on the Social Basis of Scientific Facts, Dies*, The New York Times, 22 octobre 2022
- [LAT 99] LATOUR B., « On recalling ANT », *The Editorial Board of The Sociological Review*, 1999
- [LAV 16] LAVELAINE DE MAUBEUGE H., VAN DER LAAN S., HITA A., OLSEN K., SERNA M., HAARBERG G.M., FRADE J., *Iron production by electrochemical reduction of its oxide for high CO₂ mitigation (IERO)*, RFCS Final Report, EUR 28065, 2016
- [LEM 21] Voir à titre d'exemple : « La plainte accusant Castex et quatre ministres d'inaction contre le changement climatique déclarée irrecevable », *Le Monde* du 19 octobre 2021, 2021
- [LER 67] LE ROY LADURIE E., *Histoire du climat depuis l'an mil*, Essais, Flammarion, Paris, 1967
- [LEV 23] LEVASSEUR S., « L'Inflation Reduction Act américain : une loi mal nommée », OFCE Le Blog, Paris, 7 septembre 2023
- [MAR 24] MARTIN P., « More important problems to solve | IEA head criticizes German focus on green hydrogen, Fatih Birol warns that renewable H₂ will remain expensive, with only 7% of projects set to be built by 2030 décarboné », *Hydrogen Insights*, 24 January 2024
- [MEI 13] MEIJER K., DENYS M., LASAR J., BIRAT J-P., STILL G., OVERMAAT B., « ULCOS: ultra-low CO₂ steelmaking », *Ironmaking & Steelmaking*, vol., Issue 4, 2013
- [MEI 15] MEIJER K., TREADGOLD C., ZEILSTRA C., KEILMAN G., TEERHUIS C., OUWEHAND M., VAN BOGGELEN J., BORLÉE J., WAGNER D., GRISVARD C., FEILMAYR C., THALER C., LÖVGREN J., SIKSTRÖM P., DOPPLER K-G., GÜNTHER C., FEITERNA A., SKORIANZ M., TASZNER Z., HIRSCH A., SGURA A., SCHOTT R., HÖCKER Y., GOEDERT P., *HISARNA experimental campaigns B and C (HISARNA B and C)*, Final Report, EUR 27515, 2015
- [MIS 22] *MAKING NET-ZERO STEEL POSSIBLE, An industry-backed, 1.5°C-aligned transition strategy*, Mission Possible – Sectoral Focus Steel, 2022
- [MOO 96] MOOMAW W.R., *Industrial emissions of greenhouse gases*, *Energy Policy*, Vol. 24, N°10/11, p. 951-968. 1996
- [MOR 23] MORIZOT B., *L'inexploré*, Éditions Wildproject, Marseille, 2023
- [NAT 23] NATHAN G., « New opportunities for the circular economy arising from emerging high temperature net-zero processing pathways », dans *8th International Slag Valorization Symposium*, Mechelen, Belgium, 18-20 avril 2023
- [OHN 94a] OHNO Y., « Countermeasures of carbon dioxide emission in steel industry », dans *Proceedings of International Conference on Eco-Balance*, Tsukuba, The society of non-traditional technology, p. 108, 1994
- [OHN 94b] OHNO Y., KOMIYAMA H., « Control of CO₂ emissions in ironmaking process », dans *Proceedings of the 1st international congress of science and technology of ironmaking*, Sendai, ISIJ, p. 684, 1994
- [OMS 24] *Pollution atmosphérique*, site internet de l'OMS
- [ORE 04] ORESKES N., « The Scientific Consensus on Climate Change », *SCIENCE*, 3 December 2004, vol. 306, p. 1686, 2004
- [ORE 15] ORESKES N., CONWAY E.M., *Merchants of doubt: how a handful of scientists obscured the truth on issues from tobacco smoke to global warming*, Bloomsbury Press, Science, New York, 2015
- [PAR 24] RACHEL PARKES, « Green hydrogen is too expensive to use in our EU steel mills, even though we've secured billions in subsidies' Head of ArcelorMittal's European arm says », *Hydrogen Insight*, 1 February 2024
- [PEC 24] PÉCOUT A., « La fin de l'euphorie pour la filière de l'hydrogène décarboné », *Le Monde*, 22 avril 2024

- [PEI 20] PEI M., PETÄJÄNIEMI M., REGNELL A., ET AL., « Toward a fossil free future with HYBRIT: development of iron and steelmaking technology in Sweden and Finland décarboné », *Metals* vol. 10, 972, 2020
- [PEL 23] PELLUCHON C., *L'Espérance, ou la traversée de l'impossible*, Rivages, Paris, 2023.
- [PIC 01] *Greenhouse Gases in the Metallurgical Industries: Policies, Abatement and Treatment*, editor C.A. Pickles, COM 2001, August 2001, Toronto, MetSoc
- [PIR 23] PIRONON J., DI DONATO P., *How we chanced upon what may be the world's largest white hydrogen deposit*, The Conversation, 7 septembre 2023
- [RF 20] *Stratégie nationale bas carbone, La transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone*, mars 2020, NOR : TRER2010109P, République française, ministère de la transition écologique et solidaire
- [RF 23] *Consultation sur la nouvelle stratégie française pour le déploiement de l'hydrogène décarboné*, Ministère de la transition écologique et Ministère de la transition, énergétique, France, République française, 2023
- [RF 23] *Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné en France : dans le cadre de France 2030, le Gouvernement lance une stratégie d'accélération "Hydrogène"*, République française, 2023
- [RF 24] *Stratégie française sur l'énergie et le climat*, République française, 2024
- [RIF 02] RIFKIN J., *The hydrogen economy: the creation of the worldwide energy web and the redistribution of power on Earth*, Tarcherperigree, New York, 2002
- [ROY 19] ROYALL F., « The Gilets Jaunes protests: mobilization without third-party support », *Modern & Contemporary France*, 2019
- [RTE 22] RTE, *Futurs énergétiques 2050*, Paris, 2022
- [RYN 07] RYNIKIEWICZ C., *Contrainte d'environnement global et changement technique induit : vers des trajectoires d'innovations radicales dans la sidérurgie*, thèse soutenue à l'Université Pierre Mendès France, Grenoble, 2007
- [SAN 13] SANTOS S., *Iron & Steel Study, Techno-economics CCS Study*, IEAGHG, 2013
- [TMS 99] *Seminar on Abatement of Greenhouse Gas Emissions in the Metallurgical & Materials Process Industry*, dans *TMS Annual Meeting*, San Diego, 28 February - 3 March, 1999
- [TRU 24] TRUONG N., « Que nous est-il permis d'espérer ? », *Le Monde* du 6 janvier 2024, 2024
- [UN 92] *United Nations Conference on Environment and Development, Rio, 3-14 June 1992*, United Nations, New York, 1992
- [UNFCC 15] *Nations unies, Action Climat, L'Accord de Paris*, UNFCC, New York, 2015
- [UNFCC 22] « What is the triple planetary crisis », site internet de l'UNFCC, 13 avril 2022
- [UNFCC 92] *United Nations Framework Convention on Climate Change*, UNFCC, New York, 1992
- [UNFCC 97] *Protocole de Kyoto à la convention-cadre des nations unies sur les changements climatiques*, UNFCC, New York, 1997
- [UNI 10] *UNIDO, Global Technology roadmap*, archivé par the CCS Institute, 2010
- [VIE 20] « 1.000 milliards d'euros pour le Pacte vert européen », *Vie Publique*, 24 janvier 2020
- [WSA 23] « *China Baowu: Development and application of low-carbon metallurgical technology based on HyCROF* », communiqué de presse de Worldsteel, 2023
- [WWF 22] *Where did all the money go? How EU member states spent their ETS revenues - and why tighter rules are needed*, document WWF, November 2022