

RAPPORT

① Décarboner plus, dépenser → *moins.*

PROPOSITIONS POUR UNE NOUVELLE STRATÉGIE CLIMAT

@@ Synthèse

La France, comme la plupart des économies développées, s'est engagée dans une trajectoire de décarbonation. Elle contribue à l'effort international visant à atteindre la neutralité carbone en 2050. Cette trajectoire implique une réduction annuelle de 4 à 5 % des émissions de gaz à effet de serre de la France, et donc une accélération par rapport au rythme actuel constaté, soit - 3,2 % en moyenne entre 2019 et 2025.

Les actions nécessaires à cette adaptation sans précédent ont un coût, porté à la fois par les citoyens, les entreprises et la collectivité. Ils sont très variables : pour économiser une même tonne de carbone, certaines mesures sont très peu chères quand d'autres ont un coût exorbitant. C'est ce qu'illustre ce rapport, en analysant un échantillon de plus de 20 mesures emblématiques et en montrant une incroyable dispersion de leur efficacité.

Pourtant, nous ne mesurons pas ces coûts dans le cadre des politiques publiques. Nous ne les prenons pas en compte pour fixer les priorités. Nous décarbonons tout, partout, en fixant des objectifs d'en haut, quitte à abandonner a posteriori des actions dont nous nous rendons compte qu'elles sont bien trop onéreuses.

Nous pouvons faire mieux et moins cher. En mesurant l'impact carbone de chaque action et en les rapportant à leur coût, il est possible d'identifier les actions les plus efficaces et d'orienter les financements vers les mesures qui maximisent la réduction des émissions de gaz à effet de serre. C'est cette démarche, fondée sur une prise en compte sérieuse, indépendante, systématique des coûts d'abattement à mettre en place que nous appelons de nos vœux dans ce rapport. L'objectif ? Maximiser la réduction des gaz à effet de serre et accélérer la décarbonation de l'économie à moindre coût économique et social.

En 2027, un nouvel exécutif dessinera la trajectoire de décarbonation du pays pour une décennie critique. Elle doit être ambitieuse, avec des priorités claires choisies en fonction de leur efficacité. Pour une décarbonation plus rapide et moins onéreuse.



① Mesurer le coût de la décarbonation : un réflexe essentiel

ENTRE 1990 ET 2024, l'Europe a réduit de 40 % ses émissions intérieures de gaz à effet de serre, la France de 34 %. C'est un succès indéniable – et singulier : le reste du monde n'a jamais émis autant de gaz carbonique qu'aujourd'hui, et les États-Unis viennent de se retirer pour la seconde fois de l'Accord de Paris. La part de l'Union européenne dans les émissions mondiales de CO₂ est tombée à 6 %. L'Europe est à la pointe de la lutte contre le changement climatique, restant fidèle à ses engagements.

En Europe, le facteur dominant de la diminution des émissions est la baisse de l'utilisation du charbon et la montée en puissance des renouvelables, en particulier l'éolien et le solaire photovoltaïque. En France, qui disposait d'une électricité déjà partiellement décarbonée, une efficacité énergétique accrue et une baisse du cheptel bovin ont aussi contribué à la trajectoire. Enfin, des « petits gestes » plus ou moins sacrificiels, en baissant son thermostat en hiver ou en prenant son vélo et les transports en commun plutôt que sa voiture personnelle, ont contribué à ce succès, sans qu'il ne soit facile d'en évaluer l'impact.

Il ne s'est toutefois pas fait sans coût pour la société. Des subventions massives ont soutenu les énergies renouvelables à des tarifs de rachat largement supérieurs au coût marginal de production de l'électricité nucléaire ou fossile : c'est un investissement collectif majeur de tous les Français. L'achat de véhicules électriques a aussi été largement subventionné, alors même que leur coût restait jusqu'à peu très supérieur à celui des voitures thermiques. Les travaux d'isolation thermique des bâtiments ont bénéficié de généreuses aides publiques. De nombreuses entreprises ont par ailleurs mis en œuvre des actions de décarbonation, de manière autonome ou soutenue par des dispositifs publics.

Toute subvention publique se traduit par une taxe ou un impôt supplémentaire, présent ou futur. Cette politique de financement de la transition par la dépense publique ne parvient plus à cacher l'importance de ses coûts, en particulier dans un contexte de crise des finances publiques. Et au-delà, l'engagement dans ces choix collectifs de décarbonation est largement questionné aujourd'hui. Cette stratégie est-elle la bonne, dans les bons secteurs, avec les bons leviers ?

Pour autant, le plus difficile reste à venir. Décarboner le transport aérien, la production d'acier ou de béton, le chauffage résidentiel, la mobilité du quotidien risque d'être complexe et coûteux pour les consommateurs, les entreprises et les contribuables.

Alors que la transition énergétique est l'affaire de notre siècle, il est frappant de constater qu'on parle peu de son coût réel. Le monde politique est par

Dans ce monde sans coût, un relativisme délétère s'épanouit.

nature réticent à exposer les électeurs aux sacrifices que nous devrions consentir compte tenu de nos responsabilités morales envers les générations futures. Les économistes du climat publient parfois ce type de sujets, mais sans qu'ils soient largement repris par les politiques publiques. Dans ce monde sans coût, un relativisme délétère

s'épanouit, où surgissent de partout les injonctions au verdissement, qu'il soit heureux ou quoiqu'il en coûte.

Nous perdons l'idée des bons ordres de grandeur qui nous permettent de faire des choix collectifs. Dans le discours et les solutions proposées par des politiques figurent des idées dont l'impact varie du tout au rien, qu'elles coûtent ou qu'elles rapportent. Et nous continuons de l'ignorer.

Ce rapport vise à nourrir le débat sur nos choix de politiques climatiques au moyen d'éléments objectifs et rationnels. Cela passe nécessairement par une estimation des coûts associés à la myriade d'actions de décarbonation dont dispose notre communauté, consommateurs, citoyens, entreprises et institutions publiques. On ne peut débattre collectivement et choisir rationnellement des actions vertes à mettre prioritairement en œuvre sans disposer d'une estimation des sacrifices et des bénéfices induits par chacune d'entre elles.

Notre approche se construit sur un outil largement utilisé en matière environnementale : le coût d'abattement. Il répond à une question simple : « une fois pris en compte et valorisés tous les impacts d'une action de décarbonation, quel est le sacrifice net de notre société doit supporter pour que cette action permette d'éviter l'émission d'une tonne de carbone » ? Ce sacrifice se mesure en euro par tonne de carbone, même si une bonne part des impacts sont non-financiers (inconfort thermique, temps de parcours allongé, paysage dégradé,...).

Le coût net par tCO₂ évitée est la bonne boussole permettant de mesurer l'efficacité d'une action de décarbonation, tenant compte de deux objectifs sociétaux souvent contradictoires : réduire les émissions et augmenter le bien-être des générations actuelles. Réaliser des efforts à 500 euros par tCO₂ alors

* Qu'est-ce qu'un coût d'abattement ?

Le coût d'abattement d'une action se définit comme la différence entre son coût social et son bénéfice social, à la seule exclusion de son bénéfice climatique. Son coût social intègre l'ensemble des suppléments de coûts induits par cette action par rapport au statu quo.

Par exemple, pour une pompe à chaleur remplaçant une chaudière au fioul, le coût social inclut le surcoût d'achat et d'installation, net des économies de facture énergétique sur la durée de vie de l'équipement. Pour la limitation à 110 km/h sur autoroute, il inclut l'économie liée à la réduction de la vitesse et la valeur du temps perdu par les conducteurs et les passagers.

Les co-bénéfices doivent aussi être intégrés : la réduction de la vitesse sur autoroute réduit les pollutions aux particules fines et la létalité des accidents, tandis qu'une bonne isolation thermique améliore le confort en hiver. Le calcul du coût d'abattement nécessite que tous ces co-coûts et co-bénéfices soient convenablement mesurés et valorisés.

Ce coût net est ensuite rapporté à la tonne de CO₂ évitée. Ce coût net est la boussole économique de toute politique climatique rationnelle. Une action à coût d'abattement négatif fait gagner sur les deux tableaux : elle réduit les émissions tout en améliorant le bien-être collectif hors changement climatique. Une action à coût d'abattement très élevé impose un sacrifice disproportionné par tonne évitée.

Le coût d'abattement n'est par construction pas une valeur unique ou absolue. Par exemple, le coût d'abattement d'un véhicule électrique va dépendre du modèle et surtout de l'usage qui en est fait. Un conducteur qui conduit habituellement plus réduit davantage son empreinte en adoptant un véhicule électrique. Le coût d'abattement de son action est donc meilleur.

qu'existent des efforts inexploités à 50 euros par tCO₂, c'est multiplier par 10 le coût global de la décarbonation. Ou, si l'on préfère, diviser par 10 la réduction des émissions pour un budget donné de décarbonation.

Certaines entreprises utilisent du reste une logique de coût d'abattement interne pour valider des investissements. Même s'ils représentent un coût net pour l'entreprise, ils seront validés si ce coût est inférieur à une valeur limite fixée par l'entreprise.

Mesurer de façon exhaustive les coûts de la transition dépasse largement l'ambition de ce rapport, tant il existe de gestes, petits et grands, de décarbonation qui se différencient par ceux qui les contrôlent, les circonstances spécifiques de leur mise en œuvre, et les technologies vertes utilisées.

Nous souhaitons néanmoins mettre en lumière les coûts d'un ensemble significatif d'actions de décarbonation, en vue de susciter un débat sur la façon dont notre pays pilote sa transition énergétique. Ce travail ne se veut pas

exhaustif, et s'appuie sur d'autres travaux menés par des institutions indépendantes remarquables, scientifiques, ONG ou think tanks. Il veut promouvoir une meilleure compréhension des enjeux économiques et environnementaux de cette transformation sociétale et proposer la mise en place d'une méthode transparente permettant de rationaliser les choix politiques.

Les priorités en matière de décarbonation doivent être dessinées dans l'année qui vient. Elles doivent être débattues, éclairées et fondées sur les faits et non les préférences symboliques ou les positionnements idéologiques. Notre stratégie de décarbonation doit désormais embarquer les Français dans cet effort ambitieux, coûteux et complexe qui, bien piloté, peut également constituer une très grande opportunité pour notre pays.

02 Une grande dispersion des coûts

NOUS AVONS ÉVALUÉ LE COÛT D'ABATTEMENT d'une vingtaine d'actions de décarbonation représentant des décisions passées ou futures potentielles, que notre pays a fait ou pourrait faire. Les calculs et les hypothèses sont détaillés en annexe.^[1]

Il ne s'agit pas de prétendre à l'exhaustivité, car le nombre des actions qui pourraient évaluées se compte en centaines voire en milliers. L'exercice impose également de fixer des hypothèses sur les cas d'usage : le coût d'abattement d'une pompe à chaleur varie ainsi du tout au tout entre une résidence principale mal isolée en Savoie et une résidence secondaire moderne dans le Vaucluse. Pour chaque cas, nous avons choisi de prendre un cas d'usage « moyen ». Enfin, l'ensemble de ces calculs a été effectué sans tenir compte de la fiscalité ou des subventions, l'objectif étant précisément de mesurer l'impact des actions sans les incitations associées.

Ces réserves et points méthodologiques établis, nous pouvons tirer de ces travaux une conclusion essentielle, qui n'est pas sensible au choix spécifique de telle ou telle hypothèse : la dispersion des coûts d'abattement est extrêmement élevée. Certaines actions (en vert foncé) sont rentables et permettent de réduire les coûts. Parmi les autres, les coûts varient d'un facteur de 1 (voiture électrique) à 300 (isolation de logements chauffés à l'électricité).

Le tableau ci-dessous illustre l'ampleur de la dispersion de cet échantillon d'actions de décarbonation. Les calculs sont détaillés en annexe, et incluent souvent des fourchettes non reprises dans ce tableau et cette synthèse pour des raisons de lisibilité.

[1] Pour une meilleure lisibilité et compte-tenu des incertitudes de calcul inhérentes à l'exercice, les résultats ont été arrondis au facteur 5 le plus proche entre 0 et 100€/tCO₂, et au 2^e chiffre significatif au-dessus de 100€/tCO₂.

[graphique 1]

Coûts d'abattement de différentes mesures évitant des émissions de CO₂

	[mesure]	[€/tCO ₂]	
Parcs de batteries	-120		
Substitution du charbon par le gaz naturel	0		
Bioéthanol de 1 ^{ère} génération (pose d'un boîtier, baril à 60\$)	30		
Voiture électrique (13 000 km/an)	50		
Décarbonation de l'acier (réduction directe au gaz)	85		
Pompe à chaleur pour remplacer une chaudière fioul	90		
Reforestation	95		
Décarbonation de la production de ciment	120		
Nouveau nucléaire pour remplacer le gaz	120		
Renouvelables/batteries vs. gaz naturel	250		
Décarbonation de l'acier (réduction directe à l'hydrogène)	270		
Bioéthanol de 2 ^e génération (pose d'un boîtier inclus)	390		
Électricité : hydrogène vert à la place du méthane	470		
RE 2020	480		
Solaire en toiture	500		
Capture du carbone dans l'air (solvant liquide)	560		
Suppression des lignes aériennes courtes (Paris-Toulouse)	750		
Voiture électrique (6 500 km/an)	900		
SAF	920		
Travaux d'isolation (2018-2023) - logement chauffé au gaz	1 800		
110 km/h sur autoroute	3 100		

Sources :
calculs des auteurs
en annexe, sources
complètes reprises
en bibliographie.

■ Négatif (bénéfice net)
 ■ 1 à 100€/tCO₂
■ 100 à 250€/tCO₂
■ >250€/tCO₂

Les excellentes surprises : des actions rentables

Une partie des actions de décarbonation sont rentables sans référence au climat : elles rapportent plus à la collectivité qu'elles ne lui coûtent. Leur coût d'abattement est donc négatif. Elles apparaissent en vert foncé sur le graphique. Grâce à la chute vertigineuse récente du coût des batteries, l'utilisation de systèmes de batteries au sol pour stocker de l'électricité renouvelable et la revendre en période de pointe, évitant ainsi d'utiliser des énergies fossiles, est désormais rentable, avec un coût d'abattement qui peut même être négatif de -120 €/tCO₂ 🌱 dans les cas favorables. C'est une nouvelle de première importance, car cette capacité de stockage permet de traiter largement le sujet de l'intermittence à haute fréquence des systèmes d'énergies renouvelables.

D'autres exemples sont particulièrement spectaculaires. Ainsi, une étude du Collège de France menée sur le traitement des eaux usées montre que l'intelligence artificielle permet d'injecter exactement la bonne quantité d'oxygène dans l'eau à chaque instant en fonction de la qualité des eaux à traiter, réduisant ainsi largement la consommation d'énergie nécessaire à cette oxygénation. Ce gain est très supérieur à la propre consommation d'énergie utilisée pour effectuer les calculs de l'IA, ce qui permet de réduire les émissions de CO₂. L'entreprise qui a mis en œuvre ce projet a ainsi pu réduire ses coûts tout en décarbonant. Le coût d'abattement est donc négatif, à -6 100 €/tCO₂ 🌱 en France. Chaque tonne de carbone économisée rapporte à l'entreprise 6 100 €. L'exemple peut sembler anecdotique, mais il illustre un fait constaté dans de très nombreux cas concrets : l'amélioration des processus industriels aboutit souvent à des gains en matière d'énergie et de matières qui améliorent les coûts. Un meilleur impact améliore ainsi les résultats de l'entreprise. Quant à l'IA, souvent critiquée pour la quantité d'énergie que son développement va nécessiter, elle peut aussi permettre des gains d'efficacité remarquables en matière notamment d'industrie ou de mobilité. Cette piste est une indication d'un bon usage possible.

Les bonnes surprises : des actions très efficaces

D'autres actions de décarbonation coûtent à la collectivité, mais ce coût est très raisonnable. Selon nos calculs, remplacer une voiture thermique en fin de cycle par un véhicule électrique neuf plutôt que par une autre voiture thermique est encore, en moyenne, légèrement défavorable : le surcoût à l'achat n'est pas encore tout à fait compensé par le moindre coût d'usage. Pour un rouleur représentatif (13 000 km/an), la différence de coût complet sur le cycle de vie est devenue toutefois faible, autour de 900 €. Rapportée aux 18,9 tCO₂ évitées de l'option électrique, et grâce à un mix électrique français très décarboné, cela conduit à un coût d'abattement de 50 €/tCO₂ 🌱 — parmi les plus bas de tout le spectre.

C'est un coût moyen, qui dépend du type et de l'usage du véhicule. Par exemple, un rouleur qui utilise deux fois moins son véhicule verra son coût d'abattement passer à 900 €/tCO₂ 🌸, à la fois en raison d'un surcoût moins

amorti par l'usage et d'économies moindres d'émissions de carburant. Mais pour les grands rouleurs et même désormais les rouleurs moyens, le véhicule électrique est déjà la meilleure option. L'essentiel des émissions des transports individuels est le fait des rouleurs réguliers qui effectuent entre 30 et 40 km par jour. C'est donc une très bonne nouvelle : décarboner ce qui fait le gros de nos déplacements est possible à très faible coût pour la collectivité, voire, dans de nombreux cas, avec un bénéfice net.

Le remplacement d'une chaudière au fioul par une pompe à chaleur est également une opération à coût d'abattement modéré, 90 €/tCO₂ , sans même compter le confort additionnel fourni en été par la climatisation. Comme pour le véhicule électrique, le coût varie considérablement en fonction de l'usage.

Une pompe à chaleur sera très rentable dans une maison utilisée toute l'année dans un climat froid, mais ne le sera pas dans une résidence secondaire en Provence.

La pose d'un boîtier bioéthanol de 1^e génération sur une voiture à moteur thermique est rentable (30 €/tCO₂ ) , notamment quand le cours du pétrole est élevé. À partir de 60 dollars le baril, il est socialement amorti au bout de 50 000 km hors fiscalité ; pour le conducteur, c'est encore plus rapide en intégrant l'écart de fiscalité

actuellement en vigueur. Les biocarburants n'offrent toutefois pas de solution globale : à large échelle, ils posent le problème de l'usage des sols et la concurrence avec les produits de l'agriculture. Mais ils peuvent constituer une solution pertinente pour réduire l'empreinte du parc existant en attendant la généralisation du véhicule électrique.

Dans l'industrie, la décarbonation partielle de l'acier par utilisation de gaz naturel, qui permet de réduire de moitié son contenu carbone, ressort à un coût raisonnable de 85 €/tCO₂ . Pour ce type d'industrie, le système européen de crédit carbone (ETS) intègre une facturation de la tonne de carbone actuellement autour de 80 €/tCO₂, ce qui permet d'internaliser le coût. La substitution devient alors pertinente sur le plan économique en intégrant cette facturation, surtout en prenant en compte la croissance attendue de ce prix. La sidérurgie a donc un intérêt objectif à décarboner dans le cadre du système européen.

Enfin, la reforestation afin d'améliorer durablement la capacité d'absorption de carbone est également relativement peu onéreuse, à 95 €/tCO₂ , sans même prendre en compte les co-bénéfices sur la biodiversité, le patrimoine naturel et le cadre de vie.

Des actions efficaces quoiqu'un peu plus onéreuses

Certaines actions sont plus chères, avec un coût compris entre 100 et 400 €/tCO₂. Il reste accessible, notamment si les ambitions en matière de décarbonation sont fortes. L'évolution des performances et du coût des technologies peut aussi aboutir à une baisse de ces coûts.

**Pour les moyens
et grands rouleurs,
le véhicule
électrique permet de
décarboner de façon
très économique.**

Dans l'industrie, la substitution de clinker par l'argile pour la fabrication du ciment ressort à un coût de 120 €/tCO₂ ☀ pour décarboner 80 % de la production. Toutefois, une bonne partie des cimenteries peut être décarbonée à un coût inférieur. Des actions à 50 €/tCO₂ 🌿 permettent déjà de réduire les émissions de carbone dans 30 % des cas. La fabrication du ciment, qui représente 7 à 8 % des émissions de CO₂ dans le monde, peut donc être largement décarbonée à un coût socialement acceptable.

Une bonne partie des cimenteries peut être décarbonée à un coût acceptable.

En comparaison de centrales au gaz naturel, le nouveau nucléaire développé dans le cadre du programme EPR 2 ressort à un coût de 120 €/tCO₂ ☀ dans un scénario central (entre 70 et 165 €/tCO₂) et bâti sur la base des estimations initiales du coût du programme. Si on limite la gestion de l'intermittence par un système de batterie et une flexibilisation de la demande, le coût d'abattement d'un mix électrique 100 % éolien et solaire serait aujourd'hui plus élevé, autour de 250 €/tCO₂ ☀ dans un scénario central (entre 151 et 357 €/tCO₂). Ces chiffres peuvent néanmoins évoluer, d'une part en fonction des coûts anticipés du programme EPR 2, de l'autre en fonction de l'évolution du coût des renouvelables et des batteries, historiquement fortement baissière. L'évolution du coût des renouvelables et des batteries doit être surveillée : il baisse historiquement de moitié tous les 3 à 5 ans. En l'état et compte tenu de son coût très élevé, la batterie n'est toutefois pas une technologie viable pour gérer les variations inter-saisonnières de génération solaire et éolienne. Les approches à l'étude incluent aujourd'hui l'utilisation de stockage par hydrogène ou le surdimensionnement des capacités de production, avec un coût d'abattement qui reste encore élevé.

La décarbonation de l'acier à l'hydrogène reste encore aujourd'hui assez onéreuse, à 270 €/tCO₂ ☀. La première étape est déjà d'utiliser le méthane, comme évoqué plus haut. Le bioéthanol de deuxième génération revient à 390 €/tCO₂ ☀, nettement plus que celui de première génération et encore à un coût d'abattement élevé.

Les mauvaises surprises : des politiques très onéreuses

À l'autre extrémité du spectre, certaines solutions, parfois associées à des politiques publiques emblématiques, imposent un coût collectif sans rapport avec leur efficacité climatique réelle.

La récente campagne d'isolation des bâtiments a ainsi abouti à des impacts très décevants. Une étude particulièrement fouillée sur 80 000 foyers bénéficiaires du dispositif MaPrimeRénov' entre 2018 et 2023 a montré que malgré des coûts moyens entre 10 et 15 000 €, elle n'aboutissait en général qu'à une baisse de 5 à 10 % de la consommation d'énergie du foyer. Dans le cas d'un logement chauffé au gaz, le gain en carbone est modeste, 200 kgCO₂ par an pour 150 € d'économies. Ce gain coûte près de 13 700 € de travaux. Calculé sur 20 ans, le coût d'abattement ressort à 1 800 €/tCO₂ 🌸. Pour les logements chauffés à l'électricité, le gain environnemental est encore plus faible du fait

de l'énergie électrique décarbonée : le coût d'abattement atteint en moyenne 9 900 €/tCO₂ ✱. Le rapport n'intègre pas les logements chauffés au fuel, dont la consommation ne peut être mesurée aisément en l'absence de compteur. En prenant des hypothèses similaires aux résultats obtenus pour les logements chauffés au gaz, le coût d'abattement ressortirait à 1 300 €/tCO₂ ✱, un niveau qui demeure très élevé. Ce résultat sur le dispositif MaPrimeRénov' illustre en particulier le choix de subventionner des mono-gestes par rapport à une rénovation plus complète. Le principal défaut de MaPrimeRénov' n'est pas d'avoir subventionné des travaux inutiles, mais d'avoir longtemps privilégié la quantité de logements « touchés » plutôt que la performance énergétique globale des logements rénovés.

En matière de construction, le surcoût lié à la RE 2020, la norme environnementale applicable aux bâtiments neufs, est logiquement plus bas : le coût d'isolation est plus faible lors de la construction initiale plutôt que lors d'une rénovation. Il reste toutefois relativement élevé, à 480 €/tCO₂ ✱.

La limitation à 110 km/h sur autoroute, parfois proposée et politiquement symbolique, se révèle économiquement coûteuse : 3 300 €/tCO₂ ✱. Ce coût est essentiellement lié à la perte de temps de chaque passager, soit 1,4 heure sur 1 000 km. À la valeur du temps proposée par l'État (32,80 €/h), le sacrifice net dépasse 75 € pour éviter 23 kg de CO₂ par passager. Bien sûr, la valeur du temps dépend de chaque individu. Mais à l'échelle nationale, le coût social semble bien trop élevé pour un bénéfice climatique marginal.

C'est le même effet qui peut rendre la fermeture des petites lignes aériennes particulièrement onéreuse, quand elle aboutit à des pertes de temps des passagers. Le calcul dépend de chaque ligne, et doit donc être réalisé de manière ad hoc. Sur un Paris-Toulouse par exemple, le coût d'abattement du train par rapport à l'avion est élevé, à 750 €/tCO₂ ✱. Les personnes qui décident, délibérément, de prendre le train plutôt que l'avion sur de telles lignes font donc un véritable sacrifice en temps. Ce sacrifice, là encore, dépend de la perte de valeur perçue par chacun : une personne qui travaille très bien dans un train décidera, individuellement, que cette perte de valeur est faible pour elle. Mais là encore, à une échelle nationale, le sacrifice collectif ne semble pas justifié.

En matière d'aviation, les carburants synthétiques (fabriqués à partir d'hydrogène vert) restent encore, aujourd'hui, très onéreux à 920 €/tCO₂ ✱. Les gains obtenus en matière de décarbonation ne semblent pas justifiés par les coûts élevés de fabrication. En matière d'aviation, peu de solutions actuelles apparaissent aujourd'hui comme satisfaisantes.

En France, le photovoltaïque remplace une énergie déjà décarbonée. Grâce aux fortes économies d'échelle, les centrales solaires au sol permettent un coût total raisonnable, comme vu plus haut, y compris avec stockage. En revanche, le photovoltaïque en toiture est nettement plus onéreux, pour un gain de CO₂ assez modeste. Son coût d'abattement ressort à 500 €/tCO₂ ✱.

Enfin, certaines technologies permettent de capter et stocker directement le CO₂ dans l'air. Elles sont encore coûteuses, à 560 €/tCO₂ ✱. Il est donc

nécessaire de déployer largement des actions de décarbonation, plutôt que d'envisager un nettoyage de notre pollution à grande échelle. À moyen terme, on peut toutefois anticiper une baisse des coûts de ces technologies encore en début de cycle.

Ce que révèle la dispersion

Cette dispersion est spectaculaire. Les solutions de décarbonation peuvent être très bon marché ou très onéreuses, pour un même bénéfice environnemental et sociétal. Choisir des politiques coûteuses alloue donc des moyens humains et financiers précieux à des solutions à faible rendement carbone.

Dans un cas hypothétique où, par exemple, on laissait filer le parc automobile fondé sur le moteur à combustion, tout en imposant aux compagnies aériennes d'utiliser du kérosène synthétique, la France subirait un coût collectif près de 20 fois supérieur à ce qu'elle subirait en choisissant une stratégie sur une substitution rapide du véhicule électrique. En d'autres termes, la France pourrait choisir de réduire 20 fois plus ses émissions en investissant sur la bonne solution, à la marge.

La dispersion des coûts d'abattement est pourtant largement ignorée par les politiques climatiques françaises. Nous allouons nos efforts de décarbonation sur différents dispositifs et secteurs, sans analyser ces coûts d'abattement et sans orienter nos politiques publiques vers les actions les plus rentables sur le plan écologique.

Chaque année, nous investissons pour le climat autour de 100 Md€ (103 Md€ en 2025). Bien allouer ces investissements sur des moyens rentables est critique, afin de maximiser l'impact écologique de ces montants considérables.

**Chaque année,
100 Mds€ investis
pour le climat.**

③ La valeur du carbone : la boussole inutilisée

COMMENT SAVOIR SI UNE ACTION DE DÉCARBONATION fait partie des moins coûteuses pour atteindre l'objectif global de réduction des émissions ? La réponse tient en un principe simple : il suffit d'identifier le seuil de coût d'abattement qui sépare ces actions de celles dont le coût est trop élevé pour être économiquement et écologiquement justifiable. Ce seuil porte un nom : la « valeur-carbone ». Une fois la valeur-carbone déterminée, chaque décideur dispose d'une règle de décision simple pour déterminer si telle ou telle action de décarbonation est socialement désirable ou non : il lui suffit de constater si le coût par tCO₂ de son action est inférieur à cette valeur-carbone. La valeur-carbone devrait donc être la boussole de nos stratégies de décarbonation.

La valeur-carbone reflète l'ambition climatique d'un pays. Plus l'ambition est élevée, plus il faut réaliser d'actions de décarbonation, plus élevée doit être la valeur-carbone. Le rapport Quinet-3, recommande une valeur-carbone de 256 €/tCO₂, qui augmente progressivement jusqu'à 300 €/tCO₂ en 2030 afin d'atteindre l'objectif d'une réduction de 55 % des émissions à cette date par rapport à 1990. Cette valeur-carbone devra croître dans le temps pour permettre d'atteindre les objectifs de plus en plus ambitieux de réduction d'émissions au-delà de cette date. Comme le souligne le rapport : « *De nombreuses actions sont à conduire pour atteindre l'objectif, mais elles doivent être engagées dans le bon ordre. Les gisements de réduction des émissions de CO₂e. à bas coût doivent être mobilisés en priorité, avant que soient lancées les plus coûteuses.* ».

Relire le tableau de la section précédente à l'aune de ce seuil est instructif. Les actions en dessous de 256 €/tCO₂ — véhicule électrique, pompe à chaleur, substitution charbon/gaz, acier gaz, ciment argile, reforestation — sont socialement rentables et méritent d'être accélérées. Les actions qui le dépassent significativement — isolation des bâtiments, 110 km/h, PV en toiture subventionné, carburants d'aviation de synthèse, capture carbone — imposent à la collectivité un sacrifice disproportionné par rapport à leur impact climatique. Les moyens financiers publics ou privés alloués à ces actions devraient être réorientés vers d'autres permettant de réduire davantage les émissions de gaz à effet de serre.

Des actions de décarbonation non-prioritaires aujourd'hui peuvent toutefois le devenir demain, au moins pour deux raisons. La première est le progrès technologique qui peut réduire le coût par tCO₂ évitée. Les coûts des technologies efficaces de décarbonation baissent en effet sans cesse, ce que souligne par exemple le rapport du GIEC en ce qui concerne les énergies renouvelables et des batteries. La deuxième cause vient de la hausse tendancielle de la valeur-carbone. À terme, compte tenu de l'objectif de zéro émission nette, une très grande majorité des activités humaines devront être décarbonées.

Cette boussole n'est bien sûr pas le critère unique de choix des politiques climatiques – d'autres dimensions en matière de souveraineté, santé ou effets sociétaux non mesurables, par exemple, peuvent intervenir dans les choix publics. Mais le coût d'abattement est un critère essentiel à prendre systématiquement en compte.

* Un outil existant mais pas assez utilisé

Depuis 2008, l'État français dispose d'une valeur tutélaire du carbone, rebaptisée « valeur de l'action pour le climat » en 2019. Elle a connu trois versions successives, actualisées à la lumière des connaissances scientifiques et économiques disponibles.

2008 – Le rapport fondateur. Commandée par le Premier ministre et confiée au Centre d'analyse stratégique, la première commission présidée par Alain Quinet prolonge des travaux antérieurs conduits sous l'égide de Marcel Boiteux au Commissariat général du Plan. Elle établit pour la première fois un référentiel destiné à valoriser l'effet de serre dans l'évaluation socioéconomique des investissements publics.

2019 – Le rapport « Quinet II ». Pour tenir compte du relèvement des ambitions climatiques françaises et européennes, la valeur est réévaluée à la hausse : 250 €/tCO₂ en 2030 et jusqu'à 775 € en 2050. Le périmètre des investissements publics jugés pertinents est élargi, en cohérence avec l'objectif de neutralité carbone à 2050 fixé entre-temps.

2025 – La dernière actualisation (France Stratégie). La trajectoire est à nouveau relevée, de 187 € à 256 €/tCO₂ pour 2025, avec une cible de 300 € en 2030, en cohérence avec les nouveaux objectifs de la troisième stratégie nationale bas-carbone (SNBC 3). Ce rapport s'inscrit dans la continuité de deux autres travaux : les évaluations sectorielles de coûts d'abattement de la commission Criqui et les analyses macroéconomiques du rapport Pisani-Ferry/Mahfouz de 2023. France Stratégie présente ainsi, pour la première fois, ces trois chantiers comme les éléments d'un même dispositif d'aide à la décision.

L'outil bénéficie d'une continuité institutionnelle rare : trois commissions en dix-sept ans, un même président, une doctrine stable en font l'un des rares

instruments français de politique climatique à s'être construit dans la durée plutôt que par à-coups.

La valeur de l'action pour le climat est aujourd'hui utilisée pour évaluer des projets d'investissement public (méthode inscrite dans les référentiels de France Stratégie et du Commissariat général à l'investissement) et sert de point de comparaison pour les débats sur la fiscalité carbone.

Mais l'utilisation reste encore très partielle. Premièrement, la valeur de l'action pour le climat reste un outil d'évaluation de projets pris isolément ; elle ne se traduit pas en une trajectoire d'ensemble hiérarchisant les actions de la SNBC. Deuxièmement, son usage demeure cantonné à l'évaluation des investissements publics soumis à évaluation socioéconomique obligatoire : elle n'irrigue ni les arbitrages budgétaires annuels, ni la construction des objectifs sectoriels de la SNBC et de la PPE, fixés indépendamment de tout critère de coût. Troisièmement, la valeur reste une convention macroéconomique unique et croissante dans le temps ; elle n'inclut pas une cartographie fine des coûts d'abattement réels par action, que seule fournit la commission Criqui et qui n'a, elle non plus, jamais été systématiquement intégrée aux choix de planification.

L'État dispose donc, depuis près de vingt ans, d'un outil capable de prioriser les actions de décarbonation. Ce n'est donc pas d'un déficit d'ingénierie économique que souffre la politique climatique française, mais d'un manque d'utilisation d'un outil existant dans la décision publique.

Le prix du carbone

Une fois que nous avons cette information, entre la valeur du carbone et le coût d'abattement des actions, il y a, schématiquement, deux manières possibles de le prendre en compte dans les politiques publiques.

La première est de l'intégrer dans le prix des biens et des services, sous forme d'une taxe carbone. L'avantage de cette approche est que chaque individu, chaque entreprise effectue ses propres choix, en fonction de sa situation, avec un coût du carbone intégré dans le prix du bien ou du service. Il évite à l'État de s'immiscer dans les choix individuels autrement qu'à travers l'envoi de ce signal prix universel. Naturellement, les choix faits sont les plus efficaces collectivement, ce qui permet de maximiser l'impact carbone pour un coût social minimal. Cette approche fait l'objet d'un consensus assez large chez les économistes. En janvier 2019, 3 600 d'entre eux dont 28 prix Nobel ont signé une tribune dans le Wall Street Journal appelant à la mise en place d'une taxe carbone intégralement redistribuée.

Afin de ne pas pénaliser le pouvoir d'achat, cet impôt supplémentaire doit être intégralement redistribué aux citoyens ou compensé par des baisses d'impôts existants, par exemple sur le coût du travail. Pour ne pas grever la compétitivité de l'Europe, cette tarification du carbone doit s'accompagner d'ajustements carbone aux frontières, qui permet d'appliquer une surcharge aux importations en due proportions de leur poids carbone, voire de corriger

dans l'autre sens les exportations. Un marché de permis d'émission peut enfin jouer le même rôle qu'une taxe carbone pour envoyer le bon signal-prix aux acteurs économiques.

La seconde option est d'intégrer le prix du carbone comme un élément déterminant le choix des politiques publiques, voire les stratégies d'entreprise (prix interne du carbone). Dans le cadre d'approches plus étatistes, dont la France reste encore friande, cette approche permet de déterminer quelles sont les politiques publiques les plus désirables et d'éliminer celles qui ont un coût trop élevé. L'approche est moins efficace qu'une taxe carbone universelle, qui permettrait d'intégrer le coût du carbone directement dans les choix des acteurs. Elle a toutefois l'avantage d'une meilleure faisabilité politique dans le contexte actuel.

En France, le coût est presque absent des politiques publiques

En tout état de cause et aussi invraisemblable que cela puisse paraître, la question du coût de la décarbonation est presque absente des politiques publiques françaises. Aucune loi climatique française ne cite la valeur tutélaire du carbone comme critère d'évaluation des politiques de décarbonation. La stratégie nationale bas-carbone (SNBC) fixe des trajectoires sectorielles d'émissions sans comparer le coût d'abattement des actions proposées. Le processus budgétaire ne retrace pas le coût par tonne de CO₂ évitée des dépenses fiscales climatiques. Les différents dispositifs de politique publique – Programmation pluriannuelle de l'énergie, budgets carbone quinquennaux, loi de programmation énergie-climat – n'utilisent que peu ou pas la boussole du coût d'abattement. Les politiques sont choisies sans référentiel d'efficacité commun — chaque secteur défend son enveloppe indépendamment de sa rentabilité climatique. Les outils nécessaires existent, notamment la valeur tutélaire du carbone, mais ils ne sont pas utilisés dans la détermination des priorités stratégiques.

Certains de nos voisins ont pourtant largement intégré cette approche dans leurs politiques publiques. Le Royaume-Uni a mis en place en 2009 un « prix fictif du carbone » (shadow price of carbon). Cette valeur unique est intégrée dans le « Green Book », cadre méthodologique gouvernemental d'évaluation des politiques. Elle est aujourd'hui pilotée par le Department for Energy Security and Net Zero et fait l'objet d'une révision régulière : la valeur centrale s'établit à 273 £/tCO₂ pour 2025. Elle est utilisée très concrètement dans les études d'impact réglementaire — par exemple pour évaluer à la fois des politiques qui génèrent des économies de carbone (le Clean Heat Market Mechanism) et d'autres qui en coûtent (le Warm Home Discount), permettant une comparaison chiffrée directe entre les deux. Le mécanisme est explicitement construit comme une courbe de coût marginal d'abattement croissante : plus l'objectif de réduction est ambitieux, plus la valeur carbone appliquée grimpe.

Certains de nos voisins ont largement intégré cette approche dans leurs politiques publiques.

Les Pays-Bas disposent d'un système assez sophistiqué : le CPB (Bureau central du Plan) et le PBL (Agence pour l'environnement) publient conjointement, dans le cadre de leurs scénarios de prospective (WLO — Toekomstverkenning Welvaart en Leefomgeving), des « prix CO₂ efficaces » qui font partie de ces scénarios et intègrent les trajectoires technologiques, économiques, démographiques et de politique climatique internationale. Ces prix sont calculés par simulation (modèle IMAGE du PBL) puis appliqués systématiquement dans les analyses coûts-bénéfices socio-économiques (MKBA) que doit produire l'administration néerlandaise pour toute grande décision d'investissement public, y compris dans les transports.

D'autres pays ont choisi d'internaliser le prix du carbone en appliquant une taxe carbone. La Suède applique une taxe carbone depuis 1991, aujourd'hui à 115 €/tCO₂. La Suisse prélève 85 €/tCO₂, dont un tiers des recettes finance la rénovation énergétique des bâtiments. Cette approche, mise en œuvre en France, a été gelée lors de la crise des gilets jaunes en 2019. Un prix de 44,60 €/tCO₂ reste toujours appliqué, mais sur une base relativement restreinte qui est loin de couvrir toutes les émissions. Au total, 43 taxes carbone et 35 marchés de quotas sont aujourd'hui appliqués dans une cinquantaine d'États représentant 65 % du PIB mondial.

Aux États-Unis, l'administration Biden avait mis en place un système d'évaluation des politiques climatiques en utilisant une valeur carbone d'environ 200 euros par tCO₂, mais Donald Trump a supprimé cette référence et interdit à son administration de l'utiliser dès son retour à la Maison Blanche en janvier 2025.

Malgré ses ambitions en matière de décarbonation et l'impact des mesures mises en place sur le bien-être des Français et leur pouvoir d'achat, la France reste actuellement très éloignée d'une stratégie de décarbonation portée par la minimisation du sacrifice collectif. Nous n'avons pas jeté le thermomètre, comme Donald Trump : nous nous contentons de ne pas l'utiliser.

④ Ignorer les coûts : une approche terriblement coûteuse

L'ABSENCE DE CALCUL DU COÛT D'ABATTEMENT dans la décision publique n'est pas un détail méthodologique. Elle a des conséquences concrètes et mesurables, sur les finances publiques, sur le climat, et sur la cohésion sociale.

Un coût climatique : des bonnes actions évincées

Les budgets ne sont pas infinis. Chaque euro dépensé dans une action d'isolation d'un logement chauffé à l'électricité, à 9 900 €/tCO₂ en moyenne est un euro non dépensé dans une action à 30 ou 100 €/tCO₂. Pourtant, cette action aurait 100 à 300 fois plus d'impact. Cela n'empêche bien sûr pas un propriétaire de faire des travaux d'isolation pour améliorer son confort ou réduire sa facture en traitant un « pont thermique » spécifique. Mais orienter des moyens publics pour l'accompagner au nom de la décarbonation revient à sacrifier des gains supérieurs.

MaPrimeRénov' illustre ce mécanisme. Le programme a mobilisé entre 10 et 15 milliards d'euros depuis 2020. Orienter les mêmes budgets en privilégiant des dispositifs d'accompagnement à l'équipement en pompe à chaleur en remplacement de chaudières fioul (90 €/tCO₂) ou un accompagnement de l'accès au VE électrique (35 €/tCO₂) permettrait d'avoir un impact climatique très largement supérieur pour la même dépense publique. À budget équivalent, on peut accélérer fortement la décarbonation de notre pays.

Ces politiques peuvent bien sûr avoir des objectifs au-delà de la décarbonation. Mais en tout état de cause, ils doivent être intégrés dans un calcul coût-bénéfice qui puisse valider, ou non, la pertinence de la mesure pour la collectivité.

Un coût financier : des dépenses inutiles pour les ménages et les entreprises

Au-delà de l'efficacité de la dépense publique, c'est la minimisation du coût de la transition qui représente un enjeu politique et social majeur. La transition énergétique à venir sera coûteuse. Les gens devront la payer, que ce soit par le renchérissement des produits décarbonés, la hausse des impôts présents ou à venir pour financer les subventions vertes, ou, pour les détenteurs de patrimoine financier, par la baisse de la rentabilité de leurs actifs. En parodiant la célèbre proclamation de George Bush père à la Conférence de la Terre de Rio en 1992, nous allons devoir négocier notre mode de vie face aux désastres écologiques qu'induirait son maintien. Mieux vaut négocier en connaissance des coûts minimisés.

Or l'allocation actuelle des efforts concentre les ressources sur des secteurs et des actions coûteux, au détriment des actions les plus efficaces. Ce n'est pas seulement un problème d'argent public : c'est un problème de pouvoir d'achat des ménages. Chaque point de surcoût inutile dans la transition se traduit par une pression supplémentaire sur les budgets des familles.

Un coût politique : le backlash climatique

Pour une partie des experts du climat, parler des coûts de la transition peut prêter le flanc à la critique d'un certain climato-scepticisme. Nous pensons

au contraire que c'est l'occultation de la vérité des coûts qui a contribué à l'important backlash climatique actuel. En condamnant « l'écologie punitive » et en promouvant une transition climatique heureuse, réduisant la facture d'électricité, et pourvoyeuse de millions d'emplois bien payés, on a créé un mythe qui s'écaille très rapidement. L'acceptabilité sociale de la transition énergétique doit aujourd'hui se reconstruire sur la réalité de ses coûts et

de leur distribution entre consommateurs, producteurs et générations futures à travers l'endettement public.

Les politiques coûteuses et peu efficaces ont enfin un autre effet pervers : elles finissent par être abandonnées après avoir grevé les finances publiques et fragilisé la confiance dans la transition elle-même. Le cas du photovoltaïque et du Grenelle de l'environnement en est l'illustration la plus éloquent.

L'absence d'explicitation des coûts des efforts de décarbonation rend les politiques climatiques aveugles aux impacts économiques et sociaux de notre ambition collective écologique. Elle introduit un dangereux relativisme dans l'établissement des priorités politiques, augmente le coût global de la transition et renforce le pouvoir des lobbies.

L'occultation de la vérité des coûts a contribué au backlash climatique.

*** Cas d'école :
Le Grenelle de l'environnement
et le photovoltaïque (2009-2012)**

Entre 2009 et 2012, les tarifs de rachat garantis de l'électricité solaire ont atteint jusqu'à 600 €/MWh — soit plus de dix fois le coût marginal de l'électricité nucléaire française. L'objectif affiché était de développer la filière solaire nationale. Le résultat a été une ruée spéculative et des installations majoritairement importées. Devant le coût considérable du dispositif et des résultats très modestes, l'État a finalement plafonné, puis supprimé ces tarifs garantis à partir de 2012, en cassant au passage la dynamique de la filière naissante, et après avoir créé une dette contractuelle de long terme impossible à remettre en cause.

Avec un surcoût du MWh de 550 € pour un maigre gain de 30 gCO₂/kWh, le coût d'abattement de la mesure, s'il avait été mesuré à l'époque, aurait dépassé la somme stratosphérique de 18 000 €/tCO₂. En effectuant ce simple calcul, on aurait révélé l'absurdité du dispositif et évité une mesure qui aura coûté plusieurs dizaines de milliards d'euros aux Français pour un impact environnemental infime.

Nous payons encore la facture aujourd'hui. Les installations existantes bénéficient toujours de tarifs de rachat garantis et particulièrement élevés. Ils sont payés aujourd'hui via la contribution au service public de l'électricité (CSPE), désormais intégrée dans l'accise sur l'électricité. Elle représente plusieurs milliards d'euros par an de surcoût pour les ménages et les entreprises françaises.

Ce surcoût pèse sur la compétitivité industrielle et sur le budget des ménages. Mais surtout, il renchérit l'électricité de qui ralentit l'électrification des usages. Il a donc l'exact opposé de l'objectif climatique visé.

C'est le schéma typique d'une politique climatique mal calibrée : un effet de mode populaire à court terme, abandonné sous la pression des coûts, mais dont la facture perdure pendant des décennies.

⑤ Mettre en place une véritable gouvernance de la valeur carbone

UNE POLITIQUE AMBITIEUSE ET EFFICACE suppose la mise en place d'une gouvernance de la valeur carbone.

① Instituer l'évaluation systématique coût-efficacité carbone autour d'une valeur cible

Le calcul du coût d'abattement doit être systématique et obligatoire pour toute nouvelle politique climatique — norme, subvention, obligation, interdiction — à l'image du rapport Quinet pour l'investissement public en infrastructures. Ce calcul doit être réalisé de manière indépendante, publié avant tout vote parlementaire, régulièrement mis à jour et contrôlé par la Cour des Comptes. L'opinion publique doit en être informée. Sans boussole commune, l'inefficacité réglementaire, qui mine l'acceptabilité sociale de notre ambition climatique, a encore de beaux jours devant elle.

Les politiques publiques existantes doivent être intégralement revues à cette aune. Les dispositifs dont les coûts d'abattement sont trop élevés, qui pèsent sur le bien-être de nos concitoyens les plus vulnérables, doivent être supprimés, pour être remplacés par des dispositifs focalisés sur les actions efficaces.

Le Parlement doit ensuite définir démocratiquement une valeur cible du carbone, permettant de définir si une politique est éligible ou non. En fonction des ambitions politiques, on pourrait a minima cibler une valeur cohérente avec les dispositifs existants (système ETS en Europe), autour de 80 à 100 €/tCO₂, ou bien s'appuyer directement sur la valeur tutélaire du carbone de 256 €/tCO₂ s'inscrivant dans les objectifs 2030 de la France. Une trajectoire de hausse progressive pourrait être définie.

② Renforcer la cohérence environnementale du système de prix et de taxes

La fiscalité intègre déjà un certain nombre d'incitations de prix du carbone, négatif ou positif. Il convient de s'assurer que ces incitations sont cohérentes avec la valeur cible carbone.

Concrètement, il pourra s'agir par exemple de :

- * Soutenir le système européen ETS visant à décarboner l'industrie lourde, en s'assurant d'un mécanisme efficace de compensation aux frontières
- * Soutenir le système ETS 2 visant à décarboner l'énergie actuellement en examen à Bruxelles, qui incitera nos partenaires européens à accélérer leur sortie du charbon et améliorera la compétitivité de l'électricité décarbonée française
- * Réformer la fiscalité pesant sur l'électricité en tenant compte de ses effets environnementaux
- * Supprimer les subventions aux énergies fossiles qui subsistent

③ Réécrire une politique bas carbone ambitieuse, fondée sur l'efficacité

La revue des impacts environnementaux des différents dispositifs aboutit à revoir l'intégralité des politiques publiques en vue de maximiser l'impact environnemental des budgets engagés et de permettre à chaque secteur de s'orienter prioritairement vers des actions efficaces. Sur la base de nos estimations, les premiers éléments d'une telle politique sont décrits dans la partie suivante.

⑥⑥ *Les nouvelles priorités d'une décarbonation efficace*

LA LISTE DES ACTIONS ÉVALUÉES DANS CE RAPPORT ne se veut ni exhaustive ni définitive. Les analyses de coûts d'abattement doivent être affinées et complétées de mesures qui n'ont pas été analysées dans le présent rapport. Elles doivent intégrer en temps réel les progrès technologiques et scientifiques, qui peuvent rapidement et fortement modifier les calculs.

On peut toutefois esquisser les premières grandes orientations qui découlent de notre première analyse des coûts. Les secteurs sont classés par ordre décroissant de contribution aux émissions nationales de GES. Examinons-les séquentiellement.

Transports - accompagner la mutation vers l'électrique

- * Le secteur des transports émet 125 MtCO₂ (millions de tonnes), soit 34 % des émissions françaises de gaz à effet de serre.
- * Ces émissions sont stables depuis 1990, les gains d'efficacité énergétique des moteurs absorbant une hausse de 30 % du transport de passagers et de 40 % du transport de marchandises.
- * Le transport routier représente 94 % de ces émissions (soit 32 % des émissions totales françaises), dont plus de la moitié pour des véhicules particuliers.

Compte-tenu des enjeux, la décarbonation du transport routier est une priorité évidente d'une politique environnementale orientée vers l'efficacité. L'électrification du parc de véhicules particuliers peut se faire aujourd'hui avec un coût d'abattement très bas. L'électrification du parc poids lourds est également une étape essentielle, qui s'approche également aujourd'hui du seuil de rentabilité.

Il ne s'agit plus de faire naître un usage. L'objectif est désormais d'accélérer et faciliter la transition inévitable vers le véhicule électrique tout en réduisant son empreinte carbone à la fabrication. Il s'agit moins de subventionner un surcoût que de faciliter l'accès à un investissement rentable mais conséquent. En complément, des mesures d'accompagnement peuvent réduire les émissions du parc existant.

L'analyse des rendements carbone des différentes actions oriente vers les politiques suivantes :

- * Faciliter l'accès au véhicule électrique par des dispositifs de location-vente, pas uniquement « leasing social », en ciblant en priorité les gros rouleurs et en évitant les effets d'aubaine ;
- * Encourager le développement de la production européenne de batteries et de véhicules électriques, incluant des transferts de technologie des fabricants chinois ;
- * Faciliter la production de bioéthanol première génération, dans la limite de la disponibilité des sols pour éviter des tensions sur les surfaces agricoles, en évitant notamment une sur-réglementation excessive ;
- * Accompagner la production de biocarburants à fort impact, en limitant les contraintes réglementaires au strict nécessaire ; cesser les subventions aux biocarburants à impact trop faible.

L'enjeu est d'effectuer cette transition tout en accompagnant l'adaptation du tissu industriel européen.

Agriculture - accompagner la décarbonation et la capture carbone

- * L'agriculture / sylviculture émet 76 MtCO₂eq, soit 21 % des émissions françaises de gaz à effet de serre. C'est le deuxième secteur le plus contributeur aux émissions de GES.
- * Ces émissions ont diminué de 18 % depuis 1990.
- * L'élevage représente 60 % de ces émissions (soit 13 % du total France), essentiellement en raison des émissions de méthane des processus digestifs des ruminants.

Malgré son importance dans les émissions de GES, l'agriculture est mal couverte par les politiques de décarbonation, et encore peu documentée en matière de coûts d'abattement. La commission Criqui, qui évalue depuis 2019 les coûts d'abattement de différents secteurs, doit rendre ses conclusions sur le sujet. Il est sensible, les agriculteurs étant particulièrement soumis à une multitude de contraintes et d'injonctions contradictoires.

Il va pourtant falloir reprendre le fil d'une analyse sérieuse et solide des leviers potentiels de décarbonation, liés notamment à la nutrition des ruminants ou aux pratiques permettant d'économiser les engrais azotés. Les sources de décarbonation sont potentiellement très importantes et impliquent des gaz à effet de serre particulièrement puissants comme le méthane ou le protoxyde d'azote. En accompagnant les agriculteurs dans la transition et en s'assurant que les produits importés non soumis aux mêmes contraintes soient taxés en due proportion, la France pourrait construire un avantage concurrentiel grâce à une agriculture décarbonée.

Agriculture : il est temps de reprendre l'analyse !

L'approche micro-économique de la Commissions Criqui, qui documente sérieusement les leviers de décarbonation, doit se prolonger sur les sujets agricoles. Ce secteur a besoin de piloter sa décarbonation, au sein des différentes priorités qu'elle dessine pour son futur. Une production largement décarbonée peut être un levier majeur de souveraineté agroalimentaire et une source d'exportations pour la filière.

Industrie - renforcer le système européen existant

- * L'industrie (incluant la construction) émet 63 MtCO₂, soit 17 % des émissions françaises de gaz à effet de serre.
- * Ces émissions ont fortement diminué de 55 % depuis 1990, bien que la valeur ajoutée de l'industrie ait augmenté de 20 % pendant la même période.
- * La production de produits de base intensifs en CO₂ (chimie, acier, ciment, chaux, verre) représente environ les deux-tiers de ces émissions.

L'amélioration des processus industriels a déjà largement permis de décarboner l'industrie. Les émissions du secteur ont été divisées par deux en 35 ans. Contrairement aux idées reçues, il ne s'agit pas d'une conséquence d'une désindustrialisation, puisque la valeur ajoutée du secteur a augmenté de 20 % sur la même période. Il s'agit bien d'une amélioration continue des procédés et méthodes de production, dont une grande partie consiste en des gains d'efficacité qui améliorent la rentabilité des entreprises.

L'industrie lourde est aujourd'hui soumise à une tarification du carbone par le système ETS européen. Il s'agit d'un système de quotas échangeables qui résulte en un prix carbone de référence. Le prix de la tonne de CO₂ évolue actuellement dans une fourchette de 70 à 90 €.

C'est un outil efficace pour accélérer la décarbonation : chaque projet industriel est évalué à l'aune de ce coût, ce qui oriente naturellement les investissements vers les solutions inférieures au coût des solutions. Depuis la mise en place du système en 2005, les secteurs couverts ont vu leurs émissions baisser de 40 %.

Il doit toutefois être renforcé, notamment par le renforcement du système d'ajustement de prix aux frontières, qui évite que des produits importés non soumis à cette tarification soient avantagés. Ce système doit en particulier être étendu aux produits manufacturés.

Bâtiment - focaliser les actions vers la sortie du fioul et du gaz

- * Les usages des bâtiments (résidentiel + tertiaire) émettent 57 MtCO₂, soit 15 % des émissions françaises de gaz à effet de serre.
- * Ces émissions ont fortement diminué de 39 % depuis 1990, malgré une hausse de 58 % des surfaces habitées et de 80 % de la valeur ajoutée du tertiaire.
- * Le chauffage, l'eau chaude sanitaire et la cuisson représentent 83 % des émissions.
- * Le résidentiel représente les deux-tiers des émissions, le tertiaire un tiers.

En matière de logement, l'amélioration des performances énergétiques des bâtiments et l'électrification des usages ont permis de réduire fortement les émissions, malgré une hausse marquée des surfaces. L'électrification du mode de chauffage permet notamment de réduire les émissions de gaz à effet de serre, avec un coût d'abattement réduit.

Cependant, le programme d'aides publiques pour l'isolation tel qu'il a été conduit a produit des résultats mesurés extrêmement faibles, malgré des moyens considérables investis. Une mise en œuvre défailante et des effets rebonds ont largement réduit les effets positifs escomptés. Il n'est pas raisonnable d'investir plusieurs milliards d'euros d'argent public et privé dans un dispositif actuel qui produit des résultats environnementaux si médiocre. En l'état actuel, il n'a pas de raison objective de perdurer, et doit être remplacé par un dispositif focalisé sur des chantiers à l'efficacité démontrée en amont et mesurée en aval des travaux, en se concentrant sur les logements chauffés au gaz et au fioul.

L'isolation du bâtiment reste bien sûr un levier efficace dans de nombreux cas. Si elle est bien effectuée, elle permet un gain énergétique et de confort amenant une amélioration de la valeur du logement qu'il faut prendre en compte. Son gain marginal doit toutefois être évalué au cas par cas, afin de s'assurer d'un coût socio-économique acceptable. En cas de complément de financement public, le maître d'œuvre doit également être tenu garant des performances thermiques obtenues.

Il est de ce point de vue sain de maintenir un diagnostic de performances thermiques, a minima dans une logique de transparence du marché, à réaliser avant et après travaux. Le dispositif actuel est toutefois complexe et très théorique. Les résultats obtenus peuvent largement varier en fonction de celui qui les réalise. Les chiffres réels sont sans commune mesure avec la théorie : un rapport du CAE de 2024 sur les consommations réelles montre une surconsommation de 86 % des logements en classe G plutôt qu'en classe A, quand la mesure théorique prédit un écart de 560 %.

Il serait donc préférable de faire un test « réel », sur la base de mesures obtenues par un protocole de test normé de mise en température d'un bâtiment ou d'un logement. Saint Gobain a par exemple développé et mis à disposition en octobre 2025 une méthode pour mesurer l'isolation réelle d'un logement sur la base d'un test thermique, en quelques heures. La réécriture de la norme sur la base d'un tel test permettrait une fiabilité bien supérieure.

En revanche, les interdictions de location liées au DPE (diagnostic de performance énergétique) doivent être largement interrogées. Elles incitent à une action de décarbonation dont le coût socio-économique apparaît très excessif. En outre, les impacts sociaux de cette interdiction peuvent être considérables et doivent en être évalués, tout particulièrement dans le contexte d'une très forte baisse de l'offre locative depuis trois ans. Les enjeux multiples liés au logement dépassent le champ de ce rapport, et il va de soi que les logements insalubres ou indécents doivent rester en dehors du champ locatif ; mais le seul

plan de l'impact carbone ne justifie pas d'interdire la location des « passoires thermiques », notamment celles bénéficiant d'un chauffage électrique ou pouvant en être équipées.

Les mesures découlant naturellement de notre analyse seraient donc :

- * Suppression de MaPrimRenov et remplacement par des aides ciblées sur des projets à fort impact démontré, avec nécessité d'une évaluation coût-bénéfice par projet a priori et a posteriori ;
- * Revue en profondeur des interdictions liées au DPE ;
- * Revue des normes de construction (RE 2020) en les focalisant uniquement sur les actions à fort rendement environnemental ; ces normes pourraient également être partiellement remplacées par l'extension du système ETS à la construction actuellement évoquée à l'échelle européenne (système ETS 2) ;
- * Lancement d'un plan massif d'équipement en pompes à chaleur, autour d'un dispositif de leasing permettant aux particuliers de financer leur équipement grâce aux économies de chauffage ;
- * Suivi de l'évolution des coûts d'abattements des alternatives au gaz (biogaz, gaz de synthèse, hydrogène) pour convertir les installations existantes le moment venu.

Énergie - développer la production décarbonée

- * La production d'énergie émet 33 MtCO₂, soit 9 % des émissions françaises de gaz à effet de serre.
- * Ces émissions ont très fortement diminué de 58 % depuis 1990.
- * La production d'électricité représente 32 % de ces émissions, le reste étant constitué du raffinage et de la transformation des combustibles fossiles, du chauffage urbain et du traitement des déchets.

La France dispose d'une énergie électrique largement décarbonée, dont elle est aujourd'hui excédentaire. L'enjeu est désormais l'électrification des usages, notamment en matière de mobilité et de chauffage. Cela suppose d'augmenter la disponibilité de l'énergie décarbonée afin d'éviter l'appel des capacités de production à base d'hydrocarbures. De nombreux leviers peu onéreux voire rémunérateurs sont accessibles :

- * Faciliter la mise en place de moyens de d'effacement et de stockage de l'énergie (parcs de batteries, « vehicle-to-grid », effacement) en utilisant les leviers réglementaires (facilitation des procédures, accès au réseau, tarification incitatives) ;
- * Faciliter la mise en place de grandes installations d'énergie renouvelables à coût d'abattement acceptable, en intégrant toutefois dans le coût social les externalités négatives ;
- * Supprimer les aides à impact environnemental limité, notamment le soutien au petit photovoltaïque ;
- * Développer les capacités de production d'énergie en suivant et anticipant l'évolution des coûts des technologies afin d'orienter les investissements vers

les moyens les plus efficaces, notamment en matière d'arbitrage entre nucléaire et renouvelables.

Utilisation des sols et forêts - défendre et reconstituer les puits de carbone

* L'utilisation des terres permet de capter 37 MtCO₂, ce qui compense 10 % des émissions françaises de gaz à effet de serre. La croissance de la forêt et, dans une moindre mesure, des prairies, absorbe en effet 55 MtCO₂ par an, faisant plus que compenser les émissions des terres cultivées et des zones artificialisées (18 MtCO₂).

* Cette capacité s'est améliorée depuis 1990 (+67 %), mais en deux temps : d'abord une forte amélioration jusqu'en 2004 (+150 %) ; puis une forte dégradation surtout depuis 2013 (-33 %).

* La baisse récente du puits de carbone s'explique par la hausse de la mortalité, notamment du fait des sécheresses, le ralentissement des peuplements et la hausse des prélèvements.

La forêt française est un atout essentiel dans la baisse de l'empreinte carbone française. Depuis 15 ans, elle souffre particulièrement notamment en raison du réchauffement climatique. Sa défense, son développement et sa restauration ont des co-bénéfices majeurs en matière de biodiversité, de qualité du patrimoine naturel, de développement des territoires et de bien-être. Les coûts d'abattement sont favorables et justifient un renforcement de l'action en faveur de la forêt, qui doit être largement remontée dans la liste des priorités, et pas uniquement lors des épisodes d'incendies d'été. Il peut et doit y avoir une politique active de soutien d'une forêt entretenue, économiquement viable, et qui ne soit pas qu'un levier d'optimisation fiscale passive. L'utilisation d'une logique coût / bénéfice construite sur les coûts d'abattement inciterait notamment à revoir les projections de prélèvements, inciter au reboisement par mélange d'essences et rémunérer les externalités positives.

07 Conclusion

Une meilleure allocation des efforts permettrait de décarboner davantage en dépensant moins.

AU-DELÀ D'UN PUR OBJECTIF D'EFFICACITÉ économico-écologique, la minimisation du coût de la transition constitue un objectif nécessaire à son acceptabilité sociale. La dispersion des coûts d'abattement que ce rapport met en évidence est un fait à la fois essentiel et ignoré de la politique climatique française. Elle implique qu'une meilleure allocation des efforts permettrait de décarboner davantage en dépensant moins, ou de maintenir nos objectifs

climatiques en réduisant significativement le coût pour les ménages et les entreprises. Nos propositions visent donc à renforcer l'acceptabilité sociale de notre ambition climatique et à l'accélérer en la rendant soutenable sur le plan financier.

En cumul, le périmètre accessible des actions peu onéreuses en carbone (transport routier électrifiable, industries lourdes, chauffage électrique des bâtiments, production d'électricité décarbonée) représente environ les deux-tiers de l'empreinte nationale, sans compter le potentiel de reforestation et les actions non encore analysées, notamment en matière d'agriculture. Le potentiel d'abattement sur les seuls leviers logement, électrification des véhicules routiers et industrie est estimé par le ministère de l'économie à 185 millions de tCO₂, soit plus de la moitié des émissions nationales. En d'autres termes, le potentiel de réduction des émissions par des actions à un coût raisonnable permet largement de garder voire de remettre la France sur une trajectoire ambitieuse dans les dix prochaines années, sans disperser les moyens dans des actions chères et à faible impact.

L'absence de vision sur les coûts des efforts de décarbonation rend les politiques climatiques aveugles aux impacts économiques et sociaux de notre ambition collective écologique. Elle introduit un dangereux relativisme dans l'établissement des priorités politiques, augmente le coût global de la transition et renforce le pouvoir des lobbies. Nous recommandons la mise en place d'une vraie stratégie d'évaluation indépendante des politiques climatiques, avec une obligation pour chacune d'entre elles d'une évaluation transparente et opposable de son coût collectif par tonne de CO₂ évitée.

En 2027, l'exécutif nouvellement élu devra engager une nouvelle stratégie en matière de décarbonation, qui emmènera notre pays vers l'échéance de 2050. Trois questions doivent être posées aux candidats à l'élection présidentielle :

* Sont-ils prêts à mettre en place une évaluation indépendante et systématique des politiques climatiques ?

* Sont-ils prêts à orienter les priorités vers les mesures les plus efficaces, quitte à supprimer des dispositifs trop onéreux et réorienter leurs budgets ?

* Sont-ils prêts à chiffrer leurs programmes environnementaux pour dire combien coûtera leur stratégie de décarbonation, pour l'atteinte de quel objectif ?



* *À propos des auteurs*

CE RAPPORT A ÉTÉ ÉCRIT par Christian Gollier et François-Xavier Oliveau, avec le soutien de Nicolas Vanbremeersch. Il a substantiellement bénéficié de nombreuses relectures attentives, bienveillantes et exigeantes, parmi lesquelles celle de Didier Roux, membre de l'Académie des sciences et de l'Académie des technologies, et celle de l'équipe énergie/environnement d'Alcimed. Ces relectures ont porté sur la méthode, les hypothèses et les données mobilisées ; elles ne valent en aucun cas approbation de l'ensemble des analyses et conclusions du rapport, qui n'engagent que leurs auteurs. Les éventuelles erreurs ou imprécisions qui pourraient subsister relèvent également de la responsabilité des seuls auteurs.



Christian Gollier

Économiste

Christian Gollier est économiste, spécialiste de l'économie de l'incertain et de l'économie de l'environnement en passant par la finance, la consommation, l'assurance et l'analyse des coûts-bénéfices, avec un intérêt particulier pour les effets durables à long terme. À l'origine de Toulouse School of Economics avec Jean Tirole en 2007, il en est le directeur depuis 2009 (avec une interruption en 2015-2016). Il a publié plus d'une centaine d'articles dans des revues scientifiques internationales. Il a également publié 7 livres sur le risque dont *The Economics of Risk and Time* (MIT Press), qui a remporté le Paul A. Samuelson Award (2001). En 2012, il a publié chez Princeton University Press un livre intitulé *Pricing the Planet's Future*, qu'il a présenté au 6th Arrow Lecture à l'université Columbia.

Christian Gollier est l'un des auteurs des 4^e et 5^e rapports du Groupe d'experts intergouvernemental sur le changement climatique (IPCC, 2007 et 2013). En outre, il conseille régulièrement plusieurs gouvernements (France, UK, USA, Norvège...) sur leur politique d'évaluation des investissements publics. Il est président de l'EAERE, l'association européenne des économistes de l'environnement. Son récent ouvrage grand public *Le Climat après la fin du mois* (PUF 2019) traite de l'importance d'agir face au changement climatique et a connu un grand succès en France. Son dernier ouvrage est « Économie de l'(in)action climatique » (PUF, 2025).



François-Xavier Oliveau

Directeur associé d'Initiative & Finance

François-Xavier Oliveau est directeur associé d'Initiative & Finance, où il accompagne la transformation opérationnelle et environnementale d'entreprises de taille intermédiaire. Il a une expérience de plus de 20 ans dans la direction d'activités et le conseil, notamment chez Air Liquide, Schneider Electric et au Boston Consulting Group.

Il possède une forte expérience dans de multiples secteurs liés à la transition environnementale, notamment les automatismes des bâtiments, l'éclairage LED, la conversion d'énergie, les piles à combustible, les gaz industriels, les matières organiques et le recyclage.

François-Xavier Oliveau est ingénieur de l'École Centrale Paris et diplômé de Sciences Po Paris. Il est titulaire d'un MBA de la Harvard Business School.

Essayiste, il contribue régulièrement au débat public, notamment sur les impacts économiques, sociaux et environnementaux de la technologie. Il a publié *Microcapitalisme* (PUF, 2017) et *La crise de l'abondance* (Éditions de l'Observatoire, 2021).

✧ À propos d'Écologie & Solutions

Et si on remettait l'écologie en mouvement ?

Il y a, au fond de chaque Français, l'envie d'une vie en harmonie avec la nature. Ce désir n'a pas faibli, malgré les doutes, malgré la polarisation des débats, et il devient chaque jour plus criant. Il est même, dans notre pays, l'un des rares horizons qui rassemble encore. Le défi n'est plus de prendre conscience, ou de faire naître une conviction largement partagée : il s'agit de lui donner enfin les moyens d'avancer.

Nous voulons aider l'écologie à se remettre en mouvement vers des solutions.

Notre mission est de nourrir le débat public et la décision politique pour faire émerger une trajectoire de progrès en matière d'écologie. Pour Écologie & Solutions, la transition écologique n'est pas une régression à organiser, mais une aventure humaine collective d'ingénierie, d'innovation, et de choix publics dont l'homme et son esprit entrepreneurial sont les héros. Nous cherchons à faire émerger une écologie de l'abondance et du bien-être de l'homme, en harmonie avec la nature.

Nos valeurs sont celles du pragmatisme, de l'optimisme, de la rigueur, de l'indépendance et du réalisme politique. Nous cherchons des voies et solutions qui intègrent les progrès technologiques, et les réalités économiques et politiques pour que l'humain chemine dans la meilleure relation possible avec une nature préservée et qui se régénère. Nous cherchons à agir sur les trois dimensions qui peuvent faire avancer une écologie de solutions : la culture, la gouvernance et les politiques publiques.

Nous voulons agir en complémentarité et en dialogue avec les acteurs économiques, politiques et sociaux, les entreprises, les associations, les collectifs et les individus. Les bonnes solutions s'élaborent avec, et pas contre eux, en réunissant les conditions d'un dialogue de confiance permettant seule la mise en mouvement des hommes et des femmes.

Nos partis-pris pour faire avancer les solutions

Partir du débat public

Nous voulons nourrir la conversation civique tant dans les media que sur les réseaux sociaux. Tout commence par la circulation des idées.

Le dialogue comme clé

Nous voulons recréer des conditions d'un dialogue qui ne soit pas une simple mise en scène. L'écologie doit trouver les voies de nouvelles manières de dialoguer, pour que les polarisations se réduisent, et que des solutions émergent.

Toujours proposer

Nous voulons proposer, pas juste alerter. Concevoir des solutions inédites, s'inspirer d'ailleurs quand c'est opportun, chercher des regards neufs sur les défis qui sont les nôtres, identifier ce qui peut changer, regarder loin devant.

L'humain au cœur

Nous voulons aider à replacer l'action de l'homme au cœur des solutions au défi de l'écologie. C'est à son génie propre d'inventer les voies et modes de la transition.

La raison et la science

Nous voulons fonder nos travaux et propositions sur le raisonnement, l'expérimentation et la science.

Accélérer plutôt que ralentir

Nous voulons penser à ce qui doit être amplifié, accéléré, réussi plus qu'à ce qu'il s'agit d'abandonner et faire disparaître. L'écologie doit être le fruit de la croissance de ce qui marche et non le signal de l'arrêt de l'aventure humaine.

Nos valeurs

Pragmatisme

Nous cherchons les solutions et les possibles, qui font avancer vers le succès, plus que l'affichage ou la recherche d'impossibles.

Optimisme

Nous voulons faire émerger des solutions constructives, des trajectoires, plus que désigner des coupables ou mettre en avant des catastrophes.

Rigueur

Nos travaux s'appuient sur la science, l'économie, les données, et reposent sur l'étude sérieuse des propositions faites chez nous et autour de nous.

Indépendance

Nos analyses ne sont dictées par aucun parti ou organisation elles sont le fruit de travaux conduits en toute liberté.

Réalisme politique

Nous proposons des solutions compatibles avec les contraintes du réel, budgétaires, démocratiques et sociales, qui doivent être prises en compte mais pas enfermer dans l'inaction.

Que faisons-nous ?

Nous voulons agir sur trois dimensions :

La culture

Comprendre et nourrir ce qui fait bouger les citoyens et entreprises, et travailler vraiment, en positif, les couches de récits et imaginaires dont notre société a besoin pour avancer.

La gouvernance

Comprendre et proposer de nouvelles manières de gouverner les défis écologiques, qui sortent d'une culture de planification multilatérale et descendante, pour chercher l'impact.

Les politiques

L'exploration des mesures, des incitations, des régulations, pour challenger et proposer, en partant non pas des catégories de l'écologie, mais de la politique, de la vie quotidienne (être riche, se loger, se déplacer, se nourrir, ...).

Nous voulons le faisons autour de quatre modes d'action :

- * Travailler en collectif pour proposer de nouvelles manières de faire, dans le temps long, en sortant de la pensée administrative française pour chercher du souffle et de l'innovation.
- * Dialoguer avec patience et respect. Nous allons inventer de nouveaux formats de dialogue et confrontation positive, patiente, autour des défis que nous devons affronter. L'écologie ne doit pas s'imposer, mais dialoguer avec la logique et les défis qui déterminent et contraignent la politique et l'économie.
- * Animer le débat public, dans les médias et les réseaux sociaux, pour que les idées neuves, positives, pragmatiques d'une écologie qui avance peuvent et doivent être défendues. Nous voulons faire naître et vivre des idées neuves.
- * Initier des projets. Faire vivre des idées et mettre en mouvement suppose souvent plus que du dialogue ou des rapports. Nous serons à l'initiative de projets, outils, actions pour que se crée le mouvement. Nous sommes un think-tank, aspirons à devenir do-tank.

Nous plaçons l'innovation et l'invention au cœur de notre aventure :
l'écologie a plus besoin de moteurs, d'idées et d'essais que d'institutions.
À nous de les rendre possibles !

Qui sommes-nous ?

Nous sommes un collectif d'hommes et femmes, issus du monde de l'entreprise, ambitieux pour la trajectoire écologique de notre pays. Nous nous engageons, pour construire les moyens de cette ambition. Ce collectif est le début d'une aventure, qui ne veut pas être celle d'un secteur, d'un acteur, d'une organisation mais est collégiale dès ses débuts et le sera dans son fonctionnement.

Il a vocation à s'enrichir et s'élargir : notre force viendra du réseau que nous construirons.

Nous constituons une équipe permanente, pour animer les travaux et projets du think-tank, autour de notre délégué général.

Le délégué général



Nicolas Vanbremeersch

Délégué général Écologie & Solutions

Nicolas Vanbremeersch est un jardinier des idées, du débat et des initiatives. Entrepreneur, auteur et blogueur, il a fondé et dirigé l'agence Spintank, dédiée à l'accompagnement des transitions et au débat public, présidé le think-tank Renaissance numérique, conseillé des dirigeants publics et privés, et écrit et travaillé aux côtés de nombreuses entreprises, ONG, think-tanks et publications dédiées à faire avancer la société. On le trouve sur les réseaux sociaux sous le pseudonyme de *Versac*.

Nous soutenir

Écologie & Solutions naît de la société civile et de l'entreprise, et veut, dans un pays marqué par une culture d'État forte, rester pleinement ancré dans la société, indépendant et connecté à la réalité économique des aventures humaines que sont les entreprises.

Notre méthode est entrepreneuriale : agilité, exigence de résultat, refus des postures, confrontation au réel.

Devenir mécène, c'est soutenir une initiative ambitieuse, indépendante, rigoureuse, au moment critique où notre société a du mal à faire naître et se concrétiser des solutions au défi vital de sa relation avec la nature. C'est aussi rejoindre un groupe de dirigeants et d'entrepreneurs qui veulent faire vivre la prospérité et l'écologie ensemble, et ont décidé d'en inventer des voies nouvelles.

Plusieurs formes d'engagement sont possibles, du grand mécénat fondateur au soutien ponctuel. Parlons-en.

*** Contactez-nous !**

ecologie-solutions.fr



✱ *Bibliographie*

- Abitbol, M., P. Aghion, C. Antonin, L. Barrage and B. Lengereau (2026). *Green AI in Industry : Quasi-Experimental Evidence from the Water Treatment Sector*. Mimeo, Collège de France.
- Académie des Technologies (2023). *La décarbonation du secteur aérien par la production de carburants durables*.
- ADEME (2010). *Guide des facteurs d'émissions* (version 6.1).
- ASFA (2025). Chiffres clés 2024. Association des Sociétés Françaises d'Autoroutes.
- Astier, J., Salem, A., Fack, G., Fournel, J., Maisonneuve, F. (2024), *Performance énergétique du logement et consommation d'énergie : les enseignements des données bancaires*, Conseil d'Analyse Économique.
- Astier, N. et F.A. Wolack (2026). *Nuclear operations with high penetration of renewables : The case of France*. NBER Working paper 34662.
- Baba Moussa, W., Pauron, A., Salomond, J.-B., et Sixou, J. (2025). *Effets de l'isolation thermique des logements sur la consommation réelle d'énergie résidentielle*. INSEE, Étude n° 2025/16.
- Busch, J., Bukoski, J. J., Cook-Patton, S. C., Griscom, B., Kaczan, D., Potts, M. D., Yi, Y., & Vincent, J. R. (2024). *Cost-effectiveness of natural forest regeneration and plantations for climate mitigation*. Nature Climate Change, 14(9), 996-1002.
- BFE (2022). *Decarbonizing cement*. Bundesamt für Energie BFE et ETH.
- CGDD (2016). *RT 2012 : surcoûts et économies d'énergie dans la construction de maisons individuelles*.
- CGDD (2018). *Réduction des vitesses sur les routes*. Analyse coûts-bénéfices. Théma n° 24.
- Criqui, P. (2021). *Les coûts d'abattement*. Partie 2 — Transports. Rapport à France Stratégie.

- Criqui, P. (2022). *Les coûts d'abattement*. Partie 5 — Logement. Rapport à France Stratégie.
- Criqui, P. (2023). *Les coûts d'abattement*. Partie 6 — Ciment. Rapport à France Stratégie.
- Criqui, P. (2024). *Les coûts d'abattement*. Partie 7 — Acier. Rapport à France Stratégie.
- DGITM (2019). Valeurs recommandées pour le calcul socio-économique. Ministère de l'écologie.
- DHUP (2022). *Simulations d'impact tarifaire de la RE 2020 sur la construction neuve*.
- Dierks, K. (2026). *Optimal storage capacity with intermittent wind energy*. Mimeo, Toulouse School of Economics.
- Direction générale du Trésor & Direction générale des Entreprises, *Les coûts d'abattement : euros dépensés par tonne de CO₂eq éliminée — Un outil d'analyse des leviers de décarbonation de l'économie*, septembre 2024.
- Favero, A., et K. Austin, (2026), *Charting our forest future : national supply curves for forest-based CO₂ mitigation*. npj Climate Action 5, 6.
- Glenk, G., Kelnhofer, A., Meier, R. et Reichelstein, S. (2024). *Cost-Efficient Decarbonization of Portland Cement Production*. Harvard Business School, Working Paper 24-025.
- Gollier, C. (2025). *Économie de l'(in)action climatique*. Presses Universitaires de France.
- Gössling, S. et Humpe, A. (2020). *The global scale, distribution and growth of aviation*. Global Environmental Change, Volume 65.
- Greenstone, M. et Nath, I. (2021). *Fueling technology deployment with a clean electricity standard*. EPIC, University of Chicago.
- Hasanbeigi, A. et al. (2024). *Green Steel Economics*. Global Efficiency Intelligence.
- IGN — Institut national de l'information géographique et forestière. Indicateurs de gestion durable des forêts françaises : séquestration de carbone en forêt.
- Les Coopératives Forestières — UCFF. (2024). Bilan du plan de renouvellement forestier France Relance, 2021-2023.
- Llamas-Orozco & al. (2023), *Estimating the environmental impacts of global lithium-ion battery supply chain: A temporal, geographical, and technological perspective*, PNAS Nexus, Volume 2, Issue 11.
- Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire. Fonds France Nation Verte — Renouvellement forestier. Décret n° 2021-54 du 22 janvier 2021, modifié par le décret n° 2022-1428 du 10 novembre 2022.

- Percebois, J. et Pommeret, S. (2024). *Les coûts cachés de l'électricité*. Reflets de la physique, pp. 155-161.
- Pisani-Ferry, J., Mahfouz, S. (2023). *Les incidences économiques de l'action pour le climat*. France Stratégie.
- Rivaton, R. (2025). *Rapport RE 2020*. Fondation pour la Croissance Responsable.
- RTE (2022). *Futurs énergétiques 2050*. Réseau de Transport d'Électricité.
- Sievert, K., Schmidt, T. et Steffen, B. (2024). *Considering technology characteristics to project future costs of direct air capture*. Joule, 8, 979-999.
- Sougkakis, V. & al. (2021), *Field testing of the QUB method for assessing the thermal performance of dwellings: In situ measurements of the heat transfer coefficient of a circa 1950s detached house in UK*, Energy Buildings
- Ueckerdt, F. et al. (2021). *Potential and risks of hydrogen-based e-fuels in climate change mitigation*. Nature Climate Change.
- Watari, T. et al. (2025). *Global stagnation and regional variations in steel recycling*, Resources, Conservation and Recycling.
- Quinet, A. et al. (2023). *La valeur de l'action pour le climat — Quinet-3*. Commissariat Général au Plan.
- Yousefpour, R., Augustynczyk, A. L. D., Reyer, C. P. O., Lasch-Born, P., Suckow, F., & Hanewinkel, M. (2018). *Realizing mitigation efficiency of European commercial forests by climate smart forestry*. Scientific Reports, 8, 345.



✱ *Annexes scientifiques*

LES ANNEXES CI-APRÈS reproduisent les fiches de calcul détaillées sur lesquelles s'appuie le corps du rapport. Chaque fiche présente la méthodologie, les hypothèses et les résultats pour une action ou un secteur donné.

Le coût total de l'action se définit comme la différence entre son coût social et son bénéfice social, à la seule exclusion de son bénéfice climatique. Son coût social intègre l'ensemble des suppléments de coûts induits par cette action par rapport au statu quo.

Par exemple, s'il s'agit de l'installation d'un panneau photovoltaïque, il faut intégrer le coût de l'intermittence de sa production. S'il s'agit d'une baisse du thermostat dans un logement en hiver, il faut tenir compte de la valeur de l'inconfort que cet éloignement par rapport à l'optimum de température ambiante qu'il implique. S'il s'agit de l'usage des transports en commun, il faut tenir compte de la valeur du supplément de temps et d'inconfort de cette mobilité par rapport à la voiture individuel qui a été longtemps la référence hors des grands centres urbains.

Les coûts sociaux doivent aussi intégrer les subventions publiques, qui ne sont que des transferts de coût entre agents économiques. Par exemple, l'estimation du coût social de la bascule du thermique vers l'électrique dans les mobilités doit se faire sur la base des coûts des énergies nettes de leur fiscalité respective.

En ce qui concerne les bénéfices sociaux, on peut faire le même commentaire. Le terme de « co-bénéfice » est souvent utilisé pour désigner des impacts positifs d'une action de décarbonation autres que la baisse des émissions de gaz à effet de serre. Par exemple, la réduction de la vitesse sur autoroute réduit les pollutions aux particules fines et les bulles d'ozone en été les jours sans vent. Elle réduit aussi la létalité des accidents. Le calcul du coût d'abattement nécessite que tous ces co-coûts et co-bénéfices soient convenablement mesurés.

Il faut aussi leur donner une valeur. Que vaut une vie sauvée ? Que vaut une heure perdue ? Que vaut un écosystème protégé ? Ces questions sont importantes et méritent que notre représentation démocratique nationale en fixe les valeurs respectives. En attendant, les institutions publiques de notre pays sont tenues d'utiliser une valeur statistique de la vie qui a été fixée en 2013 à 3 millions d'euros, et une heure perdue au volant à 32,8 €, comme recommandé par le ministère de l'écologie en 2019.

Annexe ① → Énergie

AVEC LE PLAN MESSMER, dès les années 70, la France a substitué progressivement l'électricité issue des énergies fossiles par de l'électricité nucléaire. Cette politique a permis de réduire le coût énergétique de la France grâce à un coût complet très compétitif du nucléaire de seconde génération, inférieur à 50 €/MWh. Beaucoup d'actions vertes, dans la mobilité, le résidentiel et l'industrie, passeront par l'électrification de leur source énergétique. La décarbonation du secteur électrique, combinée avec l'accroissement de sa capacité de production, est donc la mère de toutes les batailles de la transition énergétique.

L'électrification des usages (mobilité, chauffage, industrie) n'est désirable du point de vue du climat que si le mix électrique qu'elle utilise est décarboné. C'est essentiellement le cas en France en 2025 puisque 95 % de notre production électrique est déjà à faible intensité en carbone, grâce au nucléaire (67,5 %), l'hydraulique (11,4 %), l'éolien (9 %), le solaire (6 %) et les bio-carburants (0,9 %).

①.① Substitution marginale du charbon par du gaz naturel en Europe

En Europe, la stratégie de décarbonation la plus simple du mix électrique consiste à substituer le charbon par du gaz naturel dans nos centrales thermiques. En Europe (contrairement au continent nord-américain), le coût du méthane est plus élevé que celui du charbon par unité électrique produite. Percebois et Pommeret (2024) se fondent sur un coût du combustible de 40,72 €/MWh électrique pour le gaz naturel, et de 27,80 €/MWh électrique pour le charbon en 2024. Ils en déduisent un coût complet de 50,93 €/MWh pour le gaz naturel et 50,09 €/MWh pour le charbon, soit un surcoût de l'ordre de 1 €/MWh pour le gaz naturel.

Par contre, le gaz naturel émet beaucoup moins de CO₂ que le charbon pour produire de l'électricité. Selon l'ADEME, la combustion du méthane émet 0,418 tCO₂ par MWh électrique produit. L'émission des centrales au charbon est en moyenne de 1,060 tCO₂ par MWh électrique. Ainsi, en Europe, la substitution du charbon par du gaz naturel induirait un surcoût de 1 €/MWh permettant de réduire les émissions de 0,642 tCO₂/MWh. Cette stratégie induit un sacrifice sociétal de l'ordre de 2 €/tCO₂, qui dépend toutefois fortement de la fluctuation des prix du gaz et du charbon. À ce niveau, le surcoût peut donc être considéré comme nul.

①.② Substitution marginale du gaz naturel par de l'hydrogène

vert intersaisonnier

Le gaz naturel est une énergie de transition. La substitution du charbon par du gaz naturel ne peut donc être qu'une étape vers l'objectif ZEN. Une stratégie technologiquement mature de décarbonation résiduelle du mix électrique français consisterait à remplacer le gaz naturel par un gaz zéro-émission-nette, aux propriétés proches, et à l'offre flexible et contrôlable. En Europe, son coût actuel est compris entre 4 et 5,5 €/kg. Sa transformation en électricité par une turbine à gaz (cycle combiné) engendre entre 18 et 21 kWh par kg d'hydrogène. Cela signifie qu'actuellement en Europe produire un MWh électrique avec de l'hydrogène vert coûte entre 190 et 305 €/MWh. En supposant un LCOE du MWh au gaz naturel fossile de 50,93 €/MWh et une intensité carbone de 0 et 0,418 tCO₂/MWh pour respectivement l'hydrogène vert et le méthane fossile, on obtient un coût marginal d'abattement actuel compris entre 334 et 609 €/tCO₂. Pour le tableau de synthèse, nous retenons une valeur moyenne à 470 €/tCO₂.

L'usage de l'hydrogène vert pour produire de l'électricité n'a de sens que pour gérer les pointes de consommation en hiver. En effet, il n'est génériquement pas énergétiquement efficace de produire de l'hydrogène avec de l'électricité pour produire de l'électricité. Cela ne peut se faire que quand ce gaz naturel substitué par de l'hydrogène est utilisé en pointe en hiver, pour bénéficier du fait que l'hydrogène, contrairement à l'électricité, est stockable entre saisons.

①.③ Substitution marginale du nucléaire par du solaire en grande toiture

Un autre exercice relativement simple consiste à étudier un investissement marginal dans des panneaux photovoltaïque en France aujourd'hui. Le problème de l'intermittence de l'électricité solaire est plus limité en France qu'ailleurs grâce au caractère modulable de nos centrales nucléaires, tant que la part du renouvelable dans le mix électrique reste limitée. Mais en l'absence de renforcement de l'électrification des usages, les investissements électriques renouvelables ne contribuent que très marginalement à la décarbonation de nos économies puisqu'ils substituent une énergie décarbonée (le nucléaire) par une autre énergie décarbonée (le solaire et l'éolien).

Si on fait abstraction des périodes de crise énergétique en Europe, le prix du MWh électrique sur le marché spot en France a été d'environ 50 € durant la dernière décennie, ce qui révèle son coût marginal de production pendant la période. En France, ce mix électrique émet aujourd'hui 33 kgCO₂/MWh. Selon RTE (2022), la moyenne des coûts de production de l'électricité photovoltaïque à l'horizon 2030 est de 55 €/MWh pour le photovoltaïque sur grandes toitures. On retient comme valeur standard 23 kgCO₂/MWh d'émissions du PV avec une fabrication chinoise. En France, les panneaux PV en grande toiture sont légèrement plus chers que le mix électrique, et émettent légèrement moins de CO₂. On obtient un coût social de décarbonation de 500 €/tCO₂ pour le développe-

ment de l'électricité photovoltaïque à la marge en France.

Notons ici que, parce que la réduction des émissions de CO₂ sont très faibles dans cette analyse (le dénominateur du coût d'abattement est petit), cette estimation est très sensible à l'estimation du différentiel de LCOE entre nucléaire et solaire.

Dans cette analyse comme pour les autres, toutes les hypothèses comptent pour engendrer l'estimation. Il est important de ne pas lui donner un sens qu'elle n'a pas. Ainsi, il s'agit bien ici d'un investissement solaire marginal dans un mix dans lequel les autres sources de génération électrique sont parfaitement pilotables, sans coût d'effacement. L'intermittence est donc supposée sans coût dans ce contexte. Une tout autre analyse consiste à comparer un mix 100 % renouvelable, où la problématique d'intermittence joue nécessairement un rôle majeur, avec un mix largement nucléaire par exemple. Ce scénario est étudié en 1.5.

①.④ Comparaison d'un mix 100 % gaz naturel avec un mix 100 % nucléaire

Dans cette section et la suivante, nous prenons un angle d'analyse différent. Plutôt que de considérer une modification marginale d'un mix existant, nous comparons maintenant le coût de deux mixes, A et B. En partant d'une situation vierge, faut-il préférer le mix A ou le mix B ? Commençons par comparer un mix 100 % au gaz naturel avec un mix essentiellement composé de nucléaire.

Selon RTE (2022), en tenant compte d'un coût de l'aval du cycle de 10 €/MWh, le coût complet de génération électrique à partir du nouveau nucléaire pourrait être compris entre 80 €/MWh et 120 €/MWh. Ceci doit être comparé au LCOE de 50,93 €/MWh (Percebois et Pommeret (2024)) et l'intensité carbone de 0,418 tCO₂/MWh du gaz naturel, comparée à celle du nucléaire à 0,033 tCO₂/MWh. Le coût d'abattement induit par la substitution à la marge de gaz naturel par du nouveau nucléaire ressort donc entre 70 et 165 €/tCO₂. Nous prenons, pour la représentation graphique, la valeur médiane de 120 €/tCO₂. Le montant global du programme restant débattu, son coût d'abattement devra être tenu à jour en fonction de l'évolution des estimations.

①.⑤ Comparaison d'un mix 100 % gaz naturel avec un mix 100 % renouvelable

En France et en Europe s'affrontent deux visions polaires de la décarbonation du secteur électrique à long terme, orientés respectivement par la technologie nucléaire de 3^e génération et par un mix 100 % renouvelable. Une des difficultés du débat tient dans les incertitudes profondes qui pèsent sur les coûts complets de ces deux systèmes. En ce qui concerne la seconde option, ces incertitudes portent essentiellement sur le coût de l'intermittence, dans un monde zéro-émission-nette. Comment cette intermittence de la génération éolienne et solaire doit-elle être gérée, d'une part en temps réel à capacités données en fonction des prévisions météorologiques et de demande, ou du niveau d'éner-

gie stockée, et d'autre part en planification de long terme exprimée sous forme de capacités de génération et de stockage ? Soyons honnête : la réponse à cette question de nature scientifique et technique est loin de faire consensus parmi les experts. Il est donc difficile d'estimer un coût complet d'un mix 100 % renouvelable. En conséquence, l'estimation du coût d'abattement d'un investissement dans un mix 100 % renouvelable reste un défi majeur.

Parce que le stockage de l'électricité coûte encore très cher, le mix 100 % renouvelable est en l'état incapable de lisser complètement les intenses variations de génération électrique. Dans les périodes sans vent et sans soleil, un tel mix devra nécessairement intégrer de la flexibilisation de la demande et un surdimensionnement capacitaire substantiel. Quel est le coût social de cette flexibilisation de la consommation d'électricité ? Comment arbitrer entre ce coût de flexibilisation et coût de la capacité de stockage ? En temps réel, comment gérer un tel système électrique ? L'opérateur pourrait-il, pour soutenir la consommation, accepter de réduire le stock d'électricité quand le niveau des batteries atteint la côte d'alerte en pariant sur le retour prochain du vent, au risque de conduire au blackout ? Dierks (2026) utilise les méthodes les plus récentes de résolution numérique d'optimisation dynamique stochastique, en calibrant le processus stochastique de génération éolienne sur les données météorologiques allemandes. Pour chaque système électrique défini par les capacités de génération et de stockage, il en optimise la gestion en temps réel. Cela lui permet de mesurer l'utilité marginale engendrée par chaque élément du mix électrique. Finalement, cela lui permet d'optimiser le mix lui-même, de caractériser les capacités optimales solaire, éolienne et de stockage, et d'estimer le coût complet de ce mix électrique optimisé.

Dierks montre que si le stockage électrique se limite aux batteries, un mix électrique 100 % renouvelable, même optimisé, coûtera très cher. Son coût complet (LCOE) est compris entre 114 et 196 €/MWh. Si on compare ce mix 100 % renouvelable optimisé à un mix 100 % gaz naturel (coût complet de 50,93 €/MWh et l'intensité carbone de 0,418 tCO₂/MWh), on obtient un coût d'abattement compris entre 151 et 357 €/tCO₂. Nous prenons une valeur moyenne de 250 €/tCO₂.

Compte tenu de son coût, la batterie n'est pas une technologie pertinente aujourd'hui pour gérer les variations inter-saisonnières de génération électrique solaire et éolienne. Mais si on ajoute un système de stockage fondé sur l'hydrogène (électrolyse de l'eau en période d'excès de production, suivi de combustion de l'hydrogène dans des centrales thermiques à cycle combiné gaz adaptées ; stockage intersaison dans des cavités salines), il est possible de réduire massivement le coût complet d'un mix 100 % renouvelable. Dierks (2026) obtient un coût complet dans ce cadre élargi situé dans une fourchette de 79 à 116 €/MWh, d'où un coût d'abattement compris entre 68 et 156 €/MWh. Il est alors difficile de départager la solution nucléaire de l'option renouvelable si on intègre l'hypothèse hydrogène dans l'équation.

①.⑥ Trading intra-day d'une batterie

Une batterie de 1 MW / 2 MWh opérant en pur arbitrage sur les marchés spot et infra-journalier se charge en moyenne à -8 €/MWh et se décharge à 111 €/MWh (chiffres de Storio Energy). En considérant un rendement de 87%, elle produit un revenu de 105 €/MWh déchargé. Son coût annuel système inclus (LCOS) a considérablement baissé et il est désormais de 57 €/MWh (Ember, 2025). Dans ces conditions, l'installation produit un gain net de 48 €/MWh déchargé, sans compter la vente éventuelle de services au réseau. En l'état actuel des spreads, le système peut être rentable sans besoin d'aucune subvention.

À la charge (prix nul ou négatif, environ 700 heures par an), la source marginale est la production renouvelable écrêtée : un MWh qui serait sinon perdu, à facteur d'émission quasi nul. À la décharge (heures de pointe-prix), la source marginale est systématiquement carbonée. Nous prenons, à titre conservatoire, le facteur d'émission du gaz, qui est un minorant, soit 0,418 tCO₂/MWh. Il faut déduire l'empreinte carbone de la batterie elle-même, estimée à 65 tCO₂/MWh de capacité (Llamas-Orozco & al., 2023) et amortie sur 5000 cycles, soit 0,026 tCO₂/MWh produit. Dans les conditions opérationnelles décrites, le coût d'abattement ressort à -120 €/tCO₂.

Annexe ② → Industrie

②.① Acier

La sidérurgie française représente 22 % des émissions industrielles (et 5 % des émissions territoriales) de notre pays, ce qui en fait le premier émetteur industriel de gaz à effet de serre. Au niveau de la planète entière, la production d'acier représente 8 % des émissions mondiales. C'est donc une industrie clé de la décarbonation.

Il existe actuellement trois méthodes industrielles mises en place pour produire de l'acier. Au niveau mondial, 85 % de l'acier est recyclé, mais, selon Watari et al. (2025), il ne représente que 30 % de la production mondiale d'acier, à un niveau stable depuis le début du siècle. C'est parce que l'acier utilisé reste stocké dans les infrastructures sur de très longues périodes. Le recyclage de l'acier est pourtant moins cher et émet beaucoup moins de CO₂, mais il n'existe pas de fort potentiel d'expansion de gisement de décarbonation étant donné que l'essentiel de l'acier usagés est déjà recyclé.

La technologie historique, et encore hégémonique dans le secteur sidérurgique, est fondée sur le charbon et le haut-fourneau. C'est la technologie de référence. Chaque tonne d'acier produite avec cette technologie émet 2,3 tCO₂ en moyenne, et coûte environ 550 € en Europe (Hasanbegui et al., 2024).

Environ 8 % de l'acier produit dans le monde aujourd'hui est fondé sur la technologie émergente de réduction directe du minerai d'oxydes de fer par le gaz naturel. Cette technologie ne peut être classée comme à faible intensité carbone puisque le gaz naturel, qui remplace le charbon, émet du CO₂, même si c'est en moindre intensité que le charbon. Concrètement, La production d'une tonne d'acier par l'utilisation de gaz naturel émet 1,1 tCO₂, soit une réduction des émissions de 48 % par rapport à la technologie de référence. Selon Criqui (2024, Fig. 14), le surcoût complet de production de cette technologie est d'environ 100 € par tonne d'acier. Le coût d'abattement de cette technologie de décarbonation partielle est donc de 85 €/tCO₂.

Pour décarboner la sidérurgie de façon plus intense, il faudrait remplacer le gaz naturel et le charbon par de l'hydrogène vert. Cette technologie n'émettrait que 0,8 tonne de CO₂ par tonne d'acier (Criqui, 2024, Tableau 5). Le coût de cette technologie permettant de produire de l'acier vert dépend de différents paramètres de coûts futurs aujourd'hui encore très incertains. Gollier (2025) et Criqui (2024, Figure 16) estiment le surcoût de production de cet acier vert autour de 400 €/t, ce qui induit un coût d'abattement de 270 € par tonne de CO₂ évitée.

③.② Ciment

La production de ciment est le premier poste d'émissions de gaz à effet de serre (GES) du secteur de la construction. Elle émet 10 millions de tonnes de CO₂ par an en France, soit 3 % environ des émissions françaises. Au niveau mondial, le ciment représente 8 % des émissions de CO₂ (World Economic Forum, 2024). Le ciment est produit à partir de clinker (à base d'oxyde de Calcium, CaO), qui lui-même est obtenu par calcination du calcaire (CaCO₃) pour en éliminer les atomes de carbone et d'oxygène. Les deux-tiers des émissions de CO₂ viennent de cette réaction chimique, le dernier tiers venant de la combustion de l'énergie fossile utilisée (gaz naturel ou charbon). En Europe, la production d'une tonne de ciment émet approximativement 0,6 tCO₂ par le mode de production standard.

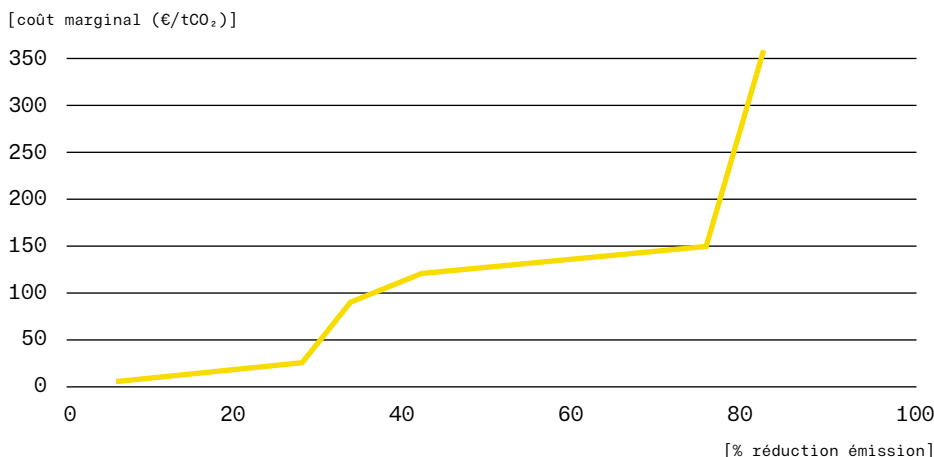
Selon le rapport Criqui (2023) sur le ciment, il existe trois méthodes pour réduire l'intensité carbone du ciment : l'efficacité énergétique avec l'optimisation de l'efficacité énergétique de la production de clinker, l'efficacité matière grâce à la substitution des combustibles fossiles par des combustibles bas-carbone, et la capture et la séquestration des émissions de CO₂. L'efficacité énergétique (permise par la voie sèche avec précalcinateur) ne fournit qu'une petite quantité des réductions d'émissions nécessaires à la décarbonation.

La production de clinker est à l'origine de la plus grosse part des émissions lors de la fabrication du ciment, d'où l'intérêt de le substituer par d'autres matières moins émettrices comme les argiles calcinées. Le coût d'abattement est principalement lié à l'investissement dans le four de calcination des argiles. Le coût d'abattement issu de la substitution de la calcination du calcaire par la calcination de l'argile est de l'ordre de 25 €/tCO₂. Néanmoins, cette substitution détériore la qualité du ciment. Elle ne peut être considérée comme techniquement viable au-delà d'une substitution de 25 %.

Puisqu'il ne sera pas possible d'éliminer totalement l'utilisation de clinker, d'autres solutions complémentaires doivent être considérées. Glenk et al. (2024) examinent 18 stratégies de décarbonation sur la frontière efficiente, combinant la substitution évoquée ci-dessus avec d'autres solutions, comme l'utilisation de biocarburant en substitution du charbon pour la calcination, la capture et séquestration du CO₂ aux cheminées, ou le recyclage du béton. Ils obtiennent la courbe d'abattement correspondant à la Figure 1, calibrée pour une usine produisant annuellement un million de tonnes de clinker (soit environ 1,4 millions de tonnes de ciment) et émettant 832.000 tCO₂ dans le statu-quo. Selon ces auteurs, il est possible de réduire de 5 % les émissions à coût d'abattement négatif en réduisant mieux le clinker en poudre ("optimized grinding"), ceci permettant de remplacer une partie du clinker par du calcaire. L'utilisation de biocarburants, le recyclage du béton et la substitution partielle du clinker par de l'argile calciné sont toutes des actions de décarbonation partielle dont le coût d'abattement est inférieur à 80 €/tCO₂. La décarbonation complète de la production de ciment impliquerait un coût de plus de 1.200 € pour éliminer les dernières tonnes de CO₂.

[graphique 2]

Courbe de coût d'abattement dans le secteur du ciment



Source :
Glenk et al.
(2024).

Une étude suisse de 2022 (BFE, 2022) indique elle aussi que la décarbonation complète du secteur du ciment en Suisse (qui représente 25 % des émissions industrielles du pays) passera par un portefeuille diversifié de stratégies. Elle estime que le coût moyen d'abattement du ciment dans ce pays pour atteindre zéro-émission nette est de 113 CHF/tCO₂, soit environ 124 €/tCO₂.

②.③ Capture directe du carbone atmosphérique (DACCS)

Pour atteindre zéro émission nette, il faudra capturer et séquestrer l'excès de CO₂ émis durant la première partie de ce siècle au-delà de 2050 pour respecter notre ambition collective synthétisée dans l'objectif de 2°C. Beaucoup de secteurs très difficiles à décarboner (aviation, ciment, ...) comptent sur ces technologies de Capture Directe et séquestration du Carbone Atmosphérique (DACCS en anglais) pour respecter leur engagement. Le DACCS remplit les caractéristiques de ce que les économistes appellent une « backstop technology », c'est-à-dire une technologie qui peut être mise en œuvre à n'importe quelle échelle (« scalability ») à des coûts modérés, pérenne, et qui pourra être utilisée en dernier recours pour capturer le « carbone historique » de l'air. L'estimation du coût du DACCS par tCO₂ capturée et séquestrée constitue donc un thème de recherche majeur car ce coût constitue en quelque sorte une borne supérieure du coût d'abattement des actions de décarbonation les plus complexes.

Plusieurs technologies de retrait du CO₂ atmosphérique existent aujourd'hui, au moins au niveau de démonstrateur, mais restent financièrement prohibitifs, entre 500 €/tCO₂ et plus de 2000 €/tCO₂. Trois technologies DACCS sont actuellement explorées selon la réaction chimique de capture : un solvant liquide, un solvant solide, et la chaux vive (oxyde de Calcium CaO). Sievert et al. (2024) tentent de projeter les coûts futurs de ces trois technologies sur la base d'autres technologies similaires en termes de courbe d'apprentissage. Il

y a nécessairement une part importante d'incertitude dans l'estimation de ce coût futur fondé sur des effets d'apprentissage qui pourraient ne pas se matérialiser. Sievert et al. (2024) obtiennent les estimations suivantes sous l'hypothèse d'un niveau mondial d'engagement d'une GtCO₂ capturée et séquestrée par an d'ici 2050.

[graphique 3] **Coût d'abattement actuels et estimés pour 2050 pour différentes technologies de capture et séquestration du CO₂ atmosphérique.**

[DACCS]	[Coût moyen 2024]	[Coût espéré 2050]	[Intervalle de confiance à 90% 2050 (€/tCO ₂)]
Solvant liquide	563 €/tCO ₂	286 €/tCO ₂	[190, 457]
Solvant solide	1077 €/tCO ₂	314 €/tCO ₂	[236, 486]
Chaux vive	2 084 €/tCO ₂	312 €/tCO ₂	[193, 701]

Source : Sievert et al. (2024).

②.④ Intelligence artificielle et économie d'énergie

L'Intelligence Artificielle (IA) est souvent critiquée pour la quantité d'énergie que son développement va nécessiter. Selon certaines projections, les data centers devraient consommer 120 GW rien qu'aux États-Unis d'ici le milieu de la prochaine décennie. Au niveau actuel de l'intensité carbone du mix électrique américain (384 g/kWh), ces data centers américains émettront 402 millions de tCO₂ chaque année, soit plus que les émissions territoriales françaises actuelles.

Néanmoins, l'IA peut permettre aussi de réduire les émissions, comme l'internet a permis des réunions virtuelles à distance qui réduisent le besoin de mobilité. Un article récent d'Abitbol et al. (2026) apporte un éclairage intéressant à ce sujet en analysant le traitement des eaux.

Au niveau mondial, le traitement des eaux représente 1,3 % des émissions mondiales de CO₂. Comme l'expliquent les auteurs de cet article, le traitement des eaux usées constitue un système dynamique complexe compte tenu des conditions météorologiques, du coût de l'électricité, et (surtout) de la volatilité des caractéristiques des eaux usées à l'entrée des usines de retraitement. Une composante très énergétivore du traitement est liée à l'injection d'air dans l'eau pour que l'oxygène qu'elle contient puisse activer les bactéries en charge de la décomposition des déchets. Trop d'air induit une dépense énergétique inutile ; trop peu d'air conduit à une pollution des eaux rejetées.

Un grand acteur mondial du secteur a mis progressivement en place une gestion IA du pilotage de ses différentes usines en France. Cela constitue une situation quasi-expérimentale qui permet aux économistes de comparer les résultats des usines pilotée en IA de ceux des usines qui ne le sont pas, en y intégrant les coûts d'expertises et d'IA (lissés sur 5 ans). Par usine et par an, les données utilisées par les auteurs conduisent à une économie nette d'énergie de 31,5 MWh et une économie financière de 6 400 euros. En supposant une intensité carbone du mix électrique français de 33 kg par MWh, l'usage de l'IA par usine réduit les émissions annuelles de 1,04 tCO₂. On obtient donc un coût net d'abattement de -6154 €/tCO₂. Ce coût est négatif, dans le sens où cette action fait gagner sur les deux tableaux : la réduction des coûts sociaux et la réduction des émissions de CO₂. Si on avait pris une intensité carbone du mix électrique européen, de l'ordre de 224 kg de CO₂ par MWh, ce coût d'abattement est un peu moins favorable : -907 €/tCO₂.

Annexe ③ → Transport

EN 2023, LES VÉHICULES PERSONNELS étaient responsables de 10 % des émissions mondiales de CO₂ liées à l'énergie et 25 % de la consommation de pétrole mondiale. En France, le secteur des transports est le plus émetteur (34 % des émissions de GES en 2024) et le seul à avoir cru sur la période 1990-2023. La quasi-totalité des émissions viennent du transport routier : 94 % en 2023.

Pourtant, les émissions de CO₂ par kilomètre en France ont diminué de 24 % entre 1990 et 2023 grâce à l'amélioration technologique. Mais l'augmentation des distances parcourues, le vieillissement du parc automobile et l'alourdissement des véhicules contrebalancent ce progrès. Selon l'Ademe, les voitures s'élargissent d'un centimètre tous les deux ans, et la part des SUV dans les émissions mondiales des véhicules est passée de 8,5 % en 2010 à 31,4 % en 2022.

En 2023, 39,3 millions de véhicules sont comptabilisés dans le parc roulant français, dont près de 91 % est constitué de voitures à énergie thermique essence ou diesel. Les voitures diesel restent majoritaires (50,7 %). Le covoiturage est peu répandu : pour les trajets de moins de 20 km, qui représentent 81 % des déplacements, il n'y a en moyenne que 1,2 occupant par voiture. Pour ces petits trajets du quotidien, la voiture électrique est un excellent compromis.

③.① Réduction de la vitesse maximale à 110 km/h sur autoroute

En moyenne en France, une voiture sur autoroute emporte environ deux passagers. En passant de 130 à 110 km/h, chaque passager va perdre 1,4 heure sur un parcours de 1 000 km. Pour une voiture représentative du parc automobile, l'ADEME (2010) suggère une économie de 9 litres d'essence permettant d'éviter l'émission de 22,95 kg de CO₂.

Chaque litre d'essence consommé appauvrit la France, puisque nous n'avons pas de gisement de pétrole sur notre territoire. Au cours moyen du baril en 2025, chaque litre d'essence nous coûte collectivement 0,80 €. Nous considérons une valeur du temps à 32,8 €/h, comme recommandé par le ministère de l'écologie (DGITM, 2019). Nous avons donc sur ce trajet deux personnes qui vont perdre chacune 1,4 heure, ce qui représente un sacrifice de 91,8 €.

De cela, il faut déduire les $0,80 \times 9 = 7$ euros de bénéfice sociétal des 9 litres d'essence économisée ainsi qu'un dommage local de l'ordre de 1 € par litre d'essence pour les pollutions locales (Direction Générale du Trésor, 2021). Nous déduisons ainsi un bénéfice sociétal de $7 + 9 = 16$ € par 1000 km. Appliquée à ce trajet, cette recommandation représente un sacrifice net de 75,8 euros pour éviter d'émettre 22,95 kg de CO₂. Cela revient à un coût net de 3 300 €/tCO₂.

On devrait aussi tenir compte du fait que cette politique baisse la mortalité routière. Les Français roulent en moyenne 100,9 milliards de kilomètres par an sur nos autoroutes (ASFA, 2025). En 2024, on comptait 163 morts sur ces autoroutes. La probabilité de perdre sa vie sur autoroute avant la réforme est donc de 1,62 millionnièmes par millier de kilomètres. En France, l'État utilise la valeur de trois millions d'euros par vie sauvée. Supposons que le passage à 110 km/h permette d'éliminer complètement la mortalité sur autoroute. Alors, le co-bénéfice des vies sauvées est donc de 4,85 euros par millier de kilomètres, à déduire du sacrifice net de 75,8 euros obtenus plus haut. Cela donne un coût net de 3 100 €/tCO₂.

③.② Voiture électrique

Après une longue hésitation, l'électrification de notre mobilité est en cours. Si l'on prend l'exemple d'une petite citadine neuve comme la Fiat 500, la version thermique coûte 19 400 € et consomme 5,2 l par 100 km. La version électrique coûte 29 800 € et consomme 12 kWh par 100 km. Le prix hors taxe de l'essence SP95-E10 est de 0,80 €/l, auquel on ajoute 0,80 €/l pour les externalités négatives des pollutions hors CO₂, comme suggéré par le Rapport Rocard (2009, page 29 par exemple). On retient 15 centimes le kWh pour le coût marginal de l'électricité et de son transport. En considérant un conducteur « moyen » qui parcourt 13 000 km par an avec un véhicule d'une durée de vie de quinze ans, le coût total de la voiture thermique actualisé à 4,5 % est de 31 539 € et celui de la voiture électrique 32 426 €. Le différentiel de coût total est de 888 €.

Pour les émissions, on suppose 33 gCO₂/kWh pour la voiture électrique et 2,3 kgCO₂ pour chaque litre de SP95. On suppose une émission de 11 tCO₂ pour produire la Fiat 500 électrique, et seulement 6 tCO₂ pour la version thermique.

Les émissions totales de la voiture thermique sont de 29,3 tCO₂ et 11,7 tCO₂ pour la voiture électrique. La version électrique permet donc d'éviter 17,5 tCO₂ sur son cycle de vie, avec un coût d'abattement de 50 €/tCO₂. Les variations peuvent évidemment être considérables en fonction de l'usage. Par exemple, si le conducteur roule deux fois moins pendant ces quinze ans, soit 6 500 km par an, le surcoût est supérieur car l'achat n'est plus compensé par les gains de carburants (5 644 €) pour un gain de carbone moindre (6,3 tCO₂). Le coût d'abattement passe à 900 €/tCO₂.

Le coût moyen que nous trouvons est très en ligne avec les calculs du Ministère de l'Économie, qui affiche une fourchette variant de -189 €/tCO₂ dans le cas le plus favorable (citadine légère, gros rouleur) à 345 €/tCO₂ (citadine, moyen rouleur). Dans leurs estimations, les utilitaires routiers et les tracteurs routiers sont tous à coût d'abattement négatif ou quasi nul en cas de gros rouleurs.

③.③ Biocarburants

En France, les biocarburants représentent près de 9 % de la consommation énergétique des transports en 2018 (Direction générale de l'Énergie et du Climat). Le droit européen prévoit un objectif de 14 % au moins d'énergies renouvelables (comprenant les biocarburants) dans les transports d'ici 2030. L'objectif français a quant à lui été défini à 15 % en 2030.

Les biocarburants ou agrocarburants sont des carburants issus de la biomasse, considérés à ce titre comme une énergie renouvelable. Le bilan en termes d'émissions de gaz à effet de serre est complexe et très variable, selon le type de culture, de biomasse et de bioénergies. De plus, leur production soulève des enjeux de compétition vis-à-vis des usages alimentaires et a par ailleurs des effets notables sur l'environnement via les changements d'affectation des sols.

D'après le rapport Criqui sur ce thème (Criqui, 2021), pour les carburants fossiles, les coûts d'acquisition étaient de 47 €/MWh pour l'essence, soit environ 43 centimes le litre. Le rapport Criqui retient la fourchette de 66 à 103 €/MWh pour le bioéthanol conventionnel ou de première génération, et 103 à 158 €/MWh pour le bioéthanol de deuxième génération. En ordre de grandeur, les biocarburants sont deux fois plus chers à produire que le carburant fossile.

Pour le bioéthanol de première génération, on considère une baisse des émissions d'environ 35 % par rapport à l'essence fossile. Pour le bioéthanol de deuxième génération, la baisse des émissions est d'environ 55 % en moyenne par rapport au carburant fossile de référence. On considère qu'un litre d'essence fossile produit 10 kWh avec un moteur thermique standard et émet 2,4 kg de CO₂. Donc un MWh d'essence fossile engendre 0,24 tCO₂.

Pour comparer les coûts, nous prenons le milieu des fourchettes d'incertitudes, soit 84,5 €/MWh pour la première génération, et 130,5 €/MWh pour la seconde génération. Pour résumer, le bioéthanol de première génération induit un surcoût moyen de 37,5 €/MWh, et réduit les émissions de 0,084 tCO₂.

Le coût d'abattement de la stratégie consistant à remplacer de l'essence fossile par du bioéthanol de première génération est donc de 446 €/tCO₂. De même, pour le bioéthanol de seconde génération, on obtient un coût d'abattement de 633 €/tCO₂.

En actualisant le rapport Cricui, produit en 2021, avec le prix actuel du litre d'essence, soit 0,80 €/l hors taxes et 88 €/MWh, on obtient des résultats plus favorables au bioéthanol. Le bioéthanol de première génération ressort avec un coût d'abattement négatif très favorable de -40 €/tCO₂. Celui de 2^e génération reste à un coût élevé de 320 €/tCO₂. Dans le cas de la conversion d'un véhicule existant au bioéthanol, il convient d'ajouter le prix du boîtier, soit 800 € HT environ. Amorti sur 100 000 km, la pose du boîtier augmente le coût d'abattement de 70 € / tCO₂, soit 30 €/tCO₂ au total.

La rentabilité relative du bioéthanol est donc très liée au prix de l'essence, donc au cours du baril. Un baril de pétrole a comme équivalent thermique brut 1,7 MWh. Un biocarburant de première génération devient socialement rentable à partir d'un baril au-dessus de 57 \$; un biocarburant de 2^e génération est socialement rentable à partir d'un baril au-dessus de 88 \$.

Une méta-analyse de l'INRA, citée par Cricui (2021), permet d'analyser les coûts d'abattement par rapport aux carburants conventionnels en 2018, en tenant compte des effets de changement d'affectation des sols. Selon cette étude, pour les biocarburants de première comme de seconde génération, ils se situent autour de 400 €/tCO₂ évitée. En tenant compte de l'impact sur les sols, l'étude conclut à une faible attractivité des biocarburants à court-terme.

D'autres hypothèques pèsent sur les biocarburants. Par exemple, leur développement est en concurrence avec l'usage des terres pour produire des aliments, ce qui pèsera sur leur prix à long terme. En Europe, leur production mobilise déjà la surface de l'Irlande. De plus, les plantes utilisées pour produire ces biocarburants sont peu efficaces pour synthétiser l'énergie solaire. Concrètement, un are de surface peut produire environ 80 litres de bioéthanol, soit 0,8 MWh, par an avec des betteraves dans le nord de la France. Mais un are de panneaux photovoltaïque peut produire 10 MWh par an. L'électrification l'emporte sur les biocarburants, dans un rapport de 1 à 10.

③.④ SAF et e-kérosène

En France, selon les chiffres clés des transports en 2025, l'aviation représente 4 % des émissions de GES en France. Les émissions de CO₂ fossile du transport aérien commercial en France ont été de 22,1 millions de tonnes (Mt) en 2024, en hausse de 4 % par rapport à 2023 (évaluations TARMAAC). Au niveau mondial, le secteur aérien a représenté 2,5 % des émissions de CO₂. Sa croissance sur la période 2000-2019 a dépassé celle du transport routier, ferroviaire ou maritime. Après avoir chuté pendant la pandémie de Covid-19, l'aviation a retrouvé son niveau pré-pandémie en 2024-2025.

La décarbonation de l'aviation n'est pas seulement une question environnementale mais également éthique et sociale : 1 % de la population mondiale

émet 50 % des émissions liées à l'aviation commerciale, et seulement 2 % à 4 % de la population mondiale a pris un vol international en 2018 (S. Gössling, A. Humpe, 2020).

Le e-kérosène apparaît comme une solution potentielle. D'autres solutions (biofuels) ont une nature plus transitoire compte tenu de la concurrence dans l'usage des sols qu'elles engendrent, et de la concurrence avec d'autres usages. Aussi appelé kérosène de synthèse ou électro-kérosène, l'e-kérosène est produit à partir d'hydrogène vert. Le procédé Fischer-Tropsch produit des hydrocarbures paraffiniques. Il engendre du kérosène et de l'oxygène à partir de CO_2 et d'hydrogène. La combustion de cet e-kérosène renvoie donc dans l'atmosphère le CO_2 capté durant le processus de production. Il est donc essentiellement neutre en carbone, en supposant l'absence de fuite dans le procédé.

Nous suivons Ueckerdt et al. (2021), nous retenons ici le coût de production de l'e-kérosène à terme autour de 3,2 euros par litre, soit, en utilisant une masse de 0.8 kg/l, environ 4 000 euros par tonne de e-kérosène. Le prix de référence du kérosène fossile, retenu pour les deux prochaines décennies est de 1 €/l (Académie des Technologies, 2023), soit 1 250 € par tonne de kérosène. La combustion d'une tonne de kérosène fossile émet 3 t CO_2 .

Le surcoût de l'e-kérosène par rapport au kérosène fossile est donc de 2750 €/tonne de carburant, pour 3 t CO_2 évitées. Le coût d'abattement du kérosène fossile est donc de 917 €/t CO_2 . On obtient les mêmes ordres de grandeur pour les autres carburants de synthèse, soutenus en particulier par les Allemands pour défendre leur industrie automobile.

③.⑤ Trajets aériens courts (Paris-Toulouse)

Paradoxalement, dans le cas des vols intérieurs (qui représentent 0,5 % des émissions de la France), l'avion est souvent plus accessible que le train et devient le choix le plus économique. Le coût de l'infrastructure TGV français, qui se traduit par des péages élevés (jusqu'à 40 % du prix du billet) et les coûts d'exploitation expliquent en partie les coûts élevés du train. Réseau Action Climat France (2025), utilisant des études de Greenpeace et de UFC – Que choisir, constate que « lorsqu'il existe une alternative ferroviaire directe, le train est nettement moins cher (- 40 %). En revanche, quand une correspondance est nécessaire, le train devient plus cher (+ 10 %). » En ce qui concerne les liaisons avec le reste de l'Europe, les comparaisons deviennent très défavorables pour le train. Par exemple, un Paris-Milan est en moyenne 3,2 fois moins cher en avion qu'en train. Pour Paris-Londres, le coefficient multiplicateur est de 2,7.

Prenons ici l'exemple d'un trajet Paris-Toulouse. Pour un tel aller simple, le simulateur de l'ADEME avance le chiffre de 135 kg de CO_2 par passager pour l'avion, contre 2 kg pour le TGV, soit un gain pour le train de 133 kg, en supposant que les émissions de CO_2 liées aux transferts des gares ou aéroports, le point de départ et le point d'arrivée.

Le train est soumis à 5,5 % de TVA et l'avion à 10 % de TVA. Si l'on s'y prend deux mois à l'avance pour un Paris-Toulouse, le coût est de 46 € pour le train et

39 € pour l'avion *low-cost*. Sans les taxes, cela donne 43,5 € HT pour le train et 35,1 € HT pour l'avion, soit un gain pour l'avion de 8,4 €.

Les enquêtes Lisea de 2016 et 2021 donnent des temps de parcours moyen de 3h28 pour l'avion, soit 1h20 de vol, 1h14 de rabattement et 1h04 de précaution. Pour le train, on obtient 6h24 de parcours moyen (4h45 + 1h17 + 0h22). Soit un gain pour l'avion de 2h46 en moyenne. La valeur du temps est estimée par le Ministère de l'Écologie à 32,8 €/h (DGITM, 2019). Donc, ce gain de temps moyen pour un Toulouse-Paris en avion par rapport au train a une valeur de 90,75 euros, en faisant l'hypothèse que les usages du temps disponible sont les mêmes dans les deux modes de transport.

L'action écologique correspondant à la substitution de l'avion par le train entre Paris et Toulouse impose donc un surcoût d'environ 99 € pour économiser environ 0,133 tonne de CO₂. Le coût social de cette action est donc de 744 € par tonne de CO₂ évitée.

L'importance de ce coût, provient essentiellement du temps humain perdu ; il dépend donc assez peu des tarifs de train et d'avion eux-même. Il est toutefois accentué par les coûts très élevés de l'infrastructure LGV dans notre pays. Par exemple, la LGV entre Bordeaux et Toulouse est estimée à plus de 14 milliards d'euros.

Annexe ④ → Bâtiment

④.① Pompes à chaleur

La chaleur représente 45 % de la consommation d'énergie finale en France, et seulement 27 % de cette chaleur provient de sources renouvelables en 2022 (DGE, 2024). Dans ce contexte, les pompes à chaleur (PAC) apparaissent comme une solution car elles sont dotées d'une très grande efficacité énergétique.

Si l'on compare au fioul, la pompe à chaleur coûte beaucoup plus cher à l'achat : 16 000 euros (hors prime) contre 4 000 euros pour la chaudière au fioul, pour un logement de 100 m². Cette dernière consomme 2 m³ de fioul par an, au prix hors taxes actuel de 1 000 euros par m³. La pompe à chaleur consomme 8 MWh électriques par an, au coût de production et de transport de 150 euros par MWh. Le coût d'usage annuel de la pompe à chaleur est plus faible : 1 200 euros contre 2 000 euros pour le fioul.

En supposant des durées de vie des installations de quinze ans et en utilisant un taux d'actualisation de 4,5 %, les coûts actualisés sur l'ensemble de leur durée de vie sont respectivement de 25 328 euros pour le fioul domestique et de 28 797 euros pour la pompe à chaleur, soit un surcoût de 3 469 euros pour cette dernière.

En revanche, comme chaque m³ de fioul domestique brûlé émet 3 tonnes de CO₂, ce système de chauffage émet 90 tonnes de ce gaz sur ses quinze années d'existence. L'usage du chauffage électrique se fait plus fréquemment que pour d'autres usages lorsque les centrales au gaz sont appelées. C'est pourquoi nous prenons une intensité carbone de 45 grammes de CO₂, légèrement supérieure à la moyenne de 33 grammes. Dans ce cadre, la pompe à chaleur ne sera responsable que de 5,3 tonnes d'émissions de ce gaz, soit une réduction des émissions de 84,7 tonnes de CO₂ sur la durée de vie des installations.

Par rapport au fioul, la pompe à chaleur permet de réduire les émissions de 84,7 tonnes pour un surcoût de 3 469 euros, soit un coût par tonne de CO₂ évitée de 41 euros. Par rapport au gaz, en installant une pompe à chaleur air-eau dans une maison individuelle de 1950 classée E, le coût d'abattement est de 100 €/tCO₂ évitée (Criqui, 2022).

Dans le cadre du remplacement d'une chaudière existante, il convient de ne pas prendre en compte le coût de la chaudière neuve dans le calcul. Le coût d'abattement ressort à 88 €/tCO₂.

La pompe à chaleur ne peut toutefois pas être déployée dans tous les cas, notamment en raison du bruit qu'elle peut émettre en fonctionnement ou de contraintes d'urbanisme (interdiction de l'unité extérieure). Les solutions peuvent inclure des surcoûts significatifs, à prendre en compte dans le calcul du coût d'abattement.

④.② Isolation thermique des bâtiments

Près de 5,2 millions de logements mal isolés sont considérés comme des « passoires énergétiques / thermiques » (Ministère de la Transition Écologique, 2024). Les passoires thermiques concernent les logements de la catégorie F et G selon le diagnostic de performance énergétique (DPE). Cela représente 17 % des logements du pays, et 18 % d'entre elles sont occupées par des ménages appartenant au 1er quintile de revenu, selon Criqui (2022) de France Stratégie.

Une étude ambitieuse de l'INSEE (Baba Moussa et al., 2025) permet de calculer le coût par tonne de CO₂ évitée par l'isolation des logements effectuées sur la base d'un échantillon de 80 000 ménages sur bénéficiaires de MaPrimeRénov' ou des CEE équipés d'un compteur Linky.

Pour les ménages chauffés au gaz, on observe une dépense moyenne de 13 700 € de l'effort de rénovation. L'impact réel, en moyenne, est assez faible : la consommation électrique est réduite de 8,9 % soit 150 €/an, avec une réduction des émissions de CO₂ moyennes de 199 kg. En prenant le taux d'actualisation du rapport Quinet de 3,2 % sur 20 ans, le coût net est de 10 743 € pour l'évitement de 5,97 tCO₂, soit 1 800 €/tCO₂. C'est un chiffre élevé et nettement supérieur à l'exemple mentionné dans le rapport Criqui (380). Les objectifs de baisse de consommation ne sont pas réalisés en pratique, en partie du fait de rénovations incomplètes.

Pour les ménages chauffés à l'électricité, le montant moyen d'isolation est de 14 300 €. L'impact est encore plus faible, avec une baisse de consommation d'énergie de 5,4 %. Un calcul similaire aboutit à un coût d'abattement de 9 900 €/tCO₂.

L'étude ne porte pas sur les logements chauffés au fioul, car l'absence de compteur et les approvisionnements ponctuels par remplissage de la cuve ne permettent pas de mesurer précisément la dépense énergétique. On peut toutefois estimer le coût d'abattement en supposant que les caractéristiques du logement, la dépense d'isolation et l'économie d'énergie soient similaires à celles des logements chauffés au gaz. L'économie annuelle est légèrement inférieure que pour le gaz (pour la période de référence, le gaz est à 72 €/MWH PCI et le fioul à 63,5 €/MWH PCI, source SDES), à 132 € par an. Avec des émissions pour le fioul de 324 gCO₂/kWh, l'économie de CO₂ annuelle s'élève à 284 kgCO₂. Le coût d'abattement ressort sous ces hypothèses à 1 300 €/tCO₂.

Le coût d'abattement des rénovations de type « MaPrimeRénov' » conduites pendant la période de référence (2018-2023) est donc très élevé. Ce programme a abouti en pratique à des baisses assez modestes de consommation pour un investissement particulièrement conséquent. Plus récemment, les budgets ont été orientés vers des rénovations d'ampleur dites « multi-gestes », incluant également l'installation d'une pompe à chaleur.

Un rapport de la Direction générale du Trésor confirme que le monogeste isolation a un coût d'abattement élevé, et invite d'ailleurs à « confirmer la fermeture de leur soutien public quand ils ne sont pas combinés à une décarbonation du mode de chauffage ». Leur modèle le situe à 719 €/tCO₂.

L'isolation d'un bâtiment peut bien sûr participer d'une rénovation efficace. Dans un exemple d'un logement de 100 m² classe G, chauffé au fioul, pour une facture annuelle de 3 000 €, des travaux pour un montant de 55 000 € incluant l'installation d'une pompe à chaleur et l'isolation, un amortissement sur 15 ans à 3,2 %, le coût d'abattement ressort à 270 €/tCO₂, un niveau proche de la valeur-carbone proposée par le rapport Quinet-3.

Compte-tenu des montants importants à investir, les dispositifs de rénovation énergétique des bâtiments doivent être évalués au cas par cas, à la fois a priori avec un coût d'abattement cible inférieur à la valeur carbone et une mesure a posteriori. En revanche, les co-bénéfices des rénovations (salubrité, pollution sonore, humidité, amélioration du confort, amélioration de la valeur du bâtiment) doivent être comptabilisés dans la valeur créée par l'opération d'isolation.

④.③ Normes environnementales dans la construction (RE 2020)

La réglementation environnementale RE 2020 vise à baisser de 30 % en moyenne le besoin bioclimatique des logements. Sur la trajectoire 2022-2031, le rapport Rivaton (2025) chiffre le surcoût d'investissement total à 11 %, décomposé en +2 % pour l'isolation, +3 % pour l'équipement de chauffage et +6 % pour la décarbonation des matériaux. L'économie carbone attendue est de 7,9 MtCO₂ sur 2022-2031. Les surcoûts subsistant en 2031 sont estimés à 118 €/m². Le rapport aboutit à un coût par tonne de CO₂ évitée de 482 €/tCO₂. Il conclut en proposant 23 mesures afin d'améliorer le rendement environnemental de la RE 2020.

Annexe ⑤ → Utilisation des terres

⑤.① Reboisement

Le reboisement — plantation de nouvelles parcelles ou renouvellement de peuplements pauvres ou déperissants — permet de maintenir ou développer la capacité des forêts à capter du carbone.

Sur les campagnes 2021 à 2023 du plan de renouvellement forestier France Relance, mis en œuvre notamment par les coopératives forestières, le montant moyen à l'hectare des reboisements s'est élevé à 3 661 euros, un coût inférieur de 8 à 25 % à la moyenne des autres gestionnaires privés du fait des économies d'échelle et de l'expertise technique des coopératives. Ce chiffre couvre les travaux préparatoires, la fourniture et l'installation des plants et de leurs protections contre le gibier, le premier entretien et la maîtrise d'œuvre, soit l'essentiel du coût réel d'un chantier de reboisement hors foncier.

Ce coût de plantation est annualisé sur 30 ans à 4,5 %, ce qui donne une annuité d'environ 225 €/ha/an. On le rapporte à un taux de séquestration de 2,4 tCO₂/ha/an, soit la moyenne nationale de séquestration en biomasse et bois mort observée par l'IGN sur la période 2010-2015. Le coût d'abattement central s'établit à environ 95 €/tCO₂. Cette estimation est confirmée par une étude récente publiée par Favero et Austin (2026), qui établit que 8 GtCO₂ pourraient être capturées et séquestrées chaque année dans le monde à un coût inférieur à 100 \$/tCO₂.

Le résultat reste toutefois très sensible au choix de l'essence et du contexte de plantation, qui déterminent à la fois le coût de mise en œuvre et la vitesse de croissance. Une peupleraie, à croissance rapide et bénéficiant d'aides plafonnées à un coût unitaire plus faible, peut descendre sous les 25 €/tCO₂. À l'inverse, un reboisement en terrain difficile, avec protection renforcée contre le gibier et une essence à croissance lente adaptée à un climat dégradé, peut dépasser 240 €/tCO₂.

Le résultat central se situe très exactement dans la fourchette 53-143 €/tCO₂ obtenue par Yousefpour, Augustynczik, Reyer et al. (2018) pour les essences européennes comparables (hêtre à chêne), qui modélisent la gestion climato-intelligente de 68,3 millions d'hectares de forêts commerciales dans 18 pays européens en intégrant coûts de plantation, croissance et valeur alternative du bois. Cette convergence entre une construction bottom-up strictement française et une estimation académique européenne indépendante renforce la robustesse du chiffre central retenu. Le prix de marché du Label Bas-Carbone (31 €/tCO₂ en moyenne) reste inférieur à ce coût d'abattement complet, ce qui est attendu puisqu'il s'agit d'un prix de préfinancement et non d'une évaluation socio-économique exhaustive.

Auteurs : Christian Gollier & François-Xavier Oliveau

Édition et relectures : Nicolas Vanbremeersch

Direction de Création : Aaron Levin

Composition : Camille Hellot

Photo page 4 : Avi Richards - Unsplash

Composé dans les typographies Hypertext et Wagram, de la fonderie Double Zero.

Écologie & Solutions → 91 avenue Kléber, 75016 Paris * ecologie-solutions.fr

