

30 janvier 2024

**DÈS AUJOURD'HUI !**  
**VERS DE FAIBLES ÉMISSIONS**  
**DE GAZ À EFFET DE SERRE**  
**DANS SEPT SECTEURS D'ACTIVITÉ**

Introduction	2
Messages transverses	2
Chapitre 1 : Système alimentaire et agricole (SAA)	4
Chapitre 2 : Bâtiments et villes intelligentes	5
Chapitre 3 : Pétrole et gaz	6
Chapitre 4 : Produits chimiques	7
Chapitre 5 : Ciment	8
Chapitre 6 : Fer et acier	9
Chapitre 7 : Technologies de l'information et des communications (TIC)	10
Conclusions	11

## Introduction

Cette note passe en revue les technologies existantes pouvant être immédiatement utilisées pour réduire dès maintenant les émissions de gaz à effet de serre (GES) dans sept secteurs clés : alimentation et agriculture, bâtiments et villes intelligentes, pétrole et gaz, produits chimiques, ciment, fer et acier, technologies de l'information et des communications<sup>1</sup>. En 2019, les sept secteurs sélectionnés représentaient quelque 70 % des émissions de CO<sub>2</sub> de l'industrie et environ 60 % des émissions mondiales de méthane.

Cette note vise donc à apporter des éclaircissements sur deux questions complexes : qu'est-il possible de faire dès maintenant avec les technologies existantes ? Où sont les freins dans les différents secteurs et comment les surmonter ? Les réponses à ces questions sont de nature à éclairer l'action publique pour la mutation énergétique à court terme, mais aussi en préparation de l'avenir, en particulier dans le cadre de France 2030.

Cette note comporte, outre des messages transverses et des recommandations sectorielles, des exemples issus de différents pays, l'ensemble ne prétendant pas à l'exhaustivité.

## Messages transverses

1. L'électricité bas-carbone tient un rôle central dans la réalisation des réductions d'émissions dans les secteurs considérés. L'électricité et la chaleur sont définies ici comme bas-carbone si elles sont produites avec un contenu moyen en CO<sub>2</sub> inférieur à 50 g par kWh sur le cycle de vie de l'installation. L'électricité bas-carbone est donc principalement<sup>2</sup> produite par les énergies hydraulique, solaire, éolienne et nucléaire.

Dans les secteurs étudiés, la réduction des émissions de GES, en particulier du CO<sub>2</sub>, passe dans de nombreux cas par l'électrification de tout ou partie de l'énergie utilisée, que ce soit pour le chauffage, la cuisson des aliments ou pour les processus industriels. Le niveau de cette réduction dépend du mix électrique, ce qui montre l'importance de décarboner la production d'électricité. Une telle approche ne doit pas négliger la chaleur bas-carbone, y compris l'utilisation thermique directe du rayonnement solaire, ni les réseaux de chaleur utilisant des sources bas-carbone (par exemple des déchets ou de la chaleur résiduelle de l'industrie).

2. Toutefois, certains processus industriels ne peuvent pas être entièrement électrifiés tels quels en raison des réactions chimiques mises en œuvre, comme la production de ciment. L'utilisation d'hydrogène — s'il est produit avec de l'électricité bas-carbone — peut alors être partie de la solution, son coût restant actuellement un problème à surmonter.
3. Dans ces cas particuliers, à défaut, une autre approche consiste à capter le CO<sub>2</sub> produit sur les sites industriels et à l'utiliser ou à le stocker sous terre (captage, utilisation et stockage du carbone, dit CCUS). Le système utilisé pour le captage doit être adapté au processus industriel en question, par

<sup>1</sup> Cette note est issue des travaux conduits par le Comité Énergie du Conseil international des académies d'ingénierie et des sciences technologiques (CAETS) et de son rapport <https://www.newcaets.org/wp-content/uploads/2023/02/CAETS-ENERGY-REPORT-2022-22-January-2023.pdf> et Annexes sur <https://www.newcaets.org/statements-reports/caets-reports/>. Certaines des conclusions peuvent également s'appliquer à d'autres secteurs tel l'aluminium. Ont contribué une soixantaine d'académiciens et des experts d'Afrique du Sud, Allemagne, Argentine, Canada, Chine, Corée, Croatie, Espagne, États-Unis, France, Hongrie, Inde, Irlande, Japon, Mexique, Nigéria, Norvège, Royaume-Uni, Serbie, Suède, Suisse, Uruguay.

<sup>2</sup> L'utilisation de la biomasse fait l'objet d'avis divergents au sein du Comité Énergie, en raison des émissions qu'elle produit lorsqu'elle est brûlée. Une autre question, controversée et sortant du cadre de ce rapport, est celle de ses autres utilisations possibles pour l'alimentation, le biocarburant et la concurrence qui en découle pour l'utilisation des terres.

exemple le chauffage des matériaux nécessaires à la préparation du ciment, etc. De nombreux projets de démonstration et projets pilotes sont en cours ou prévus dans le monde entier. Les solutions pour l'utilisation du CO<sub>2</sub> semblent très limitées, alors que pour le captage, le transport et le stockage elles sont déjà techniquement avancées. Si l'utilisation du captage et du stockage du carbone sera certainement nécessaire pour atteindre le niveau «net zéro» d'ici le milieu du siècle, les coûts supplémentaires et les aspects sociétaux du CCS sont de réelles préoccupations.

4. Améliorer l'efficacité énergétique consiste à utiliser moins d'énergie pour chauffer, déplacer, déformer, casser, transformer, etc. Cela est presque toujours bénéfique, bien que l'effet rebond puisse réduire ou annihiler la réduction des GES théoriquement obtenue. Par ailleurs, améliorer l'efficacité d'un système utilisant des combustibles fossiles peut s'avérer plus coûteux et entraîner des émissions plus importantes que le remplacement de ce système par un autre utilisant une électricité bas-carbone. En d'autres termes, donner la priorité à l'efficacité énergétique n'est pas synonyme de donner la priorité à la baisse des émissions : c'est le cas en particulier pour le bâtiment.
5. Le choix des indicateurs est clé dans la définition des politiques énergétiques, car fixer des objectifs en énergie primaire, en consommation finale ou en émissions de CO<sub>2</sub> n'est pas synonyme.
6. Un autre message clé est la nécessité d'adopter autant que possible des politiques globales et cohérentes pour baisser les émissions à moindre coût. Par exemple, promouvoir dans les habitations, le remplacement des chaudières à gaz par des pompes à chaleur électriques nécessite : (a) que l'industrie assure la disponibilité des pompes à chaleur nécessaires, en quantité suffisante et à des coûts acceptables; (b) qu'il y ait les installateurs qualifiés et disponibles, (c) que soit mis en place un modèle économique (comprenant les coûts d'acquisition et d'exploitation, les aides à l'investissement possibles, etc.) lié à la tarification de l'électricité, (d) des règlements de construction adaptés, (e) des campagnes d'information appropriées. Pour une politique concernant les nouveaux logements, il est également nécessaire de prévoir des formations pour les architectes, les ingénieurs, les responsables de la conception et les promoteurs immobiliers. De tels programmes globaux, impliquant des millions d'acteurs et de parties prenantes, nécessitent des politiques claires, compréhensibles et stables pour une mise en œuvre généralisée.
7. La maîtrise des temporalités est essentielle pour développer des politiques réalistes : la durée de production et de vie des divers systèmes technologiques varie considérablement. Ainsi, le délai habituel pour changer un téléphone portable est d'environ 2 à 3 ans, alors qu'il peut être de 15 ans pour une chaudière, de 30 à 100 ans ou plus pour un bâtiment, et de 20 à 50 ans pour de nombreuses usines. À cet égard, l'analyse complète des cycles de vie (ACV) permet d'évaluer des questions telles que celle de savoir si le fait de prolonger la durée de vie d'un appareil existant ou de le remplacer dès que possible par un autre qui émet moins peut réduire les émissions totales.
8. Dans tous les secteurs et tous les pays, l'éducation et la formation apparaissent comme clé et nécessitent des évolutions profondes des institutions d'enseignement initial et continu. Développer les compétences de ceux qui travaillent déjà et les accompagner dans la transition est un impératif pour la réussir.
9. L'appropriation des solutions par les citoyens est évidemment clé. Ce n'est pas l'objet de ce rapport, mais c'est essentiel pour qu'ils puissent accepter les transformations, en être acteurs, voire moteurs.
10. En plus de l'électrification bas-carbone, trois leviers de natures différentes pour la transformation sont à ne pas oublier : les pompes à chaleur, l'hydrogène bas-carbone, les analyses de cycles de vie.

## Chapitre 1 : Système alimentaire et agricole (SAA)

Au fil des siècles, spécialement les deux derniers, le SAA a subi de profondes transformations pour nourrir la population mondiale, ce qui a généré des préoccupations majeures en matière de durabilité. Celles-ci appellent de nouvelles transformations profondes prenant en compte le changement climatique et les guerres. Le SAA est responsable de 25 à 33% des émissions de GES (selon la définition retenue). La réduction de ses émissions est donc un élément essentiel de sa transformation, mais ce n'est pas le seul ; elle implique des compromis entre des objectifs de durabilité divergents à travers les différentes échelles de temps et d'espace, mais aussi entre des intérêts divergents. Elle appelle à renforcer la capacité d'aboutir à ces compromis par des preuves et des mécanismes d'arbitrage.

La science et la technologie ont joué un rôle clé dans les transformations passées des systèmes alimentaires et continueront à le faire. Pourtant, l'innovation ne contribue pas toujours au développement durable ! Dans le même temps, dans de nombreux pays, des voix s'élèvent, en particulier dans la jeune génération, pour réclamer une réduction significative de la consommation d'aliments d'origine animale, pour une alimentation plus saine avec moins de viande.

À cela s'ajoutent de nombreuses controverses sur la mobilisation des technologies de rupture (telles que les aliments protéinés alternatifs, les aliments imprimés en 3D, l'aquaculture, les serres avancées ainsi que les fermes verticales). Ces développements vont en effet d'une part à l'encontre de pratiques locales traditionnelles bien ancrées et de longue date et, d'autre part, provoquent des préoccupations relatives à la concentration croissante dans le secteur agroalimentaire industrialisé.

Des pistes existent pour réduire les émissions de deux importants GES produits par le SAA : le méthane (CH<sub>4</sub>) provenant du bétail ruminant et de la culture du riz, et le CO<sub>2</sub> tout au long de la chaîne d'approvisionnement, de la ferme à la table, notamment grâce à l'efficacité énergétique et à l'électrification. Ainsi, l'agriculture « numérique », qui fait appel à des capteurs avancés, à l'intelligence artificielle, à l'intégration des données, au big data, aux drones, aux robots et aux technologies de suivi semble être une piste fertile.

Le rôle potentiel de la biotechnologie et de la nanotechnologie pour réduire les émissions de GES du SAA, la colocalisation de l'énergie solaire photovoltaïque (« agrivoltaïque ») et des éoliennes avec les activités agricoles, ainsi que l'utilisation de la biomasse pour la production d'énergie, sont également importants tout en recommandant de n'utiliser la bioénergie que dans des situations où elle n'entre pas en concurrence avec la production alimentaire.

Il conviendra de développer davantage de travaux non seulement au développement des technologies, mais plus particulièrement à leur adaptabilité aux contextes locaux afin d'obtenir de réelles améliorations et d'en évaluer l'empreinte effective à intégrer dans des bases de données publiques.

Parmi les éléments et exemples : les différentes sources d'émissions du SAA, développer de nouvelles ressources par la technologie, améliorer l'utilisation de ressources existantes par la technologie, optimiser les ressources par la technologie, mettre en œuvre des technologies génériques (robotique, etc.)

## Chapitre 2 : Bâtiments et villes intelligentes

Ce secteur est fortement émetteur (quelque 37 % des émissions mondiales en 2019) en incluant les émissions sur l'ensemble du cycle de vie des bâtiments. Les conditions locales (climat, matériaux) et le comportement des occupants sont très importants. La décarbonation concerne les bâtiments résidentiels et non résidentiels, la construction et l'exploitation de nouveaux bâtiments comme l'exploitation des bâtiments existants. En raison de leur durée de vie, la modernisation des bâtiments existants joue un rôle majeur. Outre la qualité énergétique de l'enveloppe du bâtiment et des équipements utilisés, le comportement des occupants a une influence majeure sur la consommation d'énergie.

Pour concevoir des bâtiments à faible émission de carbone et à faible consommation d'énergie, il est recommandé d'utiliser un « principe de hiérarchie énergétique » : premièrement, choisir des matériaux et des sources d'énergie à faible émission de carbone et, deuxièmement, utiliser ces sources avec les équipements les plus efficaces (en tenant compte de leur coût). Pour appliquer ce principe à la rénovation afin de réduire les émissions de la manière la plus abordable, il faut évaluer le bon niveau d'isolation et mettre en place un système de chauffage à faible émission de carbone, par exemple une pompe à chaleur.

Des panneaux photovoltaïques (PV) ou solaires thermiques sont de plus en plus souvent installés. Pour les bâtiments où l'autogénération d'énergie n'est pas une option ou est insuffisante, comme cela est généralement le cas dans les villes, l'électrification à l'aide d'électricité bas-carbone provenant du réseau reste la solution de décarbonation la plus efficace. Cela s'applique en particulier aux quatre besoins énergétiques de base : le chauffage, le rafraîchissement, la production d'eau chaude et la cuisson. Pour chacun d'entre eux, le chapitre recommande des solutions.

Deux points importants doivent être mentionnés ici : (a) l'importance croissante du rafraîchissement, puisque plus de la moitié de la population mondiale vit dans des pays qui ont besoin d'un rafraîchissement des locaux et que le changement climatique accroît les besoins de rafraîchissement ; (b) aujourd'hui, dans de nombreux pays émergents, la combustion de la biomasse dans des fourneaux de cuisson familiaux peu efficaces et dangereux est encore utilisée et doit être remplacée par l'utilisation d'appareils plus efficaces.

L'électrification croissante soulève la question de la flexibilité de la consommation d'électricité, qui fait référence à sa capacité à être interruptible et ajustable, par exemple en déplaçant l'utilisation d'un chauffe-eau ou d'une machine à laver vers des moments où il y a beaucoup d'électricité (ou bon marché), par exemple au milieu d'une journée ensoleillée où le photovoltaïque produit beaucoup d'électricité. La flexibilité de la consommation permise par la croissance du nombre d'équipements électriques facilite l'intégration des énergies renouvelables intermittentes. Le rôle de l'hydrogène devrait se limiter à des sites isolés ou aux solutions de secours pour les hôpitaux (piles à combustible).

Un autre aspect est la décarbonation des réseaux de chauffage urbain et aussi, et de plus en plus, de rafraîchissement urbain. La difficulté permanente de mettre en adéquation le besoin de chaleur et sa production suggère de développer le stockage intersaisonnier de la chaleur, une option peu utilisée aujourd'hui.

Parmi les éléments et exemples : la rénovation de l'existant en Allemagne et en Chine, les compagnies de service en Inde et en Afrique du Sud pour rénover ; la politique de climatisation en Chine et en Inde ; l'eau chaude en Afrique du Sud ; vers la cuisson propre au Nigéria ; immeubles bas-carbone en Chine ; exemple de ville « intelligente » en Inde ; politique des bâtiments neufs en Chine ; politique de décarbonation des bâtiments en Afrique du Sud ; formation d'ingénieurs-architectes en Allemagne et en Inde ; une décarbonation de bidonvilles à Buenos-Aires, la décarbonation de deux réseaux de chaleur en Chine.

## Chapitre 3 : Pétrole et gaz

Compte tenu du rôle encore dominant du pétrole et du gaz dans la fourniture d'énergie primaire (57 %), mais aussi dans l'industrie chimique, il est important d'examiner si l'industrie pétrolière et gazière peut réduire ses propres émissions de GES dans toutes les phases de production, de transport, de raffinage et de distribution du pétrole et du gaz. En 2019, alors que 76 % des émissions provenant du pétrole et du gaz étaient produites par leur consommation par les utilisateurs finaux, 24 % résultaient des processus de l'industrie pétrolière et gazière. Ces 24 % représentaient environ 8 % des émissions mondiales de GES, soit environ 2,65 GtCO<sub>2</sub> ainsi que l'équivalent de 2,5 GtCO<sub>2</sub> provenant du méthane.

Les investissements cumulés<sup>3</sup> actuels dans l'industrie pétrolière et gazière s'élèvent à des centaines de milliards de dollars et les installations ont une durée de vie de plusieurs décennies. La plupart de ces installations sont optimisées pour les types de pétrole et de gaz qu'elles reçoivent et les produits que leurs marchés exigent. Il est donc difficile d'appliquer des changements majeurs à l'échelle mondiale et à un rythme rapide.

Il est recommandé de mettre la priorité sur la réduction du brûlage à la torche du méthane et des émissions fugitives de méthane dans toutes les phases de la production, du transport et du raffinage/traitement du pétrole et du gaz : en effet, des technologies permettant de réduire les émissions/fuites de méthane sont disponibles et beaucoup sont déjà rentables. L'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) estime que 45 % des émissions peuvent être réduites sans frais au prix du gaz de 2021.

L'industrie pétrolière et gazière utilise le pétrole et le gaz comme sources d'énergie pour ses propres besoins, notamment pour produire de la chaleur. Il s'agit donc d'explorer une électrification accrue de l'industrie pétrolière et gazière pour remplacer le chauffage et le refroidissement des procédés. Pour ce faire, les exploitants d'installations pétrolières et gazières devraient passer à des options électriques lorsque cela est possible et lorsqu'elles sont susceptibles d'avoir un impact positif sur la réduction des émissions de GES. En outre, il est suggéré d'explorer des mesures supplémentaires pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> des secteurs de l'exploration et de la production ainsi que la mise en œuvre d'améliorations de l'efficacité et de nouvelles technologies.

Deux autres points importants : (1) la nécessité de mettre davantage l'accent sur l'utilisation et l'amélioration des analyses du cycle de vie (ACV) dans les industries pétrolières et gazières, (2) l'évaluation et le développement continu du potentiel des possibilités de CCUS pour les opérations pétrolières et gazières.

Parmi les éléments et exemples : les différents types d'émissions; liste des outils de réduction des émissions; détection et méthodes d'abattement des émissions du méthane; comparaison des situations dans différents pays; répartitions actuelle et future des utilisations du pétrole et du gaz naturel; situation de l'Argentine (dans l'annexe).

<sup>3</sup> Un peu plus de 400 milliards de dollars en 2022, voir : <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/change-in-upstream-oil-and-natural-gas-investment-2019-2022>

## Chapitre 4 : Produits chimiques

La plupart des milliers de produits chimiques existants sont fabriqués à partir de produits chimiques « primaires » obtenus en utilisant (et non en brûlant) des matières premières produites par l'industrie pétrolière et gazière. Le chapitre se concentre sur l'analyse des émissions de GES résultant de la production des quatre produits primaires les plus importants en matière de tonnage (éthylène, propylène, ammoniac et méthanol), tout en reconnaissant que des émissions supplémentaires résultent de la production de leurs produits dérivés.

La production de ces produits chimiques entraînant des besoins énergétiques particulièrement élevés, le secteur de la chimie était responsable en 2019 de 15% des émissions totales de GES (8,4 GtCO<sub>2</sub>) de l'ensemble du secteur industriel. Avec 5% de ce total, l'ammoniac est le plus grand contributeur de tous les produits chimiques. Au cours des 20 à 30 prochaines années, la croissance économique et démographique continuera à tirer la demande vers le haut, comme au cours des 20 dernières années : il est donc impératif de réduire les émissions de GES dans le secteur. Il est important de garder à l'esprit que ces émissions peuvent résulter non seulement de la source d'énergie utilisée pour les processus de production, mais aussi des réactions chimiques elles-mêmes.

En tant qu'industrie complexe, intégrée, à forte intensité de capital et de compétences, disposant de nombreux actifs de longue durée, le secteur chimique est confronté à d'énormes défis dans la transition vers le zéro carbone. Il n'y a pas de solution unique ou simple disponible aujourd'hui pour décarboniser l'industrie chimique, mais il existe néanmoins des pistes importantes qui peuvent guider immédiatement l'industrie vers ses objectifs de décarbonation. Parmi ces pistes, la réutilisation des produits (principalement les plastiques), le recyclage d'autres matériaux à base de carbone et la réduction de la consommation spécifique des engrais azotés en augmentant l'efficacité de leur application restent à explorer et/ou utiliser davantage.

D'autres pistes sont l'électrification du chauffage des procédés au moyen d'électricité bas-carbone, en particulier dans le vapocraquage, pour remplacer le charbon et le gaz naturel, qui sont actuellement utilisés. En outre, il est recommandé de modifier les procédés chimiques afin de réduire sensiblement, voire totalement, les émissions, en augmentant, par exemple, l'utilisation d'éthane dans la production d'éthylène, ou en remplaçant le charbon par du gaz naturel dans la production de méthanol. En ce qui concerne la synthèse de l'ammoniac, qui utilise de l'hydrogène, la recommandation est de développer à grande échelle la production d'hydrogène bas-carbone par électrolyse en utilisant de l'électricité bas-carbone ; en revanche, si l'hydrogène est produit à partir de combustibles fossiles, ce doit être avec le CCUS. Le CCUS sera nécessaire non seulement pour la production d'hydrogène, mais aussi pour d'autres installations de production de produits chimiques afin d'atteindre les objectifs de décarbonation.

En raison des nombreux liens de l'industrie chimique avec l'ensemble de l'économie, de ses matières premières à ses produits, il est recommandé d'utiliser systématiquement l'analyse du cycle de vie des produits chimiques au niveau mondial.

Parmi les éléments et exemples : chaîne de valeur de l'industrie chimique, voies de décarbonation pour l'éthylène, le propylène, l'ammoniac, l'éthanol, exemple de la Suède (dans l'annexe du rapport).

## Chapitre 5 : Ciment

Dans le monde entier, le ciment est largement utilisé dans le secteur de la construction (bâtiments, ponts, barrages, etc.). Sa production est un procédé à forte intensité énergétique et de loin la phase la plus émettrice de CO<sub>2</sub> dans les procédés qui vont des matières premières pour le ciment aux matériaux de construction prêts à l'emploi, comme le béton.

La croissance du PIB et celle de la demande de ciment sont liées. La croissance de la demande restera principalement tirée par les pays en développement, notamment pour les infrastructures et le bâtiment. En 2019, l'industrie mondiale du ciment représentait environ 7% des émissions mondiales de carbone (quelque 2,5 GtCO<sub>2</sub>). Il s'agit donc de l'un des plus grands secteurs émetteurs de CO<sub>2</sub>. Sa décarbonation est donc cruciale.

Le ciment est un matériau polyvalent et durable, produit principalement à partir de ressources locales facilement disponibles, telles que la pierre à chaux, l'argile et la marne. Environ 50% des émissions de CO<sub>2</sub> provenant de la production de ciment sont dues à la calcination, la réaction chimique la plus énergivore du processus de production ; elle libère le CO<sub>2</sub> du calcaire et produit le « clinker », base du ciment. Environ 40% des émissions sont dues à la combustion des combustibles fossiles utilisés pour atteindre les 1 450 °C nécessaires à la calcination.

Dans le monde, le charbon représente 70% des émissions des combustibles fossiles utilisés pour la calcination, qui est le plus consommateur d'énergie. Des combustibles alternatifs tels que les déchets industriels contenant du carbone ou les biocarburants peuvent être utilisés et sont décrits. L'utilisation d'hydrogène bas-carbone, s'il est disponible, est également préconisée. En outre, il est recommandé d'accroître l'efficacité énergétique et de procéder à l'électrification lorsque cela est possible, ainsi que d'augmenter la récupération de chaleur, démarche connue qui reste encore trop peu utilisée.

La modification de la composition des matières premières de base, en remplaçant par exemple une partie du calcaire par des cendres volantes, etc., peut réduire les émissions de CO<sub>2</sub>. Cela peut modifier les propriétés du ciment obtenu, positivement ou négativement, et permettre le développement de nouveaux types de ciment pour différents usages. Néanmoins, cela ne résoudra pas entièrement le problème des émissions de CO<sub>2</sub>. C'est pourquoi le CCUS sera nécessaire, bien que cette technologie ne soit pas encore totalement éprouvée pour le ciment et qu'elle en augmente le coût.

Les solutions et politiques existantes pour la production de ciment dans différents pays sont décrites et complétées par plusieurs études de cas. Des politiques publiques claires, stables et globales, ainsi que des mesures incitatives favorisant la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, sont recommandées. Des solutions matures existent et peuvent d'ores et déjà être déployées. Une coopération étroite entre l'industrie du ciment et les autres industries peut permettre de tirer profit de l'utilisation de différents déchets, d'éléments non recyclés, de scories granulées provenant des hauts fourneaux d'acier, etc. en tant que substituts de combustibles ou de matières premières alternatives.

Il est important de souligner l'importance des efforts de R&D pour réduire davantage l'empreinte GES de la fabrication du ciment et encourager les démonstrations industrielles associées. La recherche sur le CCUS et la minéralisation du CO<sub>2</sub> dans certaines formations rocheuses, afin d'obtenir des moyens abordables pour parvenir à une décarbonation profonde, est également indispensable.

Parmi les éléments et exemples : les consommations d'énergie du processus de production, différentes mesures pour réduire la consommation d'énergie et décarboner, politiques de décarbonation dans plusieurs pays, études de cas en Inde, en Norvège, en Belgique, au Canada et en Chine.

## Chapitre 6 : Fer et acier

La demande d'acier devrait augmenter à mesure que la population mondiale s'accroît et que les pays cherchent à améliorer leur niveau de vie : l'acier est un matériau nécessaire et difficile à remplacer dans un large éventail d'applications.

La production d'acier, c'est-à-dire du fer ne contenant pas plus de 2 % de carbone et quelques additifs pour ajuster ses propriétés, est par nature gourmande en énergie. La première étape du processus, qui nécessite le plus d'énergie, consiste à obtenir du fer à partir du minerai de fer, la seconde à transformer le fer en acier. Lorsqu'on utilise de la ferraille comme matière première, la première étape n'est pas nécessaire : cela montre le bien-fondé du recyclage!

Le charbon est la source d'énergie dominante dans la filière de production d'acier la plus utilisée, la filière « BF-BOF » (haut fourneau/convertisseur basique à oxygène), qui, en 2020, a fourni 73 % de la production mondiale d'acier. Une deuxième voie utilisée est la voie « EAF » (four à arc électrique), qui utilise à la fois des ferrailles et/ou du fer réduit directement (DRI) en utilisant du gaz. La filière EAF, qui utilise l'électricité, représente 26 % de la production mondiale d'acier. En 2020, les émissions de l'industrie sidérurgique étaient de l'ordre de 2,6 Gt de CO<sub>2</sub>, soit environ 8 % des émissions anthropiques mondiales de CO<sub>2</sub>.

Compte tenu de l'urgence de la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et de la durée de vie de nombreuses installations existantes, il est recommandé de mettre en œuvre toutes les technologies possibles et économiquement abordables, même marginales, de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> pour les aciéries existantes en y augmentant l'efficacité énergétique, l'utilisation des énergies résiduelles, l'électrification partielle pour le chauffage, l'utilisation de la biomasse, un meilleur contrôle, etc.

Pour éliminer le CO<sub>2</sub> du processus, bien qu'il n'existe pas de scénario final unique, la réduction directe du minerai de fer (DRI) à l'aide d'hydrogène bas-carbone, suivie du four à arc électrique (EAF), semble être l'une des options les plus viables et une solution à long terme pour parvenir à une production d'acier neutre en carbone. La disponibilité et le coût de cet hydrogène et de cette électricité bas-carbone seront déterminants pour la mise en œuvre massive des procédés qui sont en cours de développement et à l'échelle pilote : leur viabilité économique sera certainement prouvée avant 2030. Plusieurs projets pilotes de différents pays et sidérurgistes sont présentés.

Il convient de mentionner que le CCS combiné à la production d'acier n'a pas encore fait ses preuves à l'échelle industrielle. Cela pourrait changer au cours de cette décennie, plusieurs projets étant à des stades différents de mise en œuvre dans différents pays.

La production d'acier « neuf » issu du recyclage nécessitant nettement moins d'énergie, l'utilisation des déchets ferreux devrait augmenter progressivement. Il est donc recommandé de continuer à développer l'utilisation de la ferraille d'acier, même s'il n'y en aura pas assez pour éviter d'utiliser aussi du minerai de fer. Cette évolution pourrait être facilitée par l'adoption de règles et de spécifications communes, mais aussi par le développement et la mise en œuvre de nouvelles technologies de traitement de la ferraille pour faciliter l'élimination des impuretés.

La production d'acier a le potentiel pour devenir bas-carbone à l'avenir. Néanmoins, de nombreux défis restent à relever : l'échelle et l'efficacité, la disponibilité d'hydrogène et d'électricité bas-carbone, les besoins d'investissement, la problématique des actifs existants et le rendement du capital, les approbations des régulateurs et des décideurs politiques, les pénuries de compétences, etc. Il convient d'encourager les projets pilotes, de simplifier et d'accélérer les procédures d'autorisation, et de garantir la concurrence tout en partageant les expériences.

Parmi les éléments et exemples : sources d'émissions dans les principaux procédés, points des technologies contribuant à la décarbonation de la mine à l'acier, description de projets pilotes de décarbonation en Chine, Corée, Japon, Suède, Finlande, États-Unis, France et Allemagne.

## Chapitre 7 : Technologies de l'information et des communications (TIC)

D'une part, les TIC sont de plus en plus omniprésentes, consomment de plus en plus d'énergie et induisent de plus en plus d'émissions. D'autre part, elles offrent d'innombrables nouvelles possibilités (en matière médicale par exemple) et contribuent à de nombreuses activités tout en y réduisant, dans certains cas, la consommation d'énergie et les émissions de GES. Un exemple frappant, observé au cours de la période COVID-19, est le développement de la vidéoconférence pour remplacer les voyages et la mobilité humaine. En effet, c'est un dilemme de politique publique que de promouvoir simultanément l'expansion des TIC et la réduction des émissions de GES. Un autre message de ce chapitre est que les données sur l'impact des TIC en termes de consommation d'énergie et d'émissions sont largement imprécises.

Les équipements (ordinateurs portables, serveurs, routeurs de réseau, systèmes de transmission sans fil, etc.) en fonctionnement consomment de l'électricité, souvent 24 heures sur 24. Leur fabrication nécessite de l'électricité et/ou de l'énergie non seulement dans le processus de fabrication, mais aussi dans l'extraction/la production des minéraux et des produits requis, ce qui n'est généralement pas pris en compte dans les estimations de la consommation d'énergie du secteur.

En 2019, la consommation mondiale d'électricité du secteur des TIC a été estimée à 2 000 TWh (8,5% de la consommation totale d'électricité), ce qui correspond à environ 3% des émissions de CO<sub>2</sub>, dont la moitié pour la fabrication des équipements. Cette consommation n'a cessé d'augmenter, même si l'efficacité énergétique des équipements TIC, mesurée en bit par Wh, s'est accrue : nous pouvons désormais stocker, traiter et transmettre beaucoup plus de données pour la même quantité d'énergie. Cependant, les nouveaux développements tels que l'intelligence artificielle (IA), la 5G et les cryptomonnaies vont inéluctablement entraîner une nouvelle augmentation de la consommation d'électricité et donc des émissions de CO<sub>2</sub>.

Cette note ne couvre pas la fabrication ni le déclassement des équipements, mais se concentre sur le fonctionnement des TIC.

La première recommandation concerne la consommation des centres de données. Étant au cœur des problèmes liés à la consommation électrique des TIC, il est clé de continuer à améliorer leur efficacité par des mesures pertinentes et des pratiques de gestion efficaces.

La deuxième recommandation concerne l'augmentation significative de la consommation d'électricité liée à l'expansion de la 5G et suggère des initiatives pour réduire cette consommation.

La troisième recommandation concerne les développements à venir des systèmes, c'est-à-dire les ensembles équipements et réseaux, qui vont contenir un nombre croissant de petits centres de données (*edge-computing*) : l'évaluation de l'impact des choix architecturaux des systèmes sur la consommation d'électricité et les émissions de CO<sub>2</sub> pour ces nouveaux déploiements nécessite encore des travaux de recherches.

La dernière recommandation concerne le manque de données fiables et propose le développement de mesures et d'études systématiques sur la consommation d'énergie et les émissions des TIC sur l'ensemble du cycle de vie des équipements et des systèmes. Ces données devraient être largement diffusées.



Parmi les éléments et exemples : l'architecture du système TIC mondial ; le cas de l'Irlande (nombreux centres de données et sources d'électricité intermittente) ; les difficultés pour mesurer la consommation d'électricité des TIC ; la maîtrise du *edge-computing* ; le remplacement des équipements.

## Conclusions

De nombreuses difficultés et intérêts contradictoires, ainsi que des conflits de priorités entre les objectifs de développement durables, font obstacle à une mise en œuvre rapide des recommandations contenues dans cette note. Le développement de politiques holistiques est complexe, mais indispensable pour faciliter le déploiement des technologies disponibles, et ce au moindre coût. Cette note montre que de nombreuses technologies rendent l'action possible dès à présent. La dimension technologique n'est qu'une des dimensions : pour tous les secteurs, il faut aussi investir fortement dans les personnes et l'expertise !