

# Synthèse

Mines Paris PSL - Projet MIG EMIX

## Introduction

Notre étude consiste à proposer un mix énergétique de la France en essayant d'atteindre les objectifs de la stratégie nationale bas carbone (SNBC) en 2030 et en 2050, tout en considérant des solutions techniquement et financièrement réalisables, à la lumière des considérations des entreprises visitées.

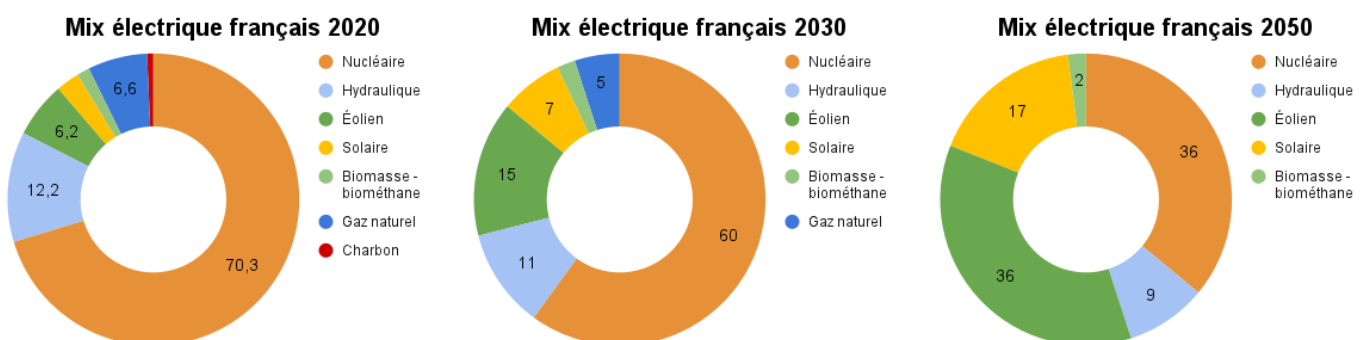
Nous nous sommes concentrés sur trois secteurs très émetteurs : l'industrie (18 % des émissions françaises), les transports (32 %) et le bâtiment (16 %). L'agriculture (19 %) ne sera pas prise en considération dans ce rapport.

Pour cela, nous prenons en compte les objectifs de réduction d'émissions par secteur et séparons chaque secteur en différentes activités. Après avoir étudié la consommation énergétique de chacune d'entre elles, nous proposons des solutions techniquement possibles et réalistes. Ainsi, nous parvenons à partiellement décarboner ces secteurs. En parallèle, nous étudions la possibilité d'un mix électrique moins émetteur, et la production de biométhane et d'hydrogène.

Afin d'y parvenir, nous estimons des ordres de grandeurs concernant la réduction d'émissions par activité et ses financements.

La répartition actuelle de la production d'électricité, qui se doit d'être actualisée pour 2030 et 2050, et le facteur d'émission associé nous seront utiles dans nos estimations d'émissions futures pour chaque secteur.

Pour définir la marche à suivre, nous avons considéré les scénarios du réseau de transport d'électricité (RTE). Étant un domaine très peu émetteur une fois installé, le nucléaire peut être un atout important dans la transition énergétique. De plus, son impact sur le territoire est bien moindre par rapport à celui de l'éolien et du photovoltaïque. Sur les 6 scénarios proposés par RTE, nous avons donc considéré la trajectoire centrale comportant une continuité du secteur nucléaire, avec de nouveaux projets avancés au rythme maximal de la filière communiquée à ce jour, sans pour autant relancer le secteur en développant du nouveau nucléaire (petits réacteurs modulaires) comme dans la trajectoire haute.



Concernant le gaz, son utilisation dans l'industrie est amenée à faiblement diminuer, pour les transports elle augmentera légèrement et diminuera dans le résidentiel (divisée par 3). Ainsi, le gaz apparaît comme un vecteur énergétique dont on ne pourra se passer, une prévision soutenue par l'IEA (*International Energy Agency*). Il est donc primordial de le décarboner avec du biométhane et de soutenir toute initiative pour. Les hypothèses retenues élèvent la proportion du biométhane à 15 % en 2030 et à 75 % en 2050.

Enfin, malgré l'engouement autour de l'hydrogène et sa nécessité dans la réalisation de la transition énergétique pour certains secteurs, trop peu de projets pour le décarboner se développent. Pour les activités consommatrices d'hydrogène, soutenir ces projets n'a pas de sens si la production reste d'origine fossile et très émettrice de CO<sub>2</sub> comme c'est le cas aujourd'hui.

## Industrie

L'industrie doit réduire ses émissions de 35 % d'ici 2030 et de 81 % d'ici 2050, par rapport à 2015. Elle comprend plusieurs domaines, les plus émetteurs étant la métallurgie, la chimie, les minéraux non métalliques et le plastique, ainsi que l'agroalimentaire qui représentent en 2020 respectivement 31 %, 27 %, 25 % et 13 % des émissions totales de l'industrie.

Concernant la métallurgie et les matériaux métalliques en France, ce sont l'extraction du minerai pour la fabrication de l'aluminium et la réduction du fer dans le cas de la production d'acier qui sont majoritaires et qui représentent donc les plus gros enjeux de décarbonation. Pour la production d'acier, l'hydrogène est la principale solution retenue pour remplacer le charbon, bien que coûteuse ; à laquelle s'ajoute l'électrification de procédés utilisant du gaz. Pour l'aluminium, on utilise, en plus de l'électrification, des solutions de captation carbone au niveau de la réaction.

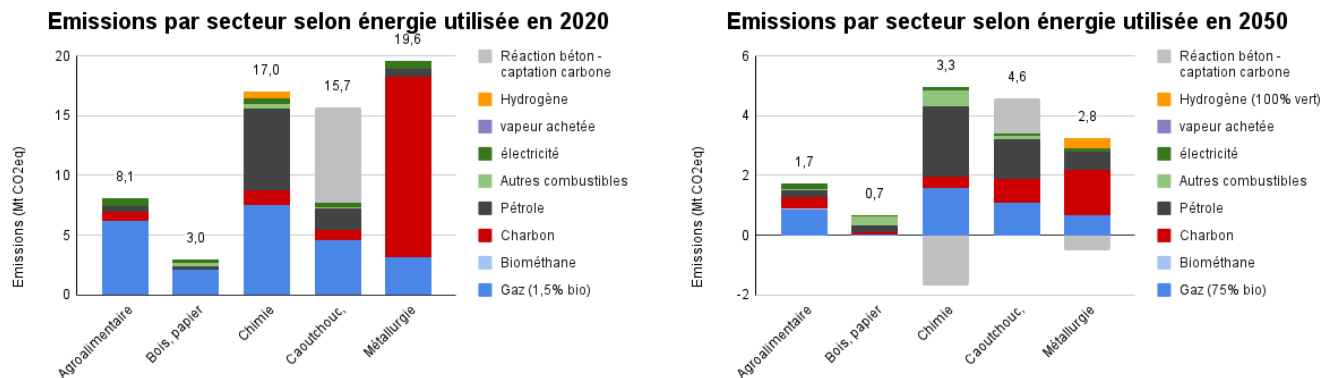
Dans le cadre des matériaux non métalliques et des plastiques, les émissions dues à la production de béton représentent un enjeu important dans la décarbonation du secteur. Celles-ci peuvent en partie être réduites par l'électrification des fours et l'utilisation de pompes à chaleur pour assurer de manière plus verte les besoins thermiques. Toutefois, ces solutions ne peuvent à elles seules remplir les objectifs et sont donc combinées avec de la captation carbone, notamment pour diminuer les émissions dues au béton produit lors de la décarbonation. Le recyclage du plastique est également envisagé pour réduire les émissions dues à l'emploi de pétrole.

Pour l'agroalimentaire, la décarbonation pourrait être assurée en grande partie et rapidement par l'électrification des procédés thermiques. La baisse des émissions peut également être garantie par la méthanisation des déchets des industriels pour leur propre consommation de biométhane. Le charbon étant utilisé en tant que matière première pour sa capacité de filtration, il peut tout de même être en partie substitué par le traitement UV. Enfin, la réduction de la consommation de produits pétroliers passe par le recyclage des emballages plastiques.

Finalement, la chimie doit également continuer la réduction de ses émissions déjà bien amorcée depuis les années 90. Toutefois, si les émissions des autres gaz à effet de serre (comme le N<sub>2</sub>O) ont drastiquement diminué, il est désormais nécessaire de s'attaquer aux émissions de CO<sub>2</sub> pour atteindre les objectifs fixés. Les procédés thermiques étant les plus énergivores, ils représentent les priorités de décarbonation. Les solutions envisagées sont donc principalement l'électrification des procédés, l'utilisation d'hydrogène bas carbone (principalement utilisé en chimie comme matière première) et la capture et stockage de CO<sub>2</sub>.

En somme, malgré un potentiel de décarbonation important pour l'industrie, celui-ci ne peut être atteint que par un engagement complet et immédiat de tous les acteurs du secteur. De plus, malgré le large panel de solutions envisageables, le facteur économique doit être pris en compte : les investissements devraient être à minima de 10 milliards d'euros, bien loin de l'investissement prévu par la France de 4,5 milliards d'euros d'ici 2030. Enfin, on a supposé ici que l'on souhaitait conserver la production industrielle actuelle dans le futur, dans la mesure où la ligne de conduite des entreprises

visitées est davantage tournée vers la recherche de l'efficacité énergétique et de l'amélioration des technologies. Cependant, ces dernières évoluent trop lentement et n'apparaissent donc pas comme des solutions suffisantes. Une autre piste de recherche réside dans le développement d'alternatives pour les matériaux utilisés par exemple, une dynamique qui ne semble pas être une priorité des entreprises visitées.



## Transports

Le secteur des transports doit réduire ses émissions de 25 % d'ici 2030 (par rapport à 2020) et atteindre des émissions de 4 MtCO<sub>2</sub> éq / an d'ici 2050 pour suivre la SNBC.

Les plus grands émetteurs de GES au sein des transports sont : les véhicules légers et utilitaires, les poids lourds, l'aviation et les transports maritimes intra-nationaux, et le transport ferroviaire. Ils représentent respectivement 67 %, 25 %, 4 %, 3 % et 1 % des émissions totales du secteur.

Les véhicules particuliers (VP) sont les plus gros émetteurs du secteur des transports. L'enjeu principal pour la décarbonation de ce groupe de véhicules est le passage à l'électrique. Néanmoins, cette transition n'est pas assez rapide, notamment en raison d'une différence d'un prix trop conséquent à l'achat pour les particuliers, même avec des subventions de l'État, et des infrastructures de recharge pas encore à la hauteur de la demande future. Une décarbonation effective pour ce secteur passera donc nécessairement par le report modal sur d'autres mobilités plus douces, voire par la sobriété énergétique, ainsi que par l'amélioration continue de l'efficacité énergétique des batteries et leur recyclage.

Pour les poids lourds, l'enjeu est aussi celui de l'électrification des véhicules actuels, qui sont pour le moment à moteurs thermiques. Pour cela, il faut mobiliser franchement la production de batteries, ainsi que la mise en place d'infrastructures compatibles, notamment avec des bornes de recharge très puissantes pour garantir des temps de recharge corrects.

La décarbonation du secteur aérien repose sur le développement des SAF (*Sustainable Aviation Fuel*). L'UE fixe un taux d'incorporation de ces carburants de 70 % en 2050. Pour pouvoir atteindre ce taux, des investissements massifs sont nécessaires car la filière des SAF est aujourd'hui très peu développée. La technologie d'avion à hydrogène ne nous paraît pas envisageable à grande échelle, car beaucoup trop énergivore et contraignante. Alors que l'utilisation de SAF ne requiert que peu de modification des réacteurs actuels, l'hydrogène demande de produire de nouveaux avions, avec des technologies très différentes de celles déjà existantes pour les carburants fossiles.

À l'instar de l'aviation, la décarbonation du secteur maritime dépend de l'évolution de la production de biocarburants et d'e-fuels. Nous croyons aussi que l'ajout de voiles sur les porte-conteneurs est une solution viable pour gagner en efficacité énergétique. Cette technologie est relativement peu chère et facile à mettre en place sur tout type de porte-conteneur. De plus, l'électrification du

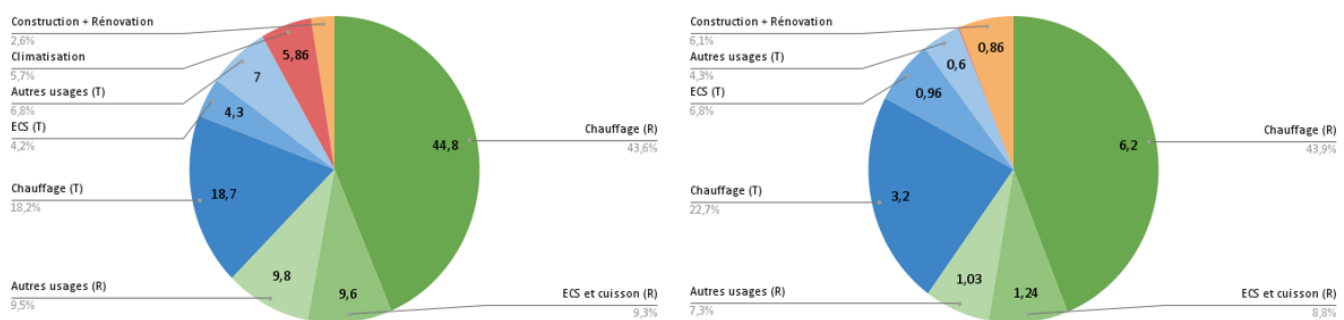
transport maritime et fluvial intra-national pourrait être un atout pour décarboner le secteur. Cette électrification n'est toutefois envisageable qu'à condition que les technologies de recharge très haute puissance se développent largement.

Le transport ferroviaire représente quant à lui une part plus faible des émissions des transports, puisqu'il est déjà fortement électrifié. Continuer à décarboner ce secteur veut surtout dire continuer à décarboner sa flotte de TER diesel, en employant par exemple des biocarburants, et des technologies hybrides ou hydrogène. Le secteur ferroviaire devra surtout adapter sa capacité de transport, à cause du report modal des véhicules particuliers.

Ainsi, selon nos différentes analyses, il est possible de diminuer les émissions de GES du secteur des transports d'un facteur 7 d'ici 2050, pour atteindre 19 Mt d'émissions annuelles contre 131 actuellement. Deux conditions sont essentielles : bien utiliser les technologies optimales pour chaque moyen de transport et assurer l'approvisionnement de 225 TWh / an en 2050 nécessaire à l'électrification des transports (contre 11 TWh / an actuellement).

La quantité d'électricité nécessaire à la transition du secteur du transport et les émissions résiduelles nous paraissent incompatibles avec le scénario net zéro en 2050 : une modification de nos mœurs et usages des transports semble être inévitable pour atteindre les objectifs fixés.

## Bâtiments



Emissions des bâtiments en 2020 puis 2050 (MtCO<sub>2</sub> éq).

Le secteur des bâtiments (résidentiel et tertiaire) est actuellement le 4<sup>e</sup> secteur le plus émetteur en France, responsable de 16 % des émissions totales françaises. Le secteur doit réduire ses émissions de 60 % d'ici 2030 par rapport à 2020, et atteindre la neutralité d'ici 2050. Il est certainement le secteur émetteur sur lequel les pouvoirs publics ont le plus d'emprise, pouvant déployer des politiques concrètes œuvrant à la neutralité.

L'analyse actuelle des émissions et la projection des réductions possibles à l'horizon 2030 et 2050 s'est faite en distinguant cinq postes de consommation énergétique : le chauffage et l'isolation, l'eau chaude sanitaire, la climatisation, les autres usages électriques (réfrigérateurs, lave-linge,...) et la construction et la rénovation (amputée de l'industrie concernée), qui représentent en 2020 respectivement 63 %, 14 %, 14 %, 6 % et 3 % des émissions des bâtiments.

Le chauffage est le poste central des émissions. L'amélioration de l'enveloppe thermique des bâtiments via la construction neuve et la rénovation du parc actuel devrait abaisser la consommation de 240 kWhEF / m<sup>2</sup> à 130 kWhEF / m<sup>2</sup> en 2050. La disparition totale des chaudières fioul (actuellement 4 % du parc) d'ici 2050 et la décarbonation du gaz (en supposant un mix gazier à 75 % de biogaz en 2050) et de l'électricité permettront une diminution des émissions de 85 %, pour atteindre 9.4 MtCO<sub>2</sub> éq en 2050.

L'eau chaude sanitaire repose elle aussi en grande partie sur le gaz (39 % de la consommation en énergie finale). Le fioul est toujours résiduellement présent, aussi bien dans le résidentiel que le tertiaire, mais responsable d'un quart des émissions de GES. La diminution des chaudières à

combustible fossile, au profit des chauffages à effet joule et des pompes-à-chaleur, permettraient une diminution des émissions de 86 %, pour atteindre 2.2 MtCO<sub>2</sub> éq en 2050. Les chauffe-eaux électriques pourraient d'autre part pallier le problème de stockage des EnR, en s'activant aux heures méridiennes en cas de forte disponibilité d'électricité sur le réseau.

Le fonctionnement des appareils électriques autres que ceux traités précédemment est responsable d'une part aujourd'hui faible des émissions, encore amenée à décroître à l'avenir (13 % des émissions des bâtiments en 2050) malgré l'explosion attendue du numérique et de l'IA d'ici 2050. La décarbonation projetée du mix électrique comme le développement d'appareils économes en sont la principale raison. Concernant le reste des usages, le passage de l'éclairage à LED et la gestion intelligente de l'éclairage d'une part, et la sobriété dans l'utilisation de l'eau chaude (en diminuant sa température comme le volume utilisé) d'autre part, permettraient une réduction voisine de 36 % des émissions liées à ces usages d'ici 2030. En outre, on peut développer la cogénération, pour alimenter les réseaux de chaleur en valorisant l'énergie thermique fatale des serveurs amenés à s'étendre.

Concernant la climatisation, l'introduction croissante de pompes à chaleur (PAC) au sein des logements, associée à des changements significatifs de comportement (utilisation réduite à 8 h / jour, contre 12 h / jour actuellement, pour des températures atteintes plus extrêmes de 30 °C, contre 27 °C actuellement), permettraient de réduire cette consommation en France métropolitaine d'environ 24 % en 2030. En 2050, on atteindrait ensuite une diminution de 72 %. D'autre part, aux émissions de CO<sub>2</sub> dues à la consommation électrique s'ajoutent celles des gaz fluorés, évaluées à 8 MtCO<sub>2</sub> éq en 2019, qui devraient ensuite s'annuler d'ici 2030 selon la tendance actuelle.

La construction et la rénovation (amputée de l'industrie concernée) des bâtiments est actuellement responsable d'une consommation énergétique décroissante. Grâce à des gains en efficacité énergétique sur les chantiers (notamment permis par les maquettes numériques), mais aussi au ralentissement des constructions neuves au-delà de 2050 (permis par certains comportements de sobriété liés à l'utilisation des surfaces immobilières ou aux résidences secondaires par exemple), la consommation des chantiers et donc leurs émissions en 2050 devraient avoir diminué de 68 % par rapport à 2015, en suivant la tendance actuelle. Néanmoins, on peut prévoir entre aujourd'hui et 2030 une hausse de la consommation et des émissions, date à laquelle elles seront maximales, justifiées par les rénovations et déconstruction-reconstructions nécessaires à l'évolution du parc que nous envisageons.

## Conclusion

Dans les trois secteurs étudiés, nous avons été confrontés à des difficultés similaires pour atteindre les objectifs de décarbonation en 2030 et en 2050. Les moyens technologiques sont pour la plupart déjà existants (différentes technologies autour de l'hydrogène, captation carbone, optimisation des cycles thermodynamiques, technologies de limitation des pertes. . . ) et la recherche dans ces domaines reste intense, ne serait-ce que dans les différents pôles R&D que nous avons pu visiter. Cependant, ils ne sont pas déployés aujourd'hui ou du moins pas assez rapidement. Certes, la demande en énergie globale devrait diminuer, notamment avec une meilleure gestion de la chaleur. Cependant, la consommation électrique devrait, quant à elle, augmenter considérablement. La décarbonation massive du mix électrique, permise par une diversification des énergies, est primordiale et s'inscrit dans le scénario N2 de RTE retenu. Ainsi, l'introduction d'une proportion minimale de 75 % de biogaz et le développement de l'hydrogène décarboné à 100 % sont des conditions extrêmement importantes, restrictives mais malheureusement insuffisantes. Nous sommes en effet arrivés à la conclusion qu'une électrification des usages énergétiques, même de façon massive et alliée à une quête d'efficacité énergétique, ne suffira pas. Dans les transports par exemple, l'électrification la plus rapide ne permet même pas d'atteindre le net zéro en 2050. Dans les bâtiments, on reste au mieux à 16 MtCO<sub>2</sub> en 2050, avec des investissements autour de 100 milliards d'euros. Dans l'industrie enfin, si l'objectif de 16 MtCO<sub>2</sub> peut être atteint, il repose sur une transformation complète des technologies installées

et des investissements très importants.

Des mesures comme une taxe carbone généralisée renforcée selon les besoins de chaque secteur, des interventions de l'État avec une législation et des investissements conséquents notamment dans le secteur du bâtiment, un réaménagement du territoire limitant le transport de gaz et d'énergies renouvelables, ou un réseau européen électrique toujours plus interconnecté pour pallier la non pilotabilité des énergies renouvelables, seront aussi des aides appréciables.

Il importe finalement d'aller vers une forme de sobriété raisonnée dans chacun des secteurs. Celle-ci ne sera possible que vécue comme un effort collectif, avec une sensibilisation et une participation active de la part de l'État, une forme de collaboration avec les entreprises pour engager tous les citoyens dans la transition.