

LE RÔLE DES INFRASTRUCTURES DANS LA TRANSITION BAS-CARBONE ET L'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE DE LA FRANCE

Rapport complet

Cette étude a été rendue possible grâce au concours (données d'activités, entretiens d'experts et financement) de la Fédération Nationale des Travaux Publics.

Auteurs et autrices

Hélène Chauviré, Manager, co-responsable du pôle d'expertise Atténuation

Alain Grandjean, Associé

Jacques Portalier, Senior manager - externe

Contributeurs et contributrices Carbone 4

Hughes-Marie Aulanier, Théo Girard, Bastien Nossek, Mélodie Pitre, Clément Ramos, Baptiste Rouault, Juliette Sorret, Simon Tapiero, Zénon Vasselin.

Table des matières

Introduction	4
I - La démarche et les scénarios.....	6
Présentation de la démarche Carbone 4 et OFCE-NEO.....	7
II - Réduction des émissions de GES et besoin en investissements d'infrastructures	10
Enjeux climat et périmètre couvert par l'étude	11
Les infrastructures associées à la mobilité	13
Les infrastructures énergétiques (électricité, gaz, Hydrogène, réseaux de chaleur) ..	26
Les infrastructures du numérique (réseau fixe et mobile).....	42
Capture et stockage technologique de carbone	47
Bilan réduction	50
III - Résilience des infrastructures.....	52
Introduction.....	53
Besoin en adaptation des infrastructures existantes	54
Besoin en ouvrages de protection	64
Conclusion du volet résilience	73
IV - Restauration et besoins en investissements pour les activités des TP	74
Périmètre et objectifs nationaux du volet restauration	76
Vers l'objectif Zéro Artificialisation Nette	77
Contribuer à la renaturation des milieux.....	85
Les infrastructures linéaires et les trames vertes et bleues	96
Bilan Restauration	97
V - Récapitulatif des investissements pour les infrastructures selon les 3R	99
VI - Synthèse et conclusions.....	101

Introduction

La transition écologique transformera en profondeur nos sociétés

Le changement climatique et les problématiques environnementales au sens large sont des enjeux capitaux et systémiques pour la société. **De nombreuses transformations sont nécessaires pour faire émerger des sociétés bas-carbone et résilientes**, ce qui va nécessairement impacter : les usages, comportements et aspirations des individus d'une part, et les activités de l'ensemble des secteurs économiques d'autre part.

Une évolution cohérente des usages et des infrastructures

L'anticipation de ces mutations constitue donc un enjeu clé pour construire une stratégie d'investissement dans les infrastructures qui soit performante et résiliente à moyen et long-terme.

Dans ce contexte, la Fédération Nationale des Travaux Publics (FNTP), dont l'ambition est de permettre aux

entreprises du secteur de contribuer à la transition écologique, en accompagnant les mutations profondes liées à une transition bas-carbone, a fait appel à Carbone 4 et à l'OFCE-NEO pour éclairer le rôle des infrastructures dans la transition bas-carbone et l'adaptation au changement climatique de la France.

Ce document présente uniquement la partie de l'étude confiée à Carbone 4.

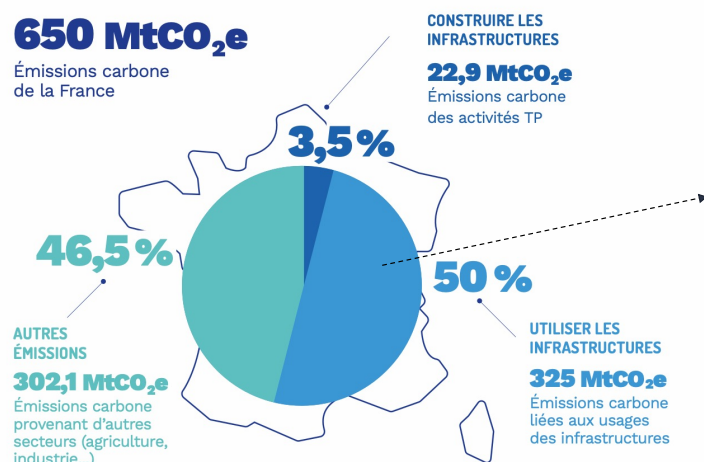
La première étape a été la mesure de l'empreinte carbone des activités des Travaux Publics en France, et la quantification des actions majeures qui permettent de réduire son empreinte carbone.

L'un des enseignements majeurs de ce calcul est que l'empreinte carbone des activités de Travaux Publics¹ (scopes 1,2 et 3 amont) représente 3,5% de l'empreinte carbone totale de la France, tandis que **l'usage des infrastructures en représente 50%**.

REPARTITION DES ÉMISSIONS CARBONE*

650 MtCO₂e

Émissions carbone de la France



CONSTRUIRE LES INFRASTRUCTURES

22,9 MtCO₂e
Émissions carbone des activités TP

46,5%

AUTRES ÉMISSIONS

302,1 MtCO₂e
Émissions carbone provenant d'autres secteurs (agriculture, industrie...)

50%

UTILISER LES INFRASTRUCTURES

325 MtCO₂e
Émissions carbone liées aux usages des infrastructures

53 MtCO₂e

- Émissions liées aux usages des réseaux d'électricité, de chaleur et de froid, d'eau.
- Émissions liées aux usages de l'aérien, du maritime, du fluvial, du ferroviaire, des réseaux numériques.

17%

41%

134 MtCO₂e
Émissions liées aux usages du gaz

42%

138 MtCO₂e
Émissions liées aux usages de la route

*L'ensemble de ces calculs prend en compte à la fois les émissions carbone ayant lieu sur le territoire français, ainsi que les émissions dites « importées » (matériaux et matériels produits hors du territoire national).

¹ Émissions directes sur chantier et émissions amonts tels que production et transport de matières premières etc.

Ainsi, les infrastructures sont actuellement un support clé pour des usages très émetteurs en CO₂. Ces infrastructures peuvent être néanmoins un facilitateur de la transition bas-carbone de la France et doivent évoluer en cohérence de la décarbonation des usages. C'est l'enjeu de « **Réduction** » traité dans cette étude.

Le dérèglement climatique étant déjà engagé, les infrastructures doivent aussi s'adapter à un monde qui se réchauffe, et de nouvelles infrastructures de protection peuvent permettre d'augmenter la résilience des territoires français. C'est l'objet du volet « **Résilience** ».

Les Travaux Publics peuvent également servir les écosystèmes en contribuant à la réduction de l'impact négatif des activités anthropiques sur les milieux naturels. C'est l'enjeu de « **Restauration** » traité dans cette étude.

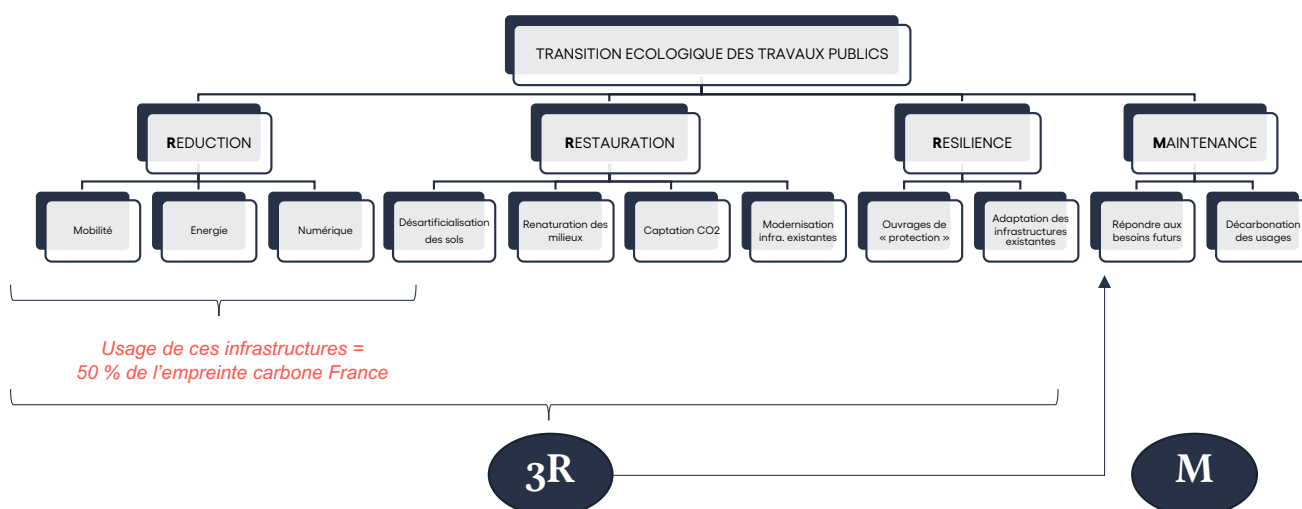
Face aux enjeux de ces 3R (**Réduction, Résilience, Restauration**), la dimension **maintenance** des infrastructures existantes et futures est transversale. Elle fait l'objet d'une attention particulière dans cette étude, et joue un rôle

significatif notamment dans les volets Réduction et Résilience.

A titre d'illustration, les actions de maintenance peuvent contribuer à la réduction des émissions liées aux usages des infrastructures pour :

- **Répondre aux besoins et usages futurs** : la maintenance d'infrastructures existantes vient compléter la construction de nouvelles infrastructures afin d'aboutir à un parc d'infrastructures de qualité adapté à l'évolution des usages
- **Décarboner les usages** des infrastructures ; par exemple :
 - La maintenance de la route permet de réduire la consommation moyenne des véhicules
 - La maintenance du réseau de gaz permet de réduire les émissions liées aux fuites
 - La maintenance du réseau électrique permet de maximiser l'efficacité énergétique du réseau.

Le graphique ci-dessous résume les différentes composantes de l'étude :





La démarche et les scénarios



I - La démarche et les scénarios

Présentation de la démarche Carbone 4 et OFCE-NEO

Cette étude se fonde sur des scénarios nationaux d'évolution des besoins et usages à horizon 2050, pour en déduire le besoin sous-jacent d'évolution des infrastructures, qui permettraient de répondre à ces objectifs. Cette partie est assurée par Carbone 4. Enfin, ces évolutions des infrastructures sont traduites en montants d'investissement (soit par Carbone 4, soit par OFCE-NEO) puis en indicateurs économiques (impact PIB, emploi...) par OFCE-NEO. La traduction en indicateurs économiques n'est pas développée dans ce rapport, mais dans le rapport complémentaire de OFCE-NEO.

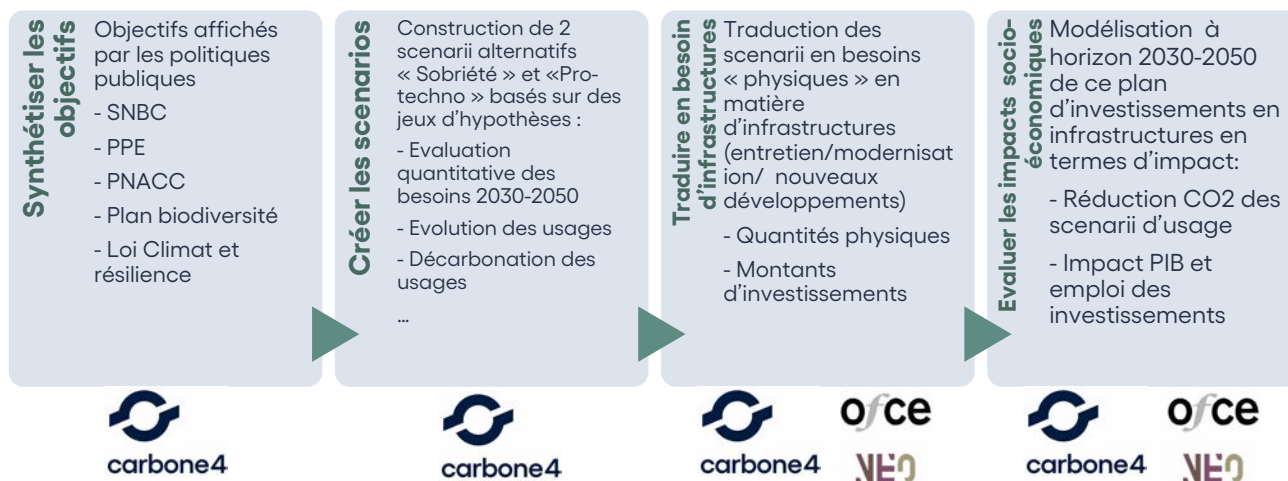
Le volet **Réduction** se fonde sur les budgets carbone de la France en 2050 détaillés dans la SNBC : deux scénarios différenciés d'évolution des usages et respectant ces budgets sont décrits. Pour chaque scénario, le besoin d'évolution des infrastructures pour satisfaire ces usages est défini. Les investissements en infrastructure qui en découlent peuvent ainsi être estimés.

Le volet **Résilience** part du principe que la France fera face à des aléas climatiques associés au moins à un réchauffement global de 2°C. Suivant la manière dont les différents pays ou plaques régionales respecteront leurs propres ambitions de respecter l'Accord de Paris, il y a un risque que le dérèglement climatique aille au-delà de 2°C, et le scénario global d'évolution du climat retenu est le RCP 8.5. Ce volet se penche sur le parc d'infrastructures existantes, mais aussi sur de nouveaux ouvrages de protection.

Le volet **Restauration** s'appuie sur les objectifs nationaux de protection et restauration des écosystèmes : Zéro Artificialisation Nette, renaturation de cours d'eau, etc. et intègre, en particulier sur l'artificialisation, les scénarios de décarbonation. Les objectifs de la SNBC en termes de développement des puits de carbone sont aussi pris en compte. Ces objectifs sont ensuite traduits en besoin d'investissements, à la fois pour de nouvelles infrastructures et pour une transformation des infrastructures actuelles associant des travaux de type « travaux publics ».

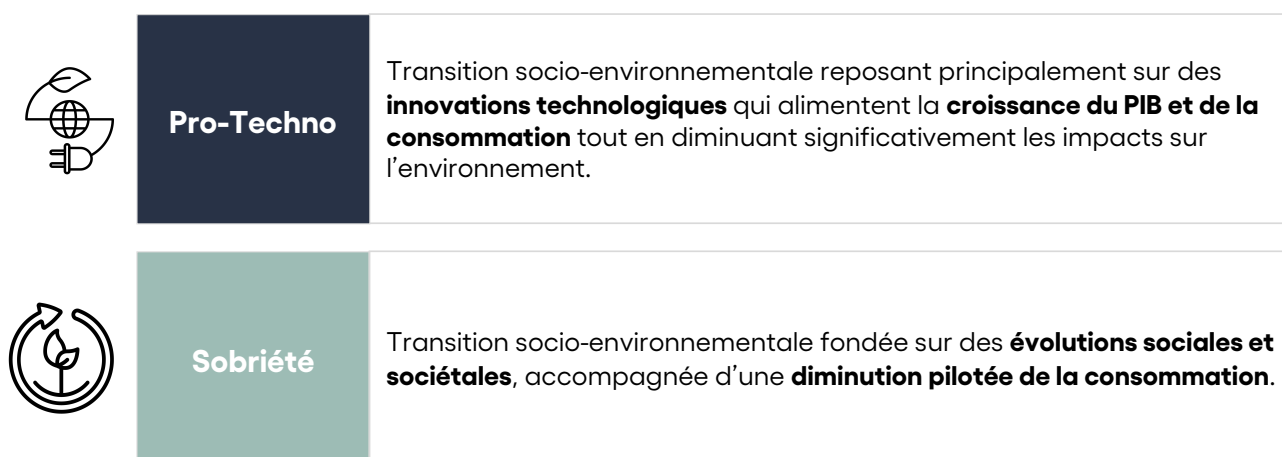
Pour la réalisation de l'étude, et dans un contexte d'incertitude forte, une approche d'**analyse par scénario** est privilégiée. L'analyse par scénario est un outil puissant pour se préparer à différents futurs, en particulier dans un contexte de transition bas-carbone. Fondée sur une approche **prospective**, elle consiste à **se projeter dans différents scénarios** pour en comprendre les implications. Cette approche est très efficace pour **capturer exhaustivement des évolutions complexes interconnectées** : ce type d'analyse se prête particulièrement bien aux mutations impliquées par les enjeux du climat (transition bas-carbone et adaptation) et de l'environnement.

Ainsi, l'ambition de cette étude prospective est de proposer **deux scénarios de plan de transformation** des infrastructures portés par des trajectoires d'évolution des usages contrastées, qui permettent - dans les deux cas - à la **France de réaliser sa transition bas-carbone, de construire sa résilience face au changement climatique, et de restaurer ses écosystèmes.**







Deux narratifs de transition ont été développés, avec la contribution d'une équipe d'experts.

Ils représentent **deux visions contrastées**, compatibles avec la SNBC.



Chaque scénario représente une voie possible d'évolution sur différentes dimensions, résumées dans le tableau ci-après :

Une transition socio-environnementale, deux narratifs distincts

	 Pro-Techno	 Sobriété
Axes structurants	Miser sur des innovations technologiques qui alimentent la croissance du PIB et de la consommation tout en diminuant significativement les impacts environnementaux	Miser sur des évolutions sociales et sociétales , accompagnées d'une diminution pilotée de la consommation
Philosophie générale	<p>Hausse des flux entrants (ressources et énergie)</p> <p>Découplage entre PIB et consommation de ressources et des impacts environnementaux</p> <p>Economie mondiale spécialisée, progrès technique, technologie, investissements, mobilité forte</p> 	<p>Baisse des flux entrants (ressources et énergie)</p> <p>Diminution pilotée de la consommation, fléchage vers les secteurs essentiels à la transition bas-carbone et à l'emploi</p> <p>Circuits courts, économie circulaire, transition vers une économie de la fonctionnalité, mobilité douce</p> 
Climat	Changement climatique stoppé sous la barre des +2° C d'ici la fin du siècle Anticipation et atténuation de la plupart des événements climatiques extrêmes	
Population	Hausse de la population liée au vieillissement et à la poursuite de l'augmentation de l'espérance de vie	
PIB	Croissance économique significative et maintenue grâce à un découplage entre PIB et émissions qui compense largement la hausse d'activité	Augmentation de l'activité fléchée avant tout vers les secteurs jugés essentiels à la transition bas-carbone de l'économie et à l'emploi
Environnement socio-économique	Hausse de la consommation. Inégalités géographiques et sociales tempérées sans être réduites, par la croissance et la redistribution	Baisse du niveau de consommation moyen. Réduction forte des inégalités via la redistribution et l'organisation autour des secteurs essentiels
Dynamiques territoriales	Poursuite de l'urbanisation et densification des villes, disparité de la connectivité entre centres et périphéries/espaces ruraux et potentielles inégalités sociales associées	Rapprochement entre les zones d'activité et les zones résidentielles, décentralisation et désurbanisation des grandes villes au profit de zones urbaines de petite à moyenne taille et circuits courts
Mobilité	Baisse supérieure à la moyenne historique de l' intensité carbone de l'énergie (véhicule électrique, hydrogène) et efficacité énergétique (motorisation et allègement des véhicules)	Décarbonation par le report modal vers des modes moins carbonés (train, vélos), la hausse du taux de remplissage (mobilité partagée) et dans une moindre mesure la diminution du trafic
Energie	Découplage PIB-énergie accéléré grâce à la technologie (smart grid), mix majoritairement décarboné, essor des systèmes de capture et séquestration ou utilisation du carbone	Amélioration de l' efficacité énergétique plus modérée et transition vers les ENR, décentralisation de la production d'énergie, sobriété des usages.
Technologie et numérique	Poursuite de la forte hausse du numérique en faveur d'une baisse des émissions et d'économie de ressources. Apparition de multiples nouveaux usages. Augmentation du niveau d'investissement R&D au sein des entreprises	Technologies déployées favorisant la limitation de l'usage de ressources et des émissions. Priorité à la durabilité, la réparation, l'économie collaborative et de la fonctionnalité. Niveaux d'investissement R&D plus modérés et fléchés vers les secteurs les plus carbonés catégorisés services essentiels
Renaturation	Approche productiviste : augmentation modérée des surfaces forestières. Gestion intensive pour maximiser la production et satisfaire la demande des filières bois-construction et bois énergie	Approche conservationniste : augmentation importante des surfaces forestières. Exploitation limitée pour favoriser la croissance naturelle et la protection de la biodiversité
Artificialisation	Demande stable en nouvelles constructions. Impacts de l'artificialisation limités par une modification des pratiques, réutilisation des friches et recours à la désartificialisation	Faible volume de nouvelles constructions, concentrées sur les friches existantes. Peu de nouvelles surfaces artificialisées
CCS	Développement proactif, poussé par des subventions et des investissements importants des acteurs de l'énergie	Posture attentiste, technologies employées selon les progrès réalisés sur leur efficacité et leur coût

Le narratif complet et détaillé des scénarios est disponible en [Annexe 1](#).



**Réduction des émissions de GES
et besoin en investissements
d'infrastructures**



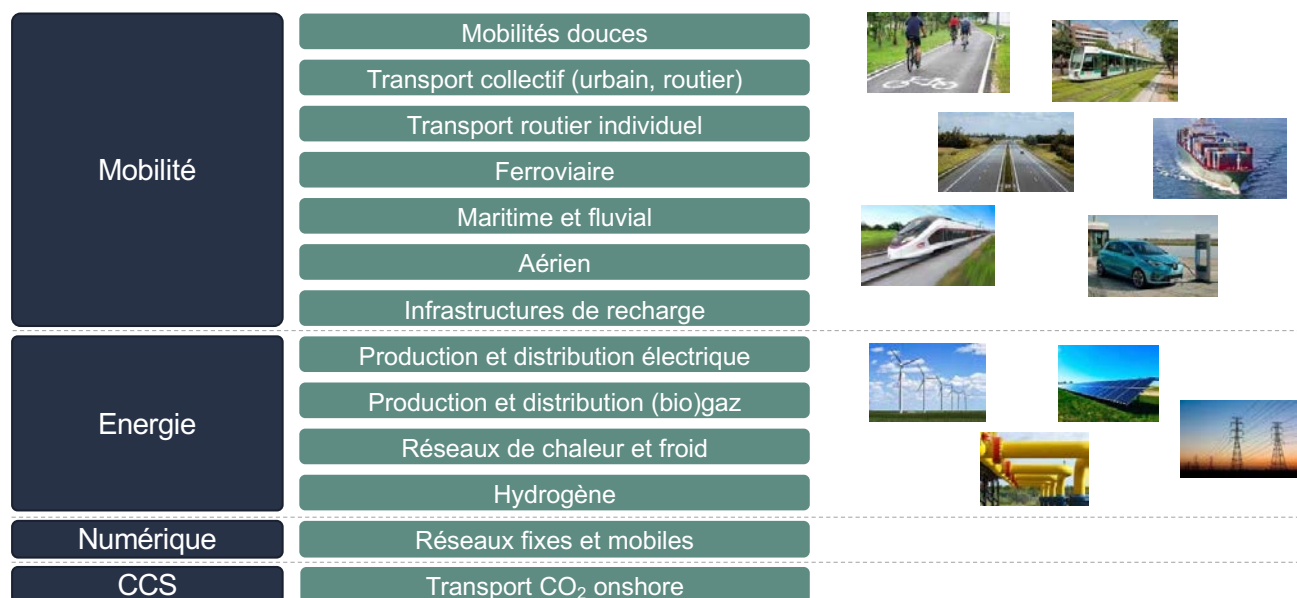
II - Réduction des émissions de GES et besoin en investissements d'infrastructures

Enjeux climat et périmètre couvert par l'étude

En ce qui concerne la réduction des émissions de gaz à effet de serre du territoire national, 3 grands domaines sont d'une importance primordiale pour atteindre les objectifs de la SNBC et sont directement liés aux infrastructures : **la mobilité** et **l'énergie** du fait de leurs usages carbonés et **le numérique** pour son empreinte environnementale croissante et les leviers d'efficacité énergétique qu'il permet.

Chacun d'entre eux est sous-tendu par un réseau d'infrastructures (routes, voies ferroviaires, réseau électrique, réseau mobile, etc.).

Le périmètre concerne l'ensemble des investissements d'infrastructures pour les 3 domaines mentionnés ainsi que la capture et stockage technologique du CO₂ (CCS), détaillés ci-dessous :



Pour chacun de ces domaines, l'objectif est, sur la base d'hypothèses d'usages compatibles avec la trajectoire de décarbonation de la Stratégie Nationale Bas-Carbone, d'estimer le besoin d'infrastructures sous-jacent cohérent de ces usages. Afin de calculer le besoin d'investissement en infrastructures, nous partons de nos scénarios et de leurs hypothèses sous-jacentes, par exemple :

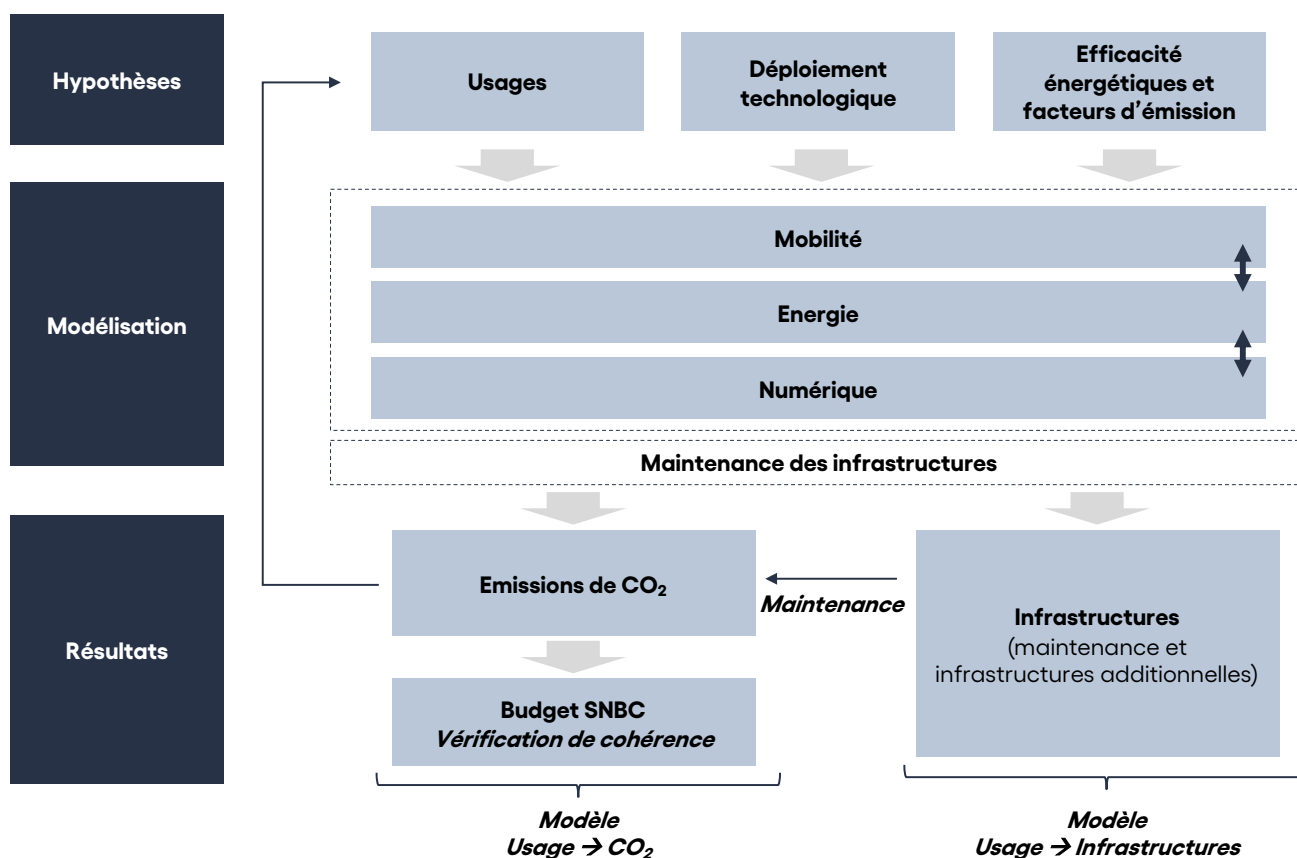
- Usages : mobilité et parts modales (routier, ferroviaire, mobilités douces, etc.),

- Déploiement technologique : pénétration du véhicule électrique, mobilité hydrogène, etc.,
- Efficacité énergétique et facteurs d'émissions.

Ces hypothèses ont été dimensionnées sur la base de l'expertise Carbone 4 ainsi que d'une revue détaillée de la littérature. La comparaison des hypothèses des scénarios Carbone 4 avec d'autres scénarios disponibles publiquement est détaillée en **Annexe 2**.

Trois modèles sectoriels (Mobilité / Énergie / Numérique) ont été construits, calculant les émissions de CO₂ induites par les hypothèses d'usages et technologiques. La contrainte fixée dans le cadre de l'exercice est de faire en sorte que le jeu d'hypothèses soit **compatible avec la trajectoire de décarbonation de la Stratégie Nationale Bas-Carbone**. Chacun de ces modèles est interconnecté aux autres : par exemple les hypothèses d'usage de la voiture électrique vont impacter la consommation électrique. Puis, le besoin en infrastructures est déduit des usages ; l'ensemble permettant de respecter la trajectoire SNBC.

La structure générale de la modélisation est résumée ci-dessous :



Le besoin en infrastructures est, si cela est possible, chiffré physiquement (km de voies, km de réseau électrique, etc.). Lorsque les données disponibles ne permettaient pas un chiffrage physique, un chiffrage monétaire a été directement réalisé. Chaque réseau d'infrastructures est chiffré de manière indépendante via une approche *ad-hoc*. Les besoins sont présentés en évolution par rapport à une référence qui est la dernière année disponible, hors effet Covid (soit 2018 ou 2019 en général).

Ce travail s'est d'abord basé sur une revue bibliographique, et certains résultats d'études identifiées ont pu être directement réutilisés. Dans d'autres cas, des ratios ont pu être déduits. Ces résultats sont ensuite mis en cohérence avec les scénarios utilisés. Pour chaque infrastructure étudiée, une fiche détaillée est disponible en **Annexe 2**.

Les résultats obtenus sont ensuite assemblés, et couvrent les différentes composantes d'investissement :

- La construction de nouvelles infrastructures
- Le renouvellement d'infrastructures existantes
- La maintenance récurrente

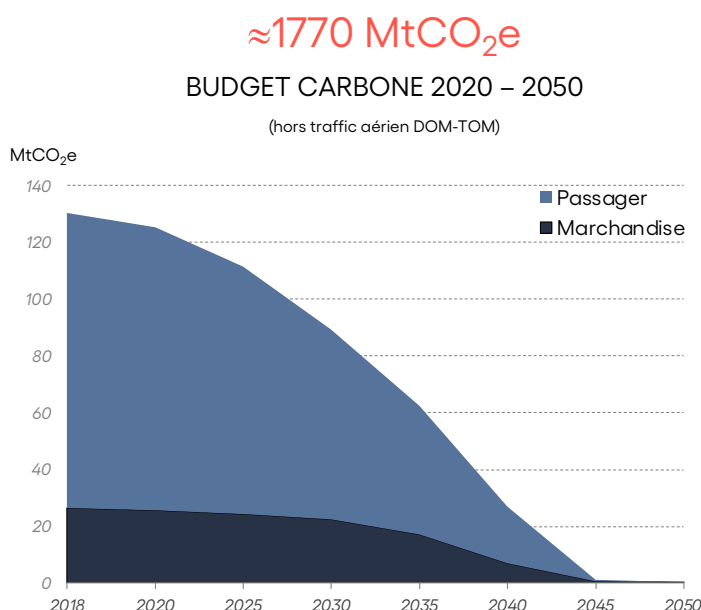
Les infrastructures associées à la mobilité

Décarbonation de la mobilité et évolution des usages dans les deux scénarios

En 2019, la mobilité représentait 31% des émissions de gaz à effet de serre (GES) en France, soit de l'ordre de 136Mt CO₂e/an². C'est donc un secteur majeur pour la décarbonation et les atteintes des objectifs Français en cohérence avec l'Accord de Paris.

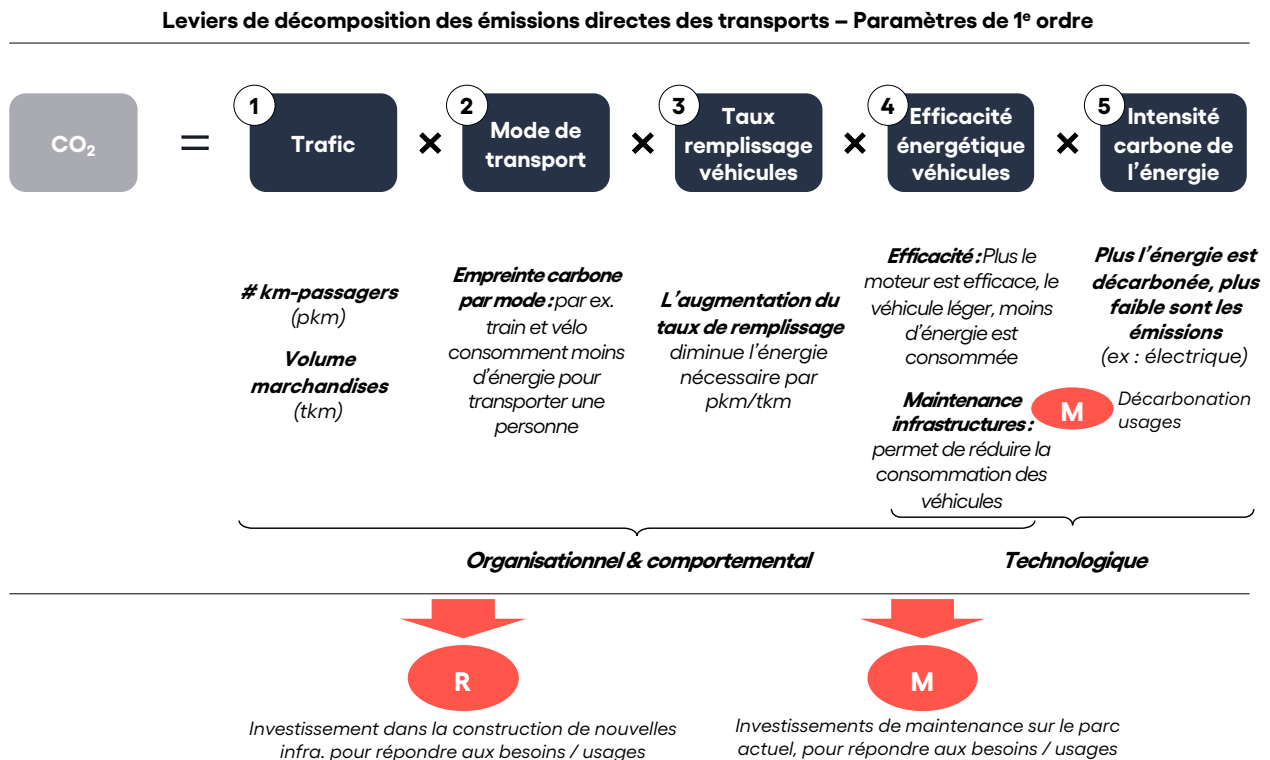
Aussi dans chacun des deux scénarios étudiés, le secteur atteindrait 4Mt CO₂e/an en 2050 en France (objectifs de la SNBC), soit une baisse de près de 97% de ses émissions.

Le budget carbone associé (c'est-à-dire la quantité d'émissions cumulées sur la période 2020-2050 pour respecter les engagements de la France) est d'environ 1770 Mt CO₂e.



² Haut Conseil pour le Climat – Rapport annuel 2021

Un grand nombre de leviers sont activables pour réduire les émissions de GES de la mobilité. Les 5 principaux sont représentés ci-dessous :



Dans chacun des scénarios, ces **leviers sont activés de manière différenciée**, en cohérence avec la logique du scénario.

Dans le scénario Pro-Techno, les leviers technologiques sont fortement sollicités :

- **Intensité carbone** de l'énergie (véhicules électriques, à hydrogène, biogaz, etc.),
- **Efficacité énergétique** (allègement des véhicules, efficacité des moteurs et des packs de batterie, etc.).

Dans le scénario Sobriété, la décarbonation se fait principalement via :

- Le **report modal** (vers des modes moins carbonés : ferroviaire, mobilités douces),
- Le **taux de remplissage des véhicules** (covoiturage, mobilité partagée),
- La **diminution du trafic** (tourisme local, réaménagement urbain etc.).

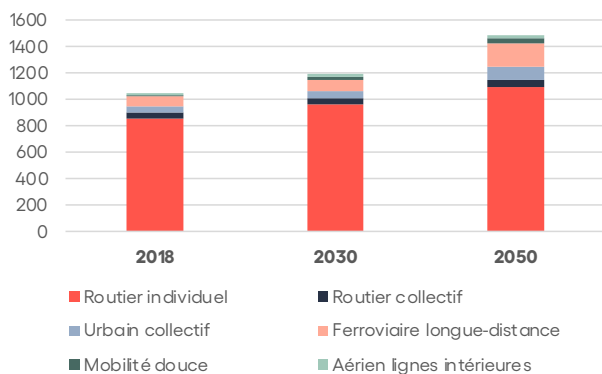
Les usages évoluent donc de manière contrastée dans les deux scénarios.

ÉVOLUTIONS DES MOBILITES DES PASSAGERS DANS LES DEUX SCENARIOS

PRO-TECHNO



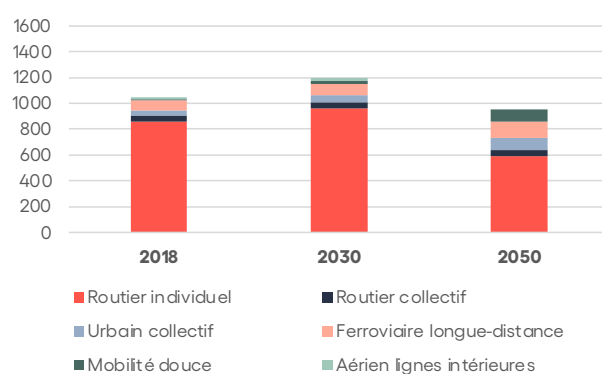
Passagers-km (milliards)



SOBRIETE



Passagers-km (milliards)



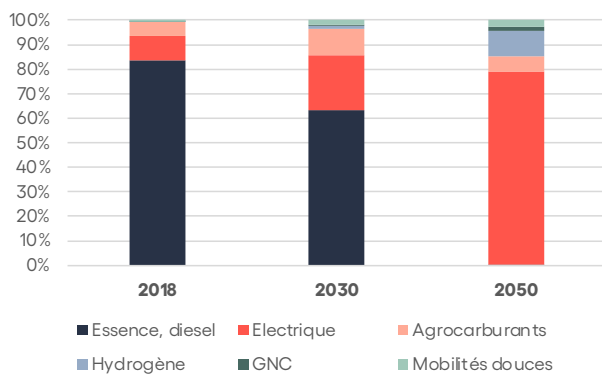
- Les hypothèses sont dimensionnées pour être cohérentes avec les objectifs de réduction de CO₂ de la Stratégie Nationale Bas Carbone
- Les hypothèses (mobilité électrique, taux remplissage, etc.) sont mise en cohérence avec les hypothèses Energie et Numérique

Évolution de la mobilité passager en pkm et par modes

PRO-TECHNO



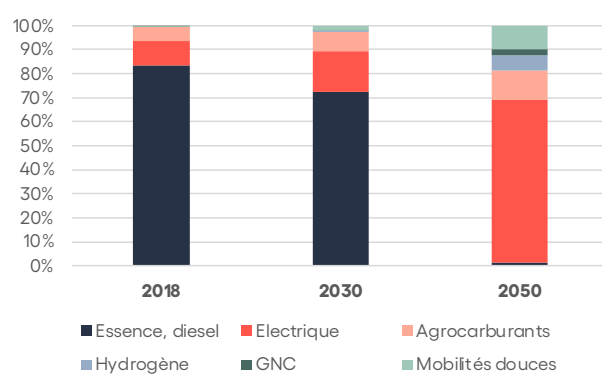
Trafic total en pkm (%)



SOBRIETE



Trafic total en pkm (%)



Évolution des parts des vecteurs énergétiques dans la mobilité passager

Jusqu'à 2030, les 2 scénarios projettent des évolutions **identiques** à la fois en termes de **volumes de trafic** total de passagers et également en termes de **répartition modale**.

Les **différences** entre les 2 scénarios se cristallisent en revanche par des évolutions contrastées en termes de :

- pénétration des **nouvelles motorisations** (e.g., moteur électrique), des carburants alternatifs (e.g., GNV à partir de biogaz, avènement des biocarburants de 2nde et 3^{ème} génération),

- amélioration de l'**efficacité énergétique** par mode (e.g., performance des moteurs, allègement des véhicules),
- **taux de remplissage**.

Entre 2030 et 2050, les deux scénarios projettent des évolutions de **volume de trafic et des répartitions par mode très distinctes** :

- Dans le scénario Pro-Techno, le volume total de trafic passagers continue de croître à la même vitesse qu'entre 2018 et 2030, soit +1,1% par an, alors qu'il se contracte à l'inverse de 1,1% par an pour arriver en 2050 à un niveau de 10% inférieur à 2018 dans le scénario Sobriété.
- Les principaux points de différenciation entre les deux scénarios du point de vue de la répartition des parts modales concernent les **véhicules particuliers** qui poursuivent leur **croissance dans le scénario Pro-Techno** et se **contractent** en revanche **fortement** (-2,5% par an) dans le scénario **Sobriété** au profit des **mobilités partagées** en particulier sur la longue distance, et des **mobilités douces** sur les déplacements du quotidien notamment en agglomération.

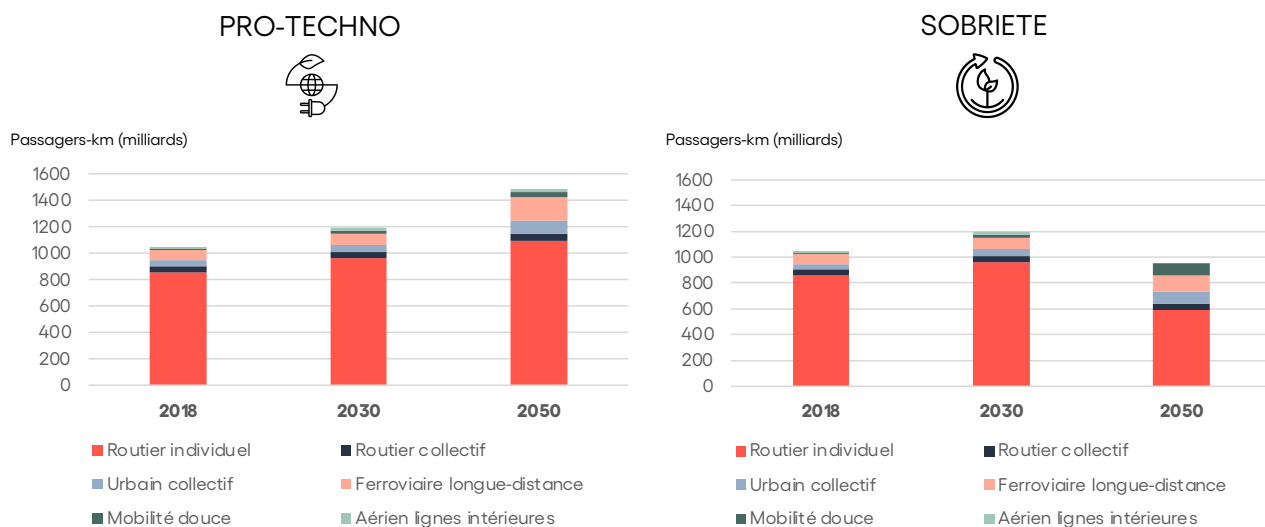
Ces évolutions supposent bien-sûr des changements organisationnels (aménagement du territoire et urbanisme) et comportementaux majeurs qui transparaissent en particulier dans les narratifs du scénario Sobriété.

		Leviers de décarbonation de la mobilité passagers																								
		Trafic					Mode de transport					Taux de remplissage					Efficacité énergétique					Intensité carbone de l'énergie				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Pro-Techno	Activation leviers																									
	Mobilité passagers	<ul style="list-style-type: none"> ➢ Déplacements croissants (à l'image des tendances historiques récentes) ➢ Déplacements de plus en plus rapides (trafic optimisé et fluidifié entraînant une baisse de la congestion) 					<ul style="list-style-type: none"> ➢ Maintien de la prédominance de la voiture individuelle (électrique, autonome et connectée), forte hausse du ferroviaire grande vitesse, légère croissance de l'aérien sur les trajets en métropole, essor important des mobilités douces 					<ul style="list-style-type: none"> ➢ Hausse du taux de remplissage pour l'ensemble des modes en particulier grâce à la technologie : connectivité systématique, apport de l'IA essor du MaaS (Mobility as a service) 					<ul style="list-style-type: none"> ➢ Accroissement de l'efficacité énergétique des motorisations à un rythme plus rapide que les tendances historiques, grâce à une innovation hors norme ➢ Réduction du poids des véhicules (usage de matériaux de pointe...) 					<ul style="list-style-type: none"> ➢ Les véhicules électriques à batterie deviennent ultra-compétitifs d'un point de vue carbone et coût. Les agrocarburants de 2^{de} et 3^{ème} génération s'imposent, l'H2 et le biogaz sont utilisés avant tout pour une mobilité lourde (avions, autocars, trains hors réseau électrifié) 				
Sobriété	Activation leviers	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
	Mobilité passagers	<ul style="list-style-type: none"> ➢ Réduction des distances moyennes parcourues après 2030 ➢ Déplacements en moyenne moins rapides sur les courtes distances 					<ul style="list-style-type: none"> ➢ Hausse substantielle des mobilités douces représentant jusqu'à 10% des distances parcourues, croissance forte des transports en commun dont en particulier le ferroviaire à la fois sur la petite et la grande vitesse, baisse de la mobilité routière individuelle et de l'aérien sur les vols métropolitains 					<ul style="list-style-type: none"> ➢ Hausse du taux de remplissage en particulier grâce à des changements organisationnels et comportementaux (poursuite de l'essor du co-voiturage et de l'autopartage) et parfois au détriment de la fréquence (e.g., des trains grande vitesse plus remplis) 					<ul style="list-style-type: none"> ➢ L'accroissement de l'efficacité énergétique des motorisations se poursuit au rythme des tendances passées ➢ La taille de moteurs diminue, la masse baisse parfois au détriment du matériel embarqué ; la vitesse moyenne est limitée 					<ul style="list-style-type: none"> ➢ Les véhicules électriques à batteries sont les plus répandus avec un dimensionnement adapté à l'usage, le GNV se développe fortement et les biocarburants augmentent à horizon 2035, puis reviennent à un niveau similaire à 2018 en 2050, l'hydrogène reste marginal et réservé à l'industrie 				

1 2 3 4 5 Intensité d'activation des leviers

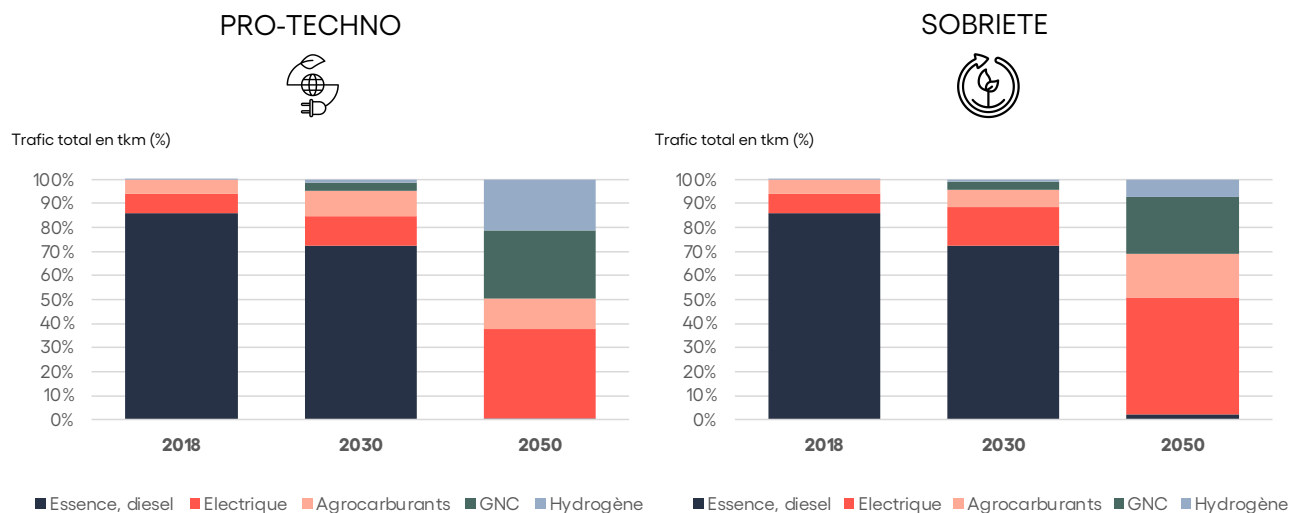
Tableau de synthèse du niveau d'activation relatif des principaux leviers de décarbonation de la mobilité passagers dans chaque scénario

ÉVOLUTIONS DES MOBILITES DES MARCHANDISES DANS LES DEUX SCENARIOS



- Les hypothèses sont dimensionnées pour être cohérentes avec les objectifs de réduction de CO₂ de la Stratégie Nationale Bas Carbone
- Les hypothèses (mobilité électrique, taux remplissage, etc.) sont mise en cohérence avec les hypothèses Energie et Numérique

Évolution du fret en Gt.km par modes



Évolution des parts des vecteurs énergétiques dans le fret

A horizon 2030, comme pour le trafic voyageur, les 2 scénarios projettent des **évolutions identiques en termes de trafic total de marchandises** (392 Gt.km en 2030 contre 332 Gt.km en 2018).

Du point de vue des **parts modales**, les 2 scénarios projettent un **renouveau du fret ferroviaire** contrairement à la tendance historique : le fret ferroviaire atteint ainsi une part modale de 18% dans le scénario Sobriété (12% dans Pro-Techno).

Le développement des **motorisations alternatives décarbonées** suit une trajectoire relativement **similaire** dans les deux scénarios à cet horizon. La part plus forte de

l'électrique dans le scénario Sobriété résulte directement de la plus forte part modale du ferroviaire (pour un trafic total identique dans les deux scénarios).

Entre 2030 et 2050, les deux scénarios projettent des évolutions en volume trafic et parts modales très différentes.

Dans le scénario Pro-Techno, le volume total de fret continue de croître à la même vitesse qu'entre 2018 et 2030 soit +1,4% par an, alors que dans le scénario Sobriété, il se contracte à l'inverse de 1,9% par an pour arriver en 2050 à un niveau de Gtkm 20% inférieur à 2018. Cette baisse est principalement liée à la chute des distances moyennes parcourues par les marchandises sur le sol national du fait notamment d'une repolarisation de l'économie à l'échelle locale.

Les principaux points de différenciation du point de vue de la répartition des parts modales concernent le trafic poids lourds qui poursuit sa croissance dans le scénario Pro-Techno et se contracte en revanche fortement (-3,4% par an) dans le scénario Sobriété avec un report partiel principalement vers le rail et dans une moindre mesure vers le fluvial, ces reports étant en particulier permis par le développement des solutions d'intermodalités.

Ces évolutions traduisent des changements organisationnels majeurs qui transparaissent à nouveau dans les narratifs du scénario sobriété.

Enfin, dans les 2 scénarios l'arrivée de motorisations alternatives et bas-carbone conduit à une quasi-disparition des motorisations thermiques hors biocarburant, celles-ci ne représentant plus que 1 à 2% des tkm en 2050.

		Leviers de décarbonation du fret																								
		Trafic					Mode de transport					Taux de remplissage					Efficacité énergétique					Intensité carbone de l'énergie				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Pro-Techno	Activation leviers	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
	Transport de marchandises	<ul style="list-style-type: none"> Croissance forte des flux de marchandises en circulation dans lignée des tendances historiques Maintien de chaînes logistiques longues, vitesse de livraison accélérée par rapport à aujourd'hui 					<ul style="list-style-type: none"> Report modal d'une faible partie du trafic routier vers le ferroviaire notamment grâce à l'amélioration de l'intermodalité et l'octroi de sillons adaptés Forte hausse du trafic fluvial grâce à la modernisation du réseau et plus d'intermodalité 					<ul style="list-style-type: none"> Taux de remplissage optimisé grâce à de nouvelles technologies (véhicules connectés et autonomes) et notamment une réduction forte des kilomètres parcourus à vide 					<ul style="list-style-type: none"> Accroissement de l'efficacité énergétique des motorisations plus rapide que les tendances historiques, grâce à un effort d'innovation hors norme. Stabilisation du poids des véhicules (usage de matériaux de pointe) compensant en particulier le poids moteurs au GNV, des batteries ou piles à combustible 					<ul style="list-style-type: none"> Le biogaz, suivi par l'électrique et l'H2 sont les principales motorisations des mobilités lourdes routières. Les agrocarburants de 2^{de} et 3^{me} génération complètent ce mix. L'H2 est également utilisé pour partie sur les portions du réseau ferroviaire non électrifiées 				
Sobriété	Activation leviers	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
	Transport de marchandises	<ul style="list-style-type: none"> Contractions des flux et transition vers des chaînes logistiques plus courtes et résilientes Allongement des délais de livraison moyens en particulier pour les livraisons aux ménages 					<ul style="list-style-type: none"> Forte contraction du transport poids-lourd compensé en partie par le rail notamment du fait d'évolutions organisationnelles et réglementaires Triplement du trafic fluvial grâce à un réseau modernisé et de nouvelles plateformes intermodales 					<ul style="list-style-type: none"> Optimisation du remplissage avec une massification qui résulte premièrement d'un objectif d'économie de ressources et d'énergie au détriment des délais de livraison 					<ul style="list-style-type: none"> L'accroissement de l'efficacité énergétique des motorisations se poursuit au rythme actuel, la taille de moteurs diminue au détriment de la puissance et de la vitesse 					<ul style="list-style-type: none"> Le biogaz et les biocarburants deviennent les principales motorisations des mobilités lourdes routières. L'électrique compte pour un quart des motorisations routières et l'hydrogène reste marginal à la fois pour le fret routier et ferroviaire 				

1 2 3 4 5 Intensité d'activation des leviers

Tableau de synthèse du niveau d'activation relatif des principaux leviers de décarbonation du fret dans chaque scénario

Des transformations différenciées par type d'infrastructures

Les transformations nécessaires du parc d'infrastructures de mobilité pour accompagner ces évolutions d'usages sont détaillées ci-dessous ainsi que l'évaluation des dépenses associées.

INFRASTRUCTURES DES MOBILITES ROUTIERES

(ROUTES, PISTES CYCLABLES, ROUTE ELECTRIQUE, IRVE, IRVH)

La décarbonation des mobilités routières et les reports modaux viennent impacter les infrastructures à différents niveaux :

- Développement des infrastructures pour les modes doux : pistes cyclables
- Développement des infrastructures d'alimentation en énergie décarbonée pour les véhicules routiers :
 - o Infrastructures de recharge électrique
 - o Autoroute électrifiée pour le fret poids lourd
 - o Infrastructure de recharge Hydrogène (avec parfois électrolyse sur site)
- Adaptation de la route pour accueillir les Transports Collectifs Urbains, en particulier les Bus à Haut Niveau de Service (BHNS) en site propre

Au-delà de ces activités directement liées à la décarbonation des usages, une part importante d'activité est liée à la rénovation et à la maintenance des infrastructures de la mobilité routière. C'est particulièrement le cas pour la route pour laquelle ce volume d'activités est directement lié au niveau de trafic poids lourd mais peu à la décarbonation des modes de transports.

Les scénarios Pro-Techno et Sobriété se différencient par :

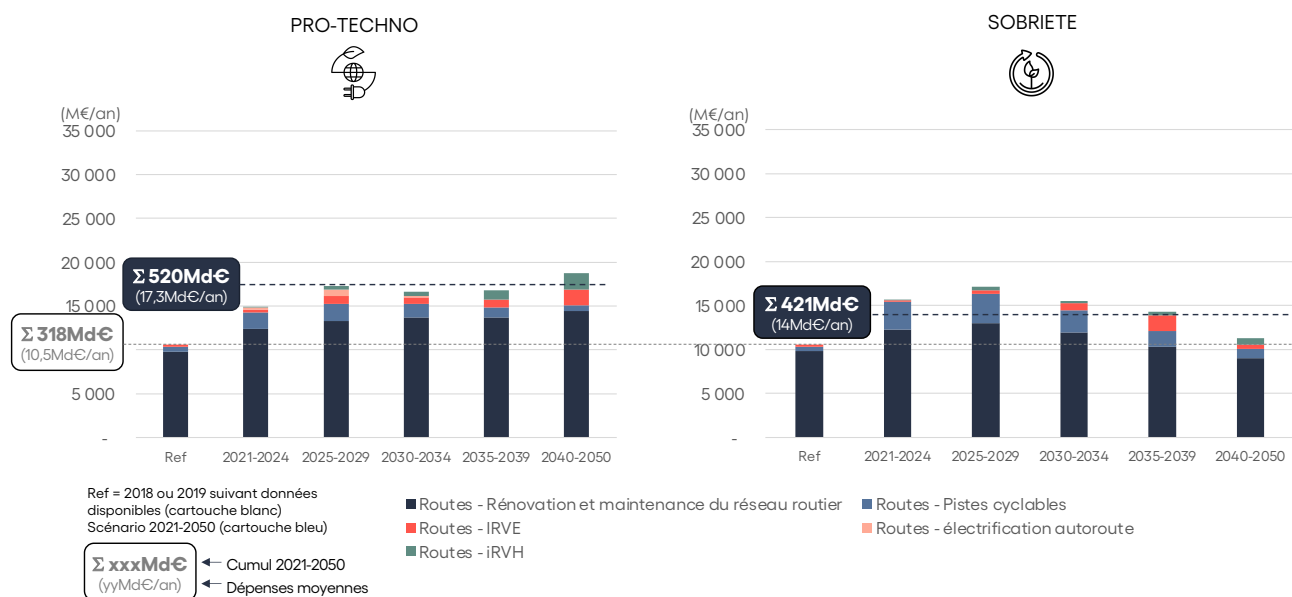
- Un développement beaucoup plus important du réseau de pistes cyclables dans le scénario sobriété, cohérent avec les usages (146 000 km contre 106 000 km de pistes en site propre en 2050).
- L'autoroute électrique ne se développe que dans le scénario Pro-Techno et sur les portions d'autoroute les plus fréquentées (3000 km d'autoroutes équipés dans les deux sens avec les hypothèses considérées dans le scénario Pro-Techno³).
- Les IRVE (Installations de Recharge de Véhicules Électriques) et IRVH (Installations de Recharge de Véhicules à Hydrogène) se développent plus tôt et plus massivement dans le scénario Pro-Techno, les besoins étant accrus dans ce scénario.
- Les opérations de maintenance et de rénovation du réseau routier, relativement similaires sur 2020-2030, se différencient fortement post 2030, en raison des évolutions divergentes du volume de fret routier. Dans le scénario Sobriété, nous n'avons pas étudié la possible contraction du réseau ou la baisse de capacité de certains axes.

³ Suivant l'évolution du taux d'équipement des poids lourd et de la compétitivité économique des différentes solutions, 9000 km pourraient être équipés comme dans l'étude du MTE (<https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/GT1%20rapport%20final.pdf>)

Du point de vue dépenses, les infrastructures de la mobilité routière représentent actuellement 10,5 Md€/an, la majeure partie de ces dépenses correspondant à la maintenance et la rénovation du réseau routier. Dans le scénario Pro-Techno, le montant est porté à 17Md€/an en moyenne sur la période 2021-2050 dont 1,3Md€/an pour les pistes cyclables et 2,3Md€ pour l’approvisionnement en énergie bas-carbone (IRVE, IRVH, autoroute électrique). En ce qui concerne le scénario Sobriété, ce montant total est de 14Md€/an en moyenne sur 2021-2050 dont 2Md€ pour les pistes cyclables et 1Md€ pour l’approvisionnement énergétique bas-carbone.

Dans le scénario Pro-Techno, ces dépenses croissent sur l’ensemble de la période, alors que dans le scénario Sobriété, les dépenses passent par un maximum en 2030 avant de décroître jusqu’à redevenir en 2050 proches du niveau historique.

La maintenance et la rénovation du réseau routier restent les principaux postes de dépense avec une différence de 3Md€/an entre les 2 scénarios.



Chronique des dépenses pour les infrastructures routières dans les deux scénarios

INFRASTRUCTURES FERROVIAIRES

La contribution du rail à la décarbonation de la mobilité repose sur la capacité du système de transport ferroviaire d’accueillir le développement des trafics (qui croissent en volume et en part modale pour la mobilité voyageur et pour le transport des marchandises dans les deux scénarios).

Cette mise en cohérence se décompose en :

- Remises à niveaux des voies (tel que recommandé par différents rapports) en cohérence avec les projections de trafic.

- Un plan de développement du fret ferroviaire (confère rapport 4F⁴).
- Le développement de nouvelles lignes dans la mesure où celles-ci sont cohérentes avec la transformation des usages du scénario et qu'elles contribuent sur leur cycle de vie à la décarbonation (pour mémoire l'empreinte carbone de la construction d'une ligne ferrée sous-terrain est telle que la performance climat du projet global peut se discuter et doit donc être évaluée avec rigueur).

Ces évolutions du parc d'infrastructures impactent les dépenses de maintenance associées ainsi que l'évolution des trafics.

Les principales différences entre les deux scénarios étudiés résident dans le type de lignes (en fonction de leur fréquentation) concernées par le développement des trafics

- Pro-Techno : développement des lignes à fort trafic (UIC 2 à 6 selon la classification de l'Union Internationale des Chemins de fer) en priorité du fait de la croissance des flux fret et de la poursuite de la métropolisation. Dans ce scénario, les grands projets occupent une place importante, ainsi les grands projets actuellement engagés ou à l'étude (extensions de LGV, grands projets transfrontaliers⁵) seraient à priori maintenus sous réserve de validation de leur performance carbone sur leur cycle de vie (émissions évitées dans différents scénarios de trafics versus impact carbone de l'infrastructure).
- Sobriété : développement des lignes à faible trafic (UIC 7 à 9) en priorité du fait d'une moindre croissance des flux de fret et du développement du trafic sur le réseau secondaire (développement des villes moyennes). En revanche, dans ce scénario et compte tenu de l'évolution projetée des flux voyageur et fret, le besoin en grands projets est fortement réduit, conduisant à questionner la pertinence de grands projets déjà engagés ou à l'étude (extensions de LGV, grands projets transfrontaliers⁶).

Du point de vue des dépenses, le rail représente 4,9 Md€/an en année de référence. Dans le scénario Pro-Techno ce montant est porté à 9Md€/an en moyenne sur les 30 prochaines années dont :

- 2,5Md€/an pour les UIC 2 à 6,
- 400M€/an pour les UIC 7 à 9,
- 5,5 Md€/an pour les nouveaux projets,
- 700M€/an pour le Fret.
-

En ce qui concerne le scénario Sobriété, le montant est de 5,5Md€/an dont :

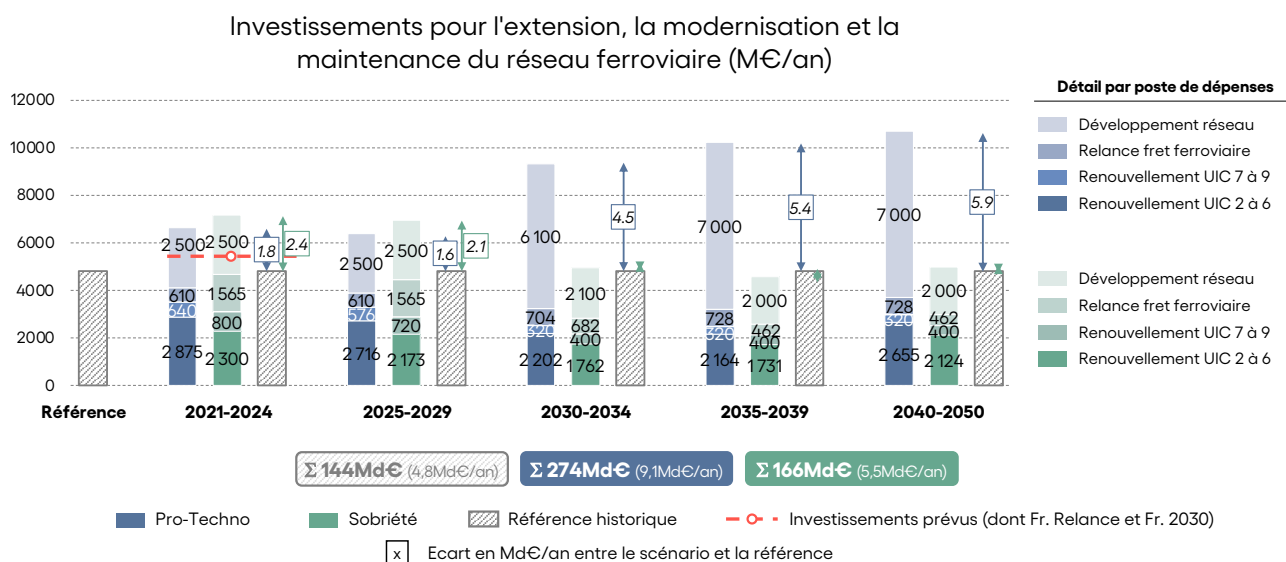
- 2Md€/an pour les UIC 2 à 6,
- 500M€/an pour les UIC 7 à 9,
- 2,2 Md€/an pour les nouveaux projets,
- 830M€/an pour le Fret.

⁴ <https://www.fret4f.fr/plan-de-reliance/>

⁵ Voir par exemple le volet infrastructure de la LOM qui comprend des grands projets de ce type

⁶ Voir par exemple le volet infrastructure de la LOM qui comprend des grands projets de ce type

Le scénario Pro-Techno avec sa forte croissance des flux conduit ainsi à des dépenses très supérieures et continûment croissantes, alors que dans le scénario sobriété, après un effort significatif sur les 10 ans à venir, le niveau des dépenses revient proche du niveau de l'année référence.



Chronique des dépenses pour les infrastructures ferroviaires dans les deux scénarios

INFRASTRUCTURES DES TRANSPORTS COLLECTIFS URBAINS

Une partie de la décarbonation de la mobilité repose sur l'accroissement des flux de passagers dans les transports collectifs urbains (TCU) qui prennent des parts modales à la voiture particulière.

Cet accroissement des flux nécessite un développement cohérent de l'offre de TCU (métro, TER, Tramway, BHNS) en particulier via le développement de nouveaux linéaires d'infrastructure.

Au-delà du développement de ces nouveaux linéaires, un volume significatif d'activité est lié à la maintenance du parc des infrastructures des Transports Collectifs Urbains, activité dont le volume est en partie lié au trafic.

Les scénarios Pro-Techno et Sobriété se différencient par le volume et la géographie du développement du trafic en TCU. Ceci impacte directement la localisation et le type de nouvelles infrastructures nécessaires :

- Pro-Techno : les métropoles portent majoritairement la croissance du trafic, ce qui se traduit par une croissance de l'offre dans les métropoles et par un recours accru au métro (Grand Paris Express et métros hors Ile de France).
- Sobriété : la croissance des flux est davantage portée par les villes moyennes, associée à un développement plus important des tramways et des BHNS dans celles-ci. Le moindre développement de la métropole parisienne et des trafics associés conduirait à une mise en question d'une

partie du Grand Paris Express (pour mémoire celui-ci représente un doublement du linéaire de métro parisien, soit +200km).

Du point de vue des dépenses, les infrastructures de transports en commun représentent 2,5 Md€/an en année de référence.

- Dans le scénario Pro-Techno ce montant est porté à 3,8 Md€/an en moyenne sur les 30 prochaines années dont 2,1 Md€/an pour la modernisation, le renouvellement des équipements et la maintenance courante de l'ensemble des réseaux d'infrastructures de transports en commun tram et métro.
- En ce qui concerne le scénario Sobriété, le montant est de 2,9 Md€/an dont 1,8 Md€/an pour la modernisation, le renouvellement des équipements et la maintenance courante de l'ensemble des réseaux d'infrastructures de transports en commun tram et métro.

Nota : Les dépenses associées à la mise en site propre des lignes de BHNS sont incluses dans les dépenses de la route.

TRANSPORT FLUVIAL

Le transport fluvial, en assurant une part croissante du fret contribue à la décarbonation du transport de marchandises. Dans nos deux scénarios, les volumes de fret fluvial sont proches sauf en fin de période (12Gtkm pour Sobriété en 2050 contre 16Gtkm pour Pro-Techno), ce qui engendre un besoin similaire en termes d'infrastructures, d'autant que celles-ci ne sont pas saturées.

On notera que dans le scénario Pro-Techno cette croissance est portée par la croissance globale de la mobilité marchandises alors que dans le scénario Sobriété le développement du fret fluvial provient du report modal (lié notamment à l'évolution du rapport à la vitesse).

Du point de vue des infrastructures, ce développement du volume de fret fluvial est associé en particulier à :

- L'extension du réseau via les grands projets (canal Seine-Nord Europe, mise à grand gabarit de la Seine entre Bray et Nogent-sur-Seine).
- Des mises à niveau et la modernisation des voies existantes afin d'adopter des méthodes d'exploitation plus performantes.
- Des mises en gabarit supérieur de certaines voies.
- Le développement d'infrastructures favorisant l'intermodalité entre le rail et la route.

Les actions de maintenance évoluent en cohérence avec cette évolution du réseau et des trafics.

Les dépenses annuelles de référence sont de 220M€/an. Elles passent respectivement à 475M€/an et 484M€/an pour Pro-Techno et Sobriété sur la période 2021-2050.

L'extension du réseau avec les grands projets (4,8Md€ soit 160M€/an sur 30 ans) explique la majorité de cet accroissement de dépenses.

TRANSPORT MARITIME

Notre étude n'a pas intégré la scénarisation des échanges internationaux qui sont l'essentiel de l'activité portuaire.

Nous avons projeté, en ordre de grandeur, une évolution du besoin en investissements dans les infrastructures portuaires en supposant que l'évolution du trafic maritime est proportionnelle à l'évolution des flux de fret sur le territoire.

D'ici à 2030, nous projetons ainsi une hausse des dépenses de maintenance et de modernisation des ports proportionnelle à la hausse du trafic de marchandises observée sur le territoire français, qui comprend :

- Les dépenses habituelles dédiées à la maintenance des infrastructures portuaires en augmentation dans les 2 scénarios.
- Les dépenses qui correspondent notamment à une amélioration des aménagements des accès aux ports, des bassins portuaires ou encore à des installations nouvelles de terminaux à conteneurs qui augmentent également.
- Une partie des mesures exceptionnelles du Plan de relance liées au verdissement des ports (travaux destinés à favoriser le report modal vers le fret ferroviaire et fluvial) qui sont prolongées.

Après 2030, l'évolution différenciée du trafic de marchandises dans les 2 scénarios conduit à une évolution contrastée des dépenses.

- Croissance dans le scénario Pro-Techno.
- Contraction dans le scénario Sobriété liée à la réduction des flux de fret, amplifiée de 10% en raison de la relocalisation de l'économie et du raccourcissement des chaînes logistiques de ce scénario.

Les dépenses annuelles de 130M€/an en année de référence, augmenteraient en moyenne sur 2021-2050 de 15% dans le scénario Sobriété et doubleraient quasiment dans le scénario Pro-Techno.

TRANSPORT AERIEN

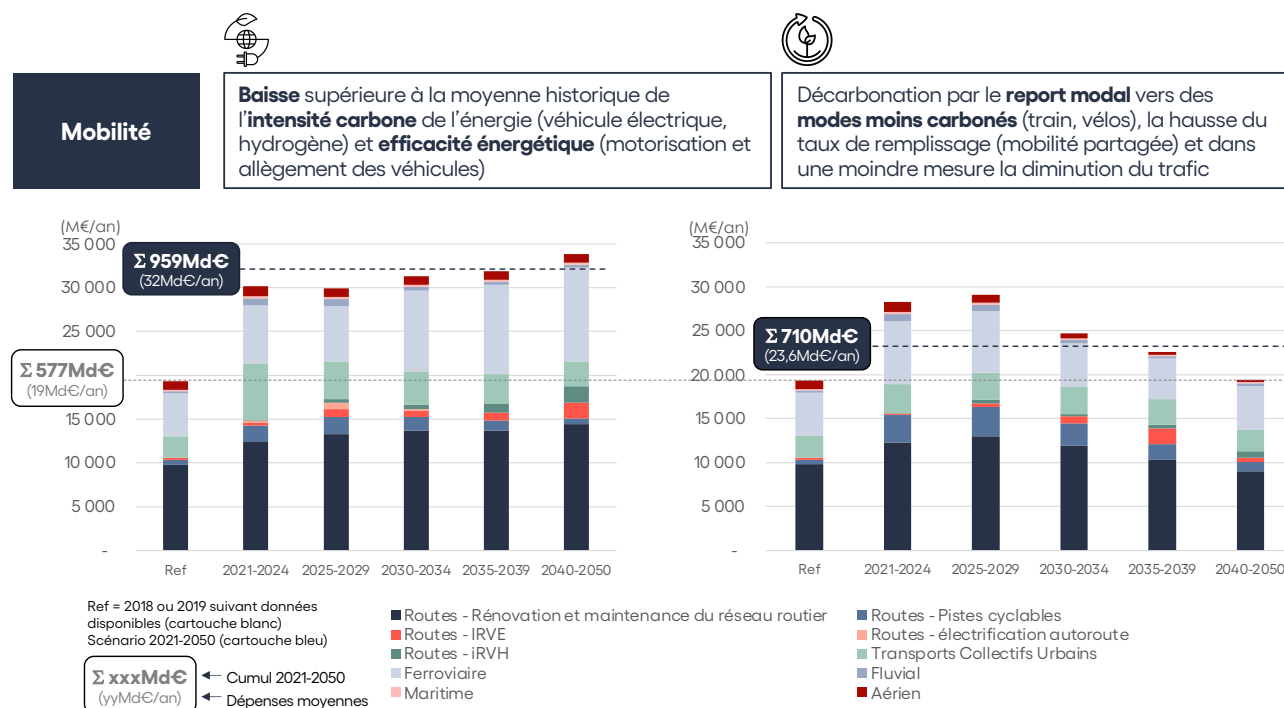
L'étude n'a pas porté sur le trafic voyageur aérien international⁷. Nous avons ici projeté une évolution du besoin en investissements dans les infrastructures aéroportuaires en ordre de grandeur et avec une évolution qui est essentiellement portée par la dynamique du trafic métropolitain (très légèrement croissant de 2030 à 2050 dans le scénario Pro-Techno et tendant vers zéro dans le scénario Sobriété, la longue distance métropolitaine étant essentiellement assurée par les autres modes).

Les dépenses liées à la maintenance, la modernisation et l'extension de l'infrastructure aéroportuaire française en métropole (i.e. hors commerces dans les aéroports et

⁷ Le fret de marchandise transporté par avion étant en comparaison marginal, il n'est par conséquent pas pris en compte

dépenses de sûreté et sécurité) sont ainsi stables et comparables à la référence dans le scénario Pro-Techno (environ 1Md€/an soit 30Md€ d'ici à 2050) et fortement décroissantes à partir de 2030 dans le scénario Sobriété pour atteindre environ 250 M€/an en 2050 (soit 16,5Md€ d'ici 2050) - les investissements restants étant concentrés sur le réseau Aéroport de Paris.

Bilan des dépenses pour les infrastructures des mobilités



Chronique des dépenses pour les infrastructures des mobilités dans les deux scénarios

Les deux scénarios se caractérisent par :

- **Un cumul de dépenses sur les 30 prochaines années fortement différencié** : le scénario Pro-Techno conduit à un accroissement moyen de 65% des dépenses sur les 30 prochaines années par rapport à la référence historique (32Md€/an contre 19Md€/an), alors que le scénario Sobriété conduit à des dépenses annuelles moyennes de 23,6Md€/an, soit environ +23%.
- **Des montants comparables sur la période 2020-2030** (environ 30Md€/an) mais alloués à **des projets d'infrastructures différents, typiquement** :
 - o Développement plus important des pistes cyclables dans Sobriété.
 - o Renouveau du réseau ferré secondaire, et flux modérés dans Sobriété pouvant conduire à la remise en cause de grands projets contre développement des grandes lignes et des flux dans Pro-Techno.
 - o Développement des TCU dans les villes moyennes pour Sobriété et dans les grandes métropoles pour Pro-Techno.
- **Post 2030**, une poursuite de la **hausse des dépenses** dans Pro-Techno portées par la hausse des flux alors que dans le **scénario Sobriété**, après une phase de

transformation du parc d'infrastructures, la modération des usages permet de **tendre vers des niveaux de dépenses comparables à la référence historique.**

Par ordre décroissant, les infrastructures routières (y compris pistes cyclables, infrastructures énergétiques associées), le rail et les transports collectifs urbains concentrent l'essentiel des dépenses (à eux trois 95% des dépenses sur la période).

Concernant les enjeux climat et cette synthèse des dépenses pour les infrastructures des mobilités dans nos deux scénarios, il est à noter :

- qu'un rebouclage carbone sur le cycle de vie des différentes infrastructures serait à réaliser en complément afin d'apprécier les performances climat des différentes actions, en se basant sur plusieurs hypothèses d'usage.

- que ceci est d'autant plus vrai que le surcroît d'activité (et donc d'émissions de carbone) et de dépenses associées n'est pas toujours lié à des investissements de transition bas-carbone, comme par exemple ceux liés à la rénovation et la maintenance du réseau routier (ces actions de maintenance nécessaires indépendamment d'une stratégie de décarbonation, permettraient d'éviter des surconsommations - de l'ordre de 5% sur des chaussées en mauvais état - des véhicules et ainsi de limiter leur consommation d'énergie et leurs émissions).

Les infrastructures énergétiques (électricité, gaz, Hydrogène, réseaux de chaleur)

Ce chapitre du volet réduction traite des infrastructures associées au secteur de l'industrie de l'énergie :

- Production, transport et distribution d'électricité,
- Des infrastructures associées au gaz (production de bio gaz, transport et distribution de gaz)
- Des réseaux de chaleur
- Des infrastructures de transport d'hydrogène (hydrogénoducs)

Évolution des usages de l'énergie et transition bas-carbone

Les émissions directes du secteur de la production d'énergie⁸ représentent environ 10% des émissions de gaz à effet de serre (GES) de la France⁹. Dans un contexte d'électrification des usages, c'est donc un secteur d'importance pour la transition bas-carbone et les atteintes des objectifs climat de la France.

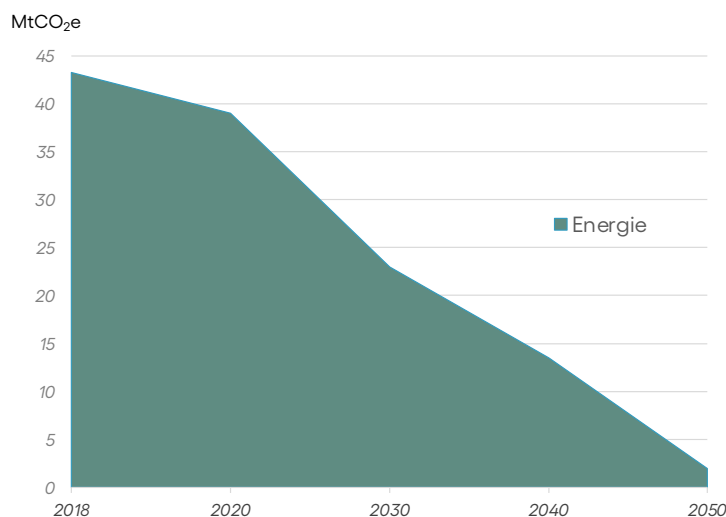
⁸ Le secteur de L'industrie de l'énergie comprend des émissions de la production d'énergie (centrales électriques, production de chaleur, incinération de déchets avec récupération d'énergie ; les émissions liées à la transformation d'énergie (raffineries, transformation de combustibles minéraux solides...) et l'extraction et la distribution d'énergie (pétrole, gaz naturel, charbon, etc.). source : CITEPA

⁹ <https://www.hautconseilclimat.fr/publications/rapport-grand-public-2021/>

Chacun des deux scénarios étudiés conduit à une décarbonation quasi complète du secteur à l'horizon 2050 soit 2MtCO₂e/an (objectif de la SNBC, soit 95% de réduction par rapport à 2018) associée à des émissions cumulées sur la période 2020-2050 ne dépassant pas 570 MtCO₂e.

570 MtCO₂e

BUDGET CARBONE 2020 – 2050



La moitié des émissions de ce secteur est liée à la **production d'électricité**, dont le principal levier de décarbonation est le changement de source énergétique (le gaz représente ainsi 65% des émissions pour 7% de la production électrique française ; le charbon et le fioul 15% des émissions pour 1% de la production).

Les autres segments d'émissions importants concernent le raffinage du pétrole pour 19% des émissions, l'incinération des ordures ménagères et les **réseaux de chaleurs** urbains pour 9%.

Le secteur de la production électrique est d'autant plus important que la décarbonation de la France passe par une électrification accrue des usages.

Le gaz, importé de l'étranger par gazoduc ou sous forme de GNL (Gaz Naturel Liquéfié), représente cependant 15% de la consommation d'énergie primaire de la France et 20% des émissions de la France (environ 88 MtCO₂e en 2019).

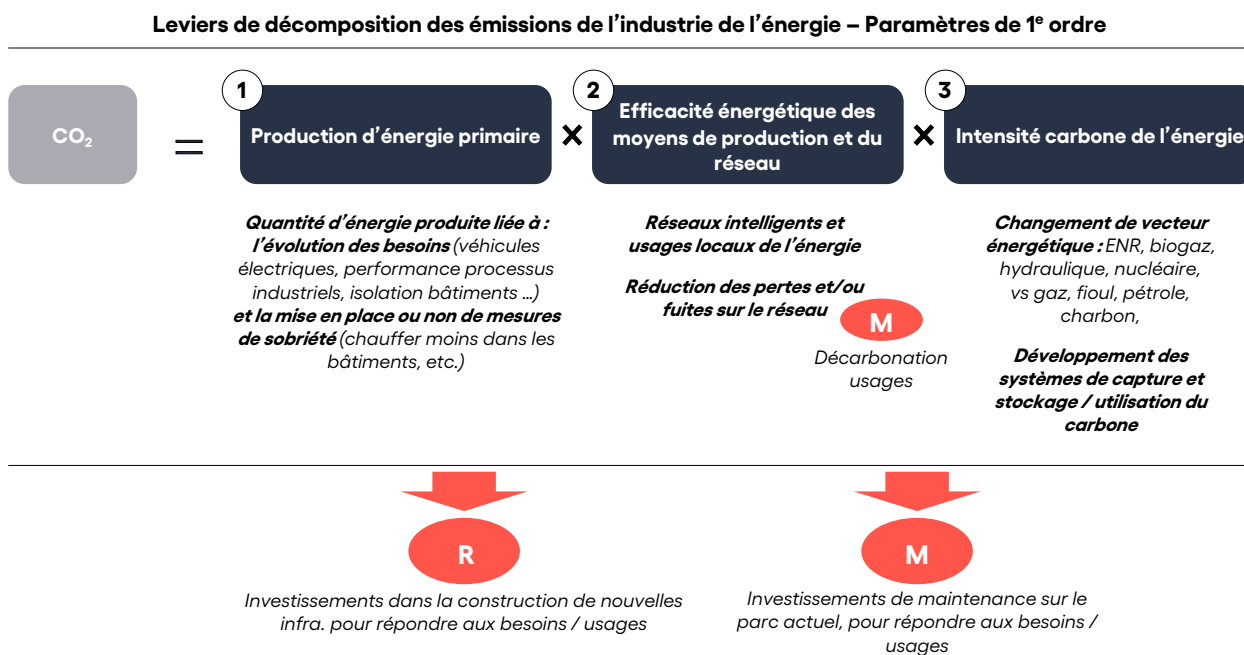
Les principaux postes de consommation sont :

- Le bâtiment (logement et tertiaire) : 47%
- L'industrie : 28%
- L'énergie : 22%

Aucun budget carbone n'est directement associé à la consommation de gaz. Cependant, à travers les budgets carbone des secteurs du bâtiment, de l'industrie et de l'énergie, les

émissions de GES associées à la consommation de gaz devront nécessairement baisser drastiquement. Le respect des engagements de la France en termes d'émissions de GES conduit à une réduction de 65% de la consommation de gaz.

Les principaux leviers pour réduire les émissions de GES de l'industrie de l'énergie sont représentés ci-dessous :



Ces leviers sont activés de manière différenciée et en cohérence avec chaque scénario.

Dans le scénario Pro-Techno, on observe un **découplage énergie – PIB supérieur à la tendance historique** grâce à l'efficacité énergétique et aux changements de vecteurs énergétiques.

Plusieurs changements se matérialisent dès lors :

- Les **besoins en énergie**, nécessaires à l'atteinte d'un niveau de vie supérieur à celui d'aujourd'hui pour une part significative de la population, sont en **croissance**, accompagnés d'une accélération du découplage énergie-PIB. **L'électrification des véhicules**, le développement d'une **filière Hydrogène bas-carbone** (issue de l'électrolyse), une hyper-connectivité de la société sont des facteurs supplémentaires de croissance de la demande d'électricité.
- L'électricité est fournie par un **mix majoritairement décarboné**, mêlant énergies renouvelables et nucléaire. La **part des énergies renouvelables est proche de la moitié** de la production électrique. Le reste de la production électrique est assuré par un socle pilotable et centralisé.

- En ce qui concerne la production, le transport et la distribution de gaz :
 - o Dans un premier temps, le réseau actuel intègre petit à petit une part d'énergie bas-carbone croissante (hydrogène ou biogaz).
 - o Par la suite, **des réseaux additionnels, à taille locale ou régionale, se développent** pour distribuer des volumes plus importants d'énergie 100% bas-carbone (biogaz ou hydrogène issu de l'électrolyse).
 - o Ces évolutions s'accompagnent d'une **émergence de moyens de production décentralisés bas-carbone** (électrolyseurs pour l'hydrogène, méthaniseurs pour les déchets et la biomasse, etc.).
- Pour le chauffage des bâtiments :
 - o Forte électrification des moyens de chauffage, encouragée par de nouvelles normes et des subventions.
 - o Déploiement important des réseaux de chaleur, dans un contexte d'urbanisation et de densification des villes croissante.

Dans le scénario Sobriété, les technologies de production d'énergie font l'objet d'optimisations, cependant sans bouleversements fondamentaux. La réduction de la consommation d'énergie est actionnée avant tout par **la baisse des flux physiques**.

- La croissance des besoins énergétiques reste limitée dans une logique d'économie circulaire et de sobriété des usages.
- La production électrique est fournie par un **mix majoritairement décarboné**, s'appuyant principalement sur les nouvelles énergies renouvelables (éolien, solaire) qui se développent fortement. Cette décentralisation des moyens de production non pilotable implique un redimensionnement important du système de distribution.
- Afin d'assurer l'équilibrage du réseau, des **systèmes de stockage** (hors périmètre de l'étude) sont déployés, mais le **pilotage se fait tout d'abord par la consommation**, avec un recours important à l'**effacement**¹⁰.
- Les **réseaux de transport et de distribution** d'électricité sont renforcés pour faire face à la généralisation de moyens de production décentralisés et non pilotables.
- En ce qui concerne la production et la distribution de gaz :
 - o **Émergence de moyens de production décentralisés bas-carbone** (en particulier les méthaniseurs pour les déchets et la biomasse), qui permettent de valoriser les ressources disponibles (déchets agricoles, etc.), même à taille réduite.
 - o Cette production décentralisée et à petite échelle, est soit consommée localement, soit injectée dans le réseau.
 - o Le réseau actuel intègre ainsi une part d'énergie bas-carbone croissante.

¹⁰ <https://www.cre.fr/Electricite/Reseaux-d-electricite/Effacements>

- Pour le chauffage des bâtiments :
 - o Forte électrification des moyens de chauffage, encouragée par de nouvelles normes et des subventions. Cette consommation électrique additionnelle est partiellement compensée par des usages sobres (consigne de température plus basse, baisse du chauffage lors des absences...).
 - o Déploiement des réseaux de chaleurs, qui restent limités aux grandes zones urbaines.

		Consommation d'énergie primaire	Efficacité énergétique des moyens de production et du réseau	Intensité carbone de l'énergie
Pro-Techno	Activation leviers	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5
	Synthèse des narratifs	<ul style="list-style-type: none"> > Hausse de la consommation d'énergie sous l'effet de la croissance, malgré une baisse du couplage énergie-PIB plus forte que la moyenne historique récente > L'électrification et l'avènement d'une filière hydrogène bas-carbone mature augmente les besoins énergétiques primaires pour une même quantité d'énergie finale 	<ul style="list-style-type: none"> > Forte croissance des rendements des solutions renouvelables : bénéficiant de nombreuses innovations technologiques > Un réseau de transport et de distribution de l'énergie très dense, intelligent et hautement efficace avec apparition de technologies de stockage bas-carbone (batterie, hydrogène) ultra-performantes qui garantissent l'absence d'effacement 	<ul style="list-style-type: none"> > Changement de vecteurs énergétiques vers des solutions moins carbonées en substitution des énergies fossiles : hydraulique, ENR, nucléaire, biométhane et biomasse durable à la place du gaz, pétrole, fioul et charbon > Développement important de l'hydrogène bas carbone par électrolyse > L'usage d'énergies carbonées reste possible grâce au déploiement de CCS¹ ou CCU²
Sobriété	Activation leviers	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5
	Synthèse des narratifs	<ul style="list-style-type: none"> > Baisse de la consommation d'énergie liée à une baisse des flux physiques dans une logique d'économie circulaire (la préservation des ressources est prioritaire) et de sobriété > Poursuite de la baisse du couplage énergie-PIB à des niveaux similaires à la moyenne historique récente > Les territoires se réapproprient la politique énergétique (autonomie, autoconsommation des particuliers) 	<ul style="list-style-type: none"> > Des solutions renouvelables avec une meilleure efficacité énergétique et un accroissement du niveau de recyclage et de réutilisation > Meilleure valorisation de l'énergie, notamment la chaleur fatale des sites d'incinération ou industriels, et la réduction des fuites/perdes sur réseau > Gestion optimale du réseau en heure de pointe et effacement en cas de saturation des capacités 	<ul style="list-style-type: none"> > Changement de vecteurs énergétiques vers des solutions moins carbonées en substitution des énergies fossiles : hydraulique, ENR, nucléaire, biométhane et biomasse durable à la place du gaz, pétrole, fioul et charbon

(1) Capture du carbone et séquestration (2) Capture du carbone stockage et utilisation

1 2 3 4 5 Intensité d'activation des leviers

Ainsi, sur cette base, la production énergétique et les mix énergétiques associés ont été projetés.

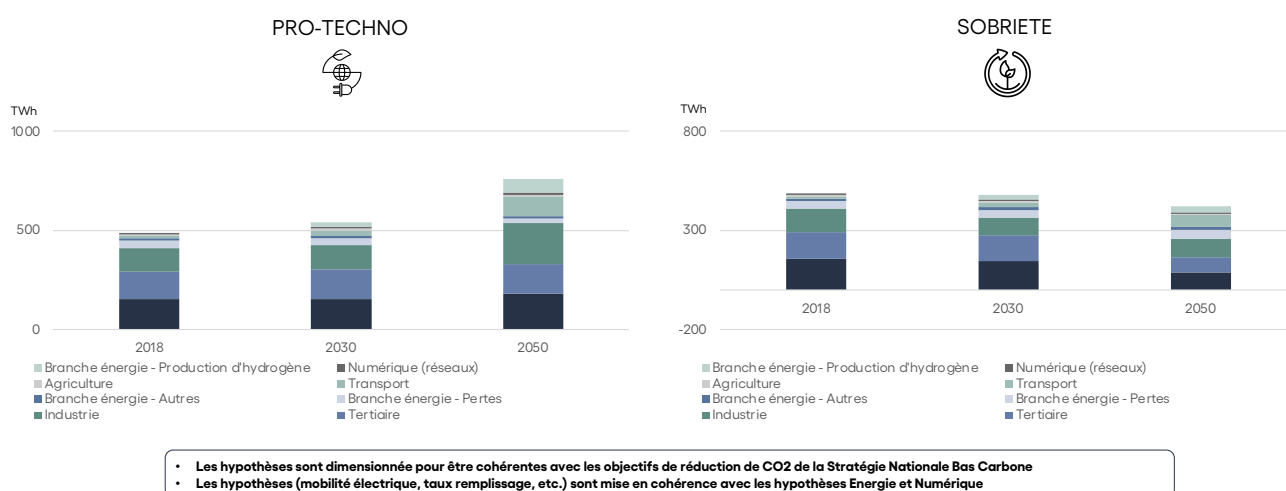
L'électricité, socle de la décarbonation dans les deux scénarios

CONSOMMATION ET PRODUCTION D'ELECTRICITE DANS LES DEUX SCENARIOS

Dans le **scénario Pro-Techno**, la croissance de la consommation d'électricité est modérée d'ici à **2030 (+12%)** et s'accélère entre **2030 et 2050 (+40%)**. Elle s'explique par une électrification importante des usages, notamment de la mobilité dans un contexte de croissance économique soutenue. Le développement de la filière hydrogène important dans ce scénario engendre une augmentation de la consommation d'électricité.

Dans le **scénario Sobriété**, le secteur du transport s'électrifie également mais dans une moindre mesure. La **croissance de la demande électrique dans le transport** est **compensée** par une **réduction** conséquente des consommations électriques du secteur

du **bâtiment**, en partie grâce à la **rénovation énergétique**. Dans ce scénario, l'industrie progresse également en matière d'efficacité énergétique. Finalement, la **consommation d'électricité 2050** est légèrement **en dessous de la référence 2018**, cette baisse intervenant principalement sur la période 2030-2050 (-12%).



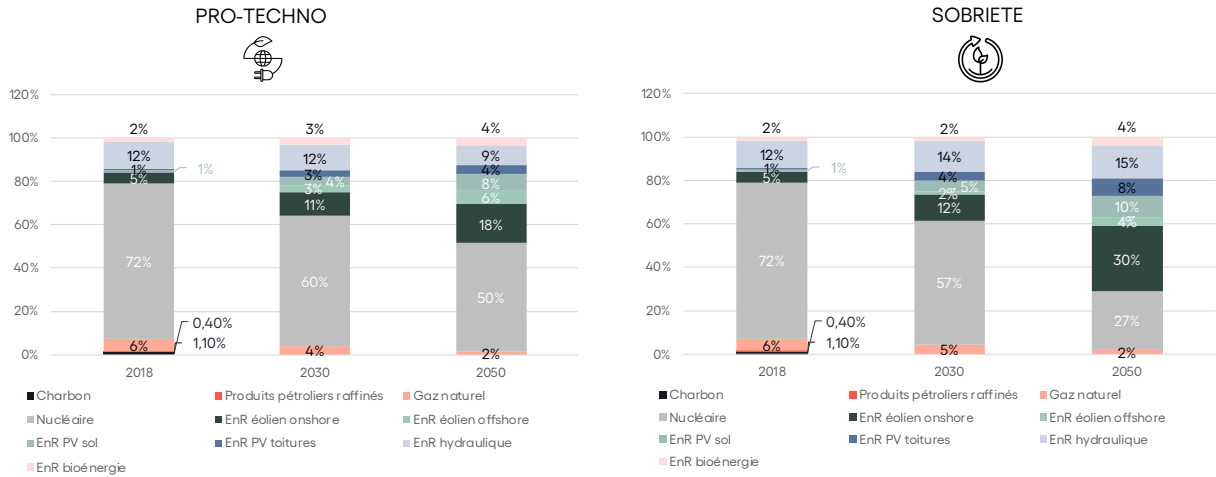
Consommation d'électricité par usage dans les deux scénarios

Les mix électriques ont été projetés afin de respecter les objectifs de décarbonation du secteur énergétique, à savoir atteindre 2MtCO₂e/an à l'horizon 2050 (-95%). Ainsi, la part des énergies fossiles est drastiquement réduite dans les deux scénarios, se résumant au gaz à hauteur de 2%. Par ailleurs, une limite supérieure de 50% de nucléaire en 2050 est respectée pour les deux scénarios.

Le scénario Sobriété mise davantage, en proportion, sur les énergies renouvelables, en limitant le parc nucléaire. Le développement des installations éoliennes et solaires photovoltaïques est notable. La production d'électricité en 2050 est inférieure de près de 25% à celle de 2018¹¹.

Le scénario Pro-Techno, mise également sur le développement des énergies renouvelables mais en gardant un socle de 50% de production d'origine nucléaire, et ce avec une croissance de la production d'électricité (+40%). L'éolien off-shore gagne en maturité jusqu'à couvrir 6% des besoins d'électricité en 2050.

¹¹ La baisse plus importante de la production comparée à la consommation entre 2018 et 2050 est liée aux exportations d'électricités (importantes en 2018, supposées nulles en 2050)



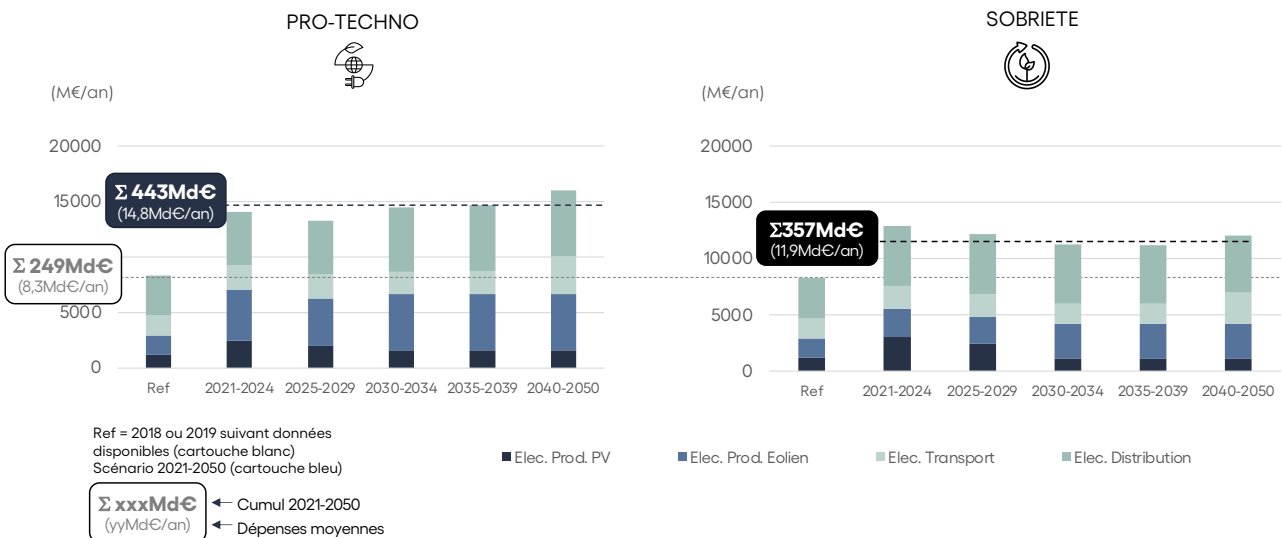
- Les hypothèses sont dimensionnée pour être cohérentes avec les objectifs de réduction de CO2 de la Stratégie Nationale Bas Carbone
- Les hypothèses (mobilité électrique, taux remplissage, etc.) sont mise en cohérence avec les hypothèses Energie et Numérique

Mix de production d'énergie électrique (% d'énergie produite par source)

Nota : Il est rappelé que cette étude est prospective et non prévisionnelle. Elle n'a pas vocation à recommander d'option. Ainsi, nos deux scénarios sont des scénarios réalistes pour répondre aux usages explicités et pour lesquels nous étudions les conséquences, notamment en termes d'investissements dans les moyens de production et les réseaux d'énergie.

Ce travail ne se positionne en aucune façon sur la question globale des avantages et les inconvénients de chaque moyen de production d'électricité décarbonée.

INFRASTRUCTURES DE PRODUCTION, TRANSPORT ET DISTRIBUTION D'ELECTRICITE



Chronique des dépenses pour les infrastructures électriques dans les deux scénarios (hors Nucléaire)

Production d'électricité :

La transformation des infrastructures de production électrique résulte donc de l'évolution du mix de production (EnR versus nucléaire principalement) et du besoin en électricité.

Aussi les capacités installées d'EnR solaire et éolien évoluent en cohérence dans chaque scénario :

GW	Ref	2030		2050	
		Pro-Techno	Sobriété	Pro-Techno	Sobriété
Eolien onshore	15,1	27,3	26,3	62,3	57,8
Eolien offshore	0,0	4,6	2,1	13,0	4,8
PV sol	4,7	18,1	20,0	50,5	35,1
PV toitures	3,8	13,6	16,0	25,3	28,1
TOTAL	23,6	63,6	64,3	151,1	126,0

Jusqu'à 2030, les deux scénarios considèrent une part du nucléaire comparable (environ 60% de l'électricité produite en 2030). Les capacités installées en solaire et éolien croissent dans les deux cas de 40GW au total.

La réponse à la consommation supérieure du scénario Pro-techno s'explique par un recours accru à l'éolien (offshore en particulier) qui présente un facteur de charge supérieur au solaire.

De 2030 à 2050, la croissance de la demande électrique se poursuit dans le scénario Pro-Techno avec une électricité issue à 50% du nucléaire en 2050, alors que dans le scénario Sobriété, le nucléaire ne représente en 2050 que 27% d'une production qui a significativement baissé par rapport à 2030.

Aussi entre 2030 et 2050, les capacités installées solaires et éoliennes augmentent de près de 90GW dans le scénario Pro-Techno, afin de répondre à l'accroissement de la consommation. Dans le scénario Sobriété, l'installation d'environ 60GW de capacités solaires et éoliennes suffisent à compenser la baisse de la part du nucléaire du fait d'une production électrique totale en baisse de 12% par rapport à 2030.

Les investissements associés croissent de manière significative sur la période 2021-2050, en comparaison à la référence (2,9Md€/an) :

- Dans le scénario Pro-Techno, le développement (et le renouvellement) des capacités EnR solaires et éoliennes conduit à presque doubler les investissements annuels : 5,2Md€/an en moyenne sur 30 ans.
- Dans le scénario Sobriété, le niveau est moindre (4Md€/an en moyenne), sachant que l'écart par rapport à la référence est particulièrement marqué entre 2030 et 2050.

Production Nucléaire : scénario RTE

Pour chiffrer les besoins en infrastructures de production d'électricité nucléaires à l'horizon 2050, nous nous appuyons sur l'étude « Futurs énergétiques 2050 », réalisée par RTE à la demande du Gouvernement.

L'analyse des scénarios développés par RTE conduit à considérer :

- Le scénario N03¹² pour le scénario « Pro-Techno » : la production d'électricité nucléaire dans notre scénario est estimée à environ 380 TWh en 2050 (légèrement supérieure au scénario RTE N03). Il est nécessaire d'étendre le fonctionnement des réacteurs nucléaires du parc existant tant qu'ils respectent les normes de sûreté, d'augmenter le facteur de charge actuel et de construire de nouvelles infrastructures : 14 EPR (une paire tous les 3 ans à partir de 2035) et 4GW de capacité SMR. Hors démantèlement, l'enjeu économique mentionné par RTE est de plus de 20Md€/an¹³ d'ici à 2060.
- Les scénarios M23 ou M1 sont adaptés au scénario « Sobriété » : la production d'électricité nucléaire en 2050 y est estimée à environ 115 TWh, ce qui est atteignable avec la capacité prévisionnelle installée en 2050 du nucléaire historique et sans avoir recours à la construction de nouveaux réacteurs nucléaires (prolongation de certains réacteurs au-delà de 50 ans), et en considérant une augmentation du facteur de charge actuel¹⁴.

Face à ces évolutions dans la production électrique, les infrastructures de transport et de distribution d'électricité doivent s'adapter.

Transport :

Le réseau de transport d'électricité doit évoluer significativement au-delà d'un seuil de 100GW de capacité d'EnR intermittentes installées. Ce seuil est atteint vers 2035 dans le scénario Pro-Techno et 2040 dans le scénario Sobriété. C'est le principal élément de différenciation entre les deux.

Des activités croissantes de renouvellement du réseau et de raccordement de l'éolien offshore sont communes aux deux scénarios alors que les besoins en modernisation du réseau et d'interconnexions décroissent.

En résulte une légère hausse des dépenses sur les deux prochaines décennies (1,5Md€/an) avant un probable regain nécessaire à l'adaptation aux énergies renouvelables (2,8Md€/an de 2040 à 2050 dans Pro-Techno contre 2,1 €/an dans Sobriété). Le poste « renouvellement, mise aux normes et modernisation » reste relativement stable dans le temps et représente 800 M€/an.

¹² RTE, (2021). Futurs énergétiques 2050 https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-10/Futurs-Energetiques-2050-principaux-resultats_0.pdf

¹³ Intégrant 4% de cout du financement

¹⁴ Taux de charge prévisionnel : 82%

Distribution :

Le développement des énergies renouvelables décentralisées nécessite un renforcement du réseau, qui n'a pas été conçu initialement pour accueillir ce type de production d'électricité ni pour gérer la variabilité des EnR.

Jusqu'à 2030, les deux scénarios diffèrent par le type de capacités installées (voir production électrique) : davantage de puissance intermittente et décentralisée pour le scénario sobriété, conduisant à un besoin d'adaptation accru dans le réseau de distribution qui supporte ces capacités de production.

Post 2030, la croissance des capacités EnR solaires et éoliennes beaucoup plus rapide dans Pro-Techno conduit à des besoins croissants d'adaptation du réseau de distribution et supérieurs à Sobriété.

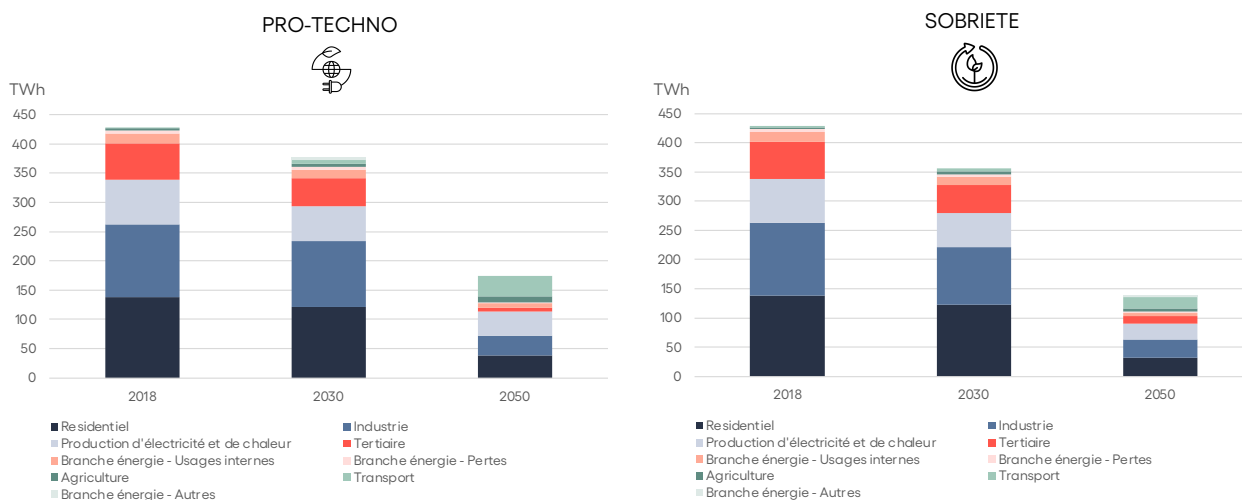
Au global sur la période et dans les deux scénarios, les besoins en investissement croissent par rapport à la référence afin de répondre au développement des énergies renouvelables : il est ainsi nécessaire d'augmenter les dépenses annuelles (3,1 Md€/an en référence) de 50% à 60% respectivement pour Sobriété et Pro-Techno.

Les dépenses de mises aux normes et les coûts de maintenance devraient rester stables autour de 1,6 Md€/an représentant entre 32% et 40% des montants totaux.

Du gaz naturel au biogaz (production de biogaz, transport et distribution de gaz)

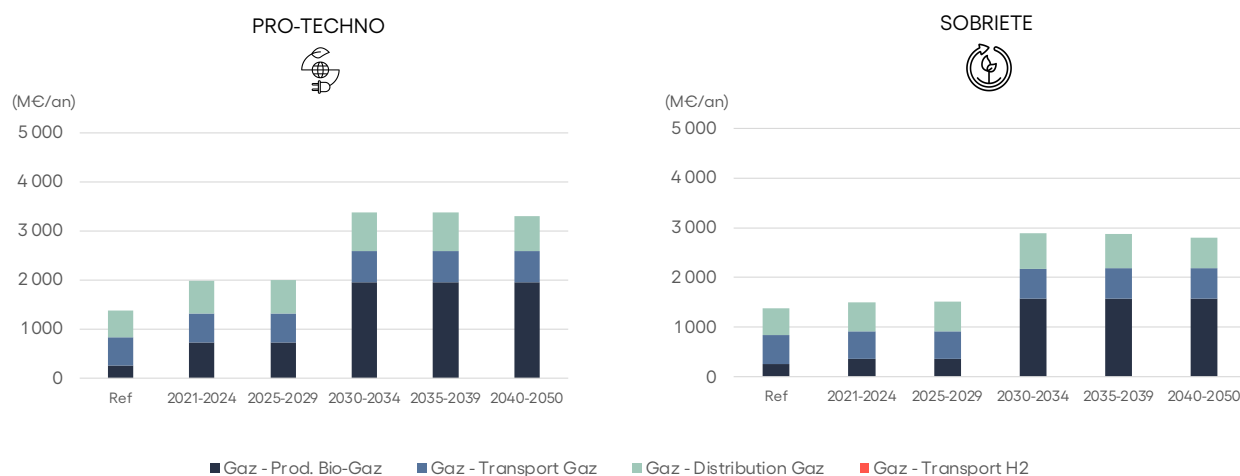
LA CONSOMMATION DE GAZ DANS LA TRANSITION BAS-CARBONE

La consommation de gaz actuelle – d'origine fossile - devra être réduite dans les deux scénarios. Le secteur industriel devra particulièrement réduire ses consommations (-73% entre 2018 et 2050 dans le scénario Pro-Techno et -75% dans le scénario Sobriété). A l'inverse, le secteur des transports devrait augmenter sa consommation de gaz, de façon plus importante dans le scénario Pro-Techno que le scénario Sobriété. Le développement des filières de production de biogaz devra permettre de décarboner ces consommations résultantes.



Consommation de gaz par usage dans les deux scénarios

L'ÉVOLUTION DES INFRASTRUCTURES



Chronique des dépenses pour les infrastructures gaz (production biogaz, transport, distribution) dans les deux scénarios

Les deux scénarios se différencient principalement par le rythme d'investissement dans la production de biogaz, celui-ci impactant le besoin en investissement dans le réseau de distribution, deuxième contributeur à l'évolution des dépenses par rapport à la référence.

Production de biogaz :

La baisse de la consommation de gaz s'accompagne d'une substitution du gaz naturel (fossile) par du biogaz (bas-carbone).

Ainsi la production de biogaz croît fortement dans les deux scénarios, le scénario Pro-Techno étant le plus ambitieux (en 2050, 40% de biogaz produit en plus dans Pro-Techno par rapport à Sobriété).

TWh PCI/an	Ref	2030		2050	
		Pro-Techno	Sobriété	Pro-Techno	Sobriété
Gaz naturel	427,6	340,1	337,8	1,3	13,9
Biogaz	0,7	36,4	17,8	173,7	125,0
TOTAL	428,3	376,5	355,5	175,0	138,9

Le développement des capacités de production de biogaz croît à un rythme soutenu d'ici à 2030 et cette croissance s'accélère très fortement post 2030 pour soutenir son fort développement dans les deux scénarios.

Ce sont principalement des installations de méthanisation qui réalisent cette production (en 2050, la méthanisation c'est 80% de la production de biogaz en Pro-Techno, 93% dans Sobriété). Des installations de pyro-gazéification CSR et Bois commencent à se développer post 2030 plus significativement dans le scénario Pro-Techno.

Aussi les investissements passent de 0,3Md€/an en année de référence à 1,2Md€/an pour Sobriété et 1,6Md€ par an pour Pro Techno en moyenne sur 2021-2050.

L'essentiel de ces investissements sont réalisés entre 2030 et 2050, même s'il y a une forte croissance sur 2021-2030 dans Pro-Techno. Les installations de méthanisation représentent 68% des investissements dans le scénario pro-techno et 87% dans le scénario sobriété.

Transport :

Les réseaux de transport de gaz voient la fin des grands projets de raccordement et de restructuration. Le développement de la production de biogaz s'accompagne surtout d'un besoin de raccordement et d'adaptation du réseau de transport. En complément le réseau de transport voit sa maintenance rester stable, notamment du fait des réglementations et des besoins d'entretien du réseau, et ce, même si les volumes consommés baissent.

Du point de vue des dépenses, la maintenance représentant une part importante de celles-ci, les besoins pour le réseau de transport évoluent légèrement à la hausse. Les dépenses annuelles passent donc de 580M€/an en référence à 590M€/an pour sobriété et 620M€/an pour Pro-Techno.

Distribution de Gaz :

Le développement de la production de biogaz s'accompagne d'un besoin de raccordement des sites d'injection aux réseaux de distribution et de transport de gaz, suivant la taille des sites de production.

Au-delà de ce besoin de raccordement des nouvelles capacités de production, ces réseaux sont impactés par la baisse de la consommation de gaz qui se traduit par de moindres besoins en maintenance et en raccordement de nouveaux consommateurs.

Le scénario Sobriété ayant une consommation globale de gaz plus faible et moins de capacités de production de biogaz le besoin en maintenance, et en raccordement de sites d'injection est plus faible.

Du point de vue des dépenses, le développement des sites d'injection est en bonne partie compensé par la baisse des besoins de maintenance et de raccordement. Les dépenses annuelles passent donc de 530M€/an en référence à 630M€/an pour Sobriété et 730M€/an pour Pro-Techno.

DEVELOPPEMENT DES RESEAUX DE CHALEUR¹⁵

Dans le cadre de la transition bas-carbone, les réseaux de chaleur sont alimentés par un mix essentiellement renouvelable (bio-gaz, déchets, énergies renouvelables thermiques) en substitution du mix plus carboné actuel (plus de 40% d'énergie fossile). Leur développement est impacté par :

- La quantité de bâtiments raccordés et le besoin en énergie de ces logements (performance énergétique de ceux-ci),
- La répartition géographique de ces bâtiments impactant la longueur du réseau.

Dans les deux scénarios, on observe une hausse de la part d'énergie consommée issue des réseaux de chaleur dans le résidentiel et le tertiaire et une amélioration de la performance énergétique des bâtiments.

Les deux scénarios diffèrent :

- Principalement par la quantité d'énergie livrée : le scénario Pro-Techno conduit à plus que doubler la quantité livrée en 2050 par rapport à la situation actuelle, alors que dans le scénario Sobriété, après un passage par un pic en 2030, la quantité d'énergie livrée revient au niveau actuel.
- Dans une moindre mesure par une quantité d'énergie livrée par longueur de réseau (densité thermique) plus faible dans le scénario Sobriété (moindre consommation unitaire des logements notamment).
- Par la localisation des projets de développement du fait des dynamiques territoriales différentes (villes moyennes versus métropoles).

Du point de vue des dépenses, la quantification couvre le développement (création, extension ou densification de réseaux) et la maintenance (petit et gros entretiens) des réseaux de distribution primaire.

Dans le scénario Sobriété, les dépenses restent en moyenne du même ordre de grandeur qu'actuellement (500M€/an contre 580M€ en année de référence) alors que pour le scénario Pro-Techno, elles augmentent significativement à 1Md€/an en moyenne sur 2021-2050.

Dans le scénario Sobriété, post 2030, les dépenses sont essentiellement des dépenses de maintenance alors que dans Pro-Techno, des investissements dans le développement du réseau se poursuivent.

¹⁵ L'analyse ne comprend pas les coûts liés à la production de chaleur (chaufferie biomasse, etc.) ni de la distribution secondaire (des sous-stations aux émetteurs)

EXTENSION DES HYDROGENODUCS POUR LES NOUVEAUX USAGES DE L'HYDROGENE

Les deux scénarios voient la consommation d'hydrogène se développer pour de nouveaux usages (mobilité et au sein de l'industrie¹⁶) et sa production se décarboner (électrolyse en particulier).

On observe ainsi l'essor d'un hydrogène dit « vert » car produit à partir d'électricité décarbonée (e.g., énergies renouvelables, nucléaire) ou « bleu » grâce à des technologies de captage du carbone efficaces en cas de production à partir de ressources fossiles. Parallèlement, l'hydrogène dit « gris » qui est essentiellement issu du vaporéformage du méthane, soit environ 99% de la production actuelle, disparaît progressivement. En particulier, l'hydrogène consommé par les transports est d'abord produit majoritairement par électrolyse (hydrogène vert) sur les sites des stations de charge en début de période (environ 50% des volumes) puis progressivement une production centralisée à base d'énergie décarbonée et s'appuyant sur un réseau de distribution dédié prend le relais au sein des principaux bassins de mobilité. Cette production centralisée satisfait 50% des besoins de la mobilité en 2050.

Ce développement engendre de nouveaux besoins de transport par hydrogénéoducs, afin d'alimenter une part plus importante du territoire français au fur et à mesure du développement des usages¹⁷.

Le maillage projeté s'appuie sur des tuyaux dits « de petits diamètres » compte tenu du niveau de demande et sur des pipelines issus du réseau de gaz actuel pour constituer la future dorsale hydrogène de la France (ceci est permis par la baisse de la demande en gaz aux différents horizons de temps étudiés).

Les investissements estimés incluent les coûts de réhabilitation du réseau de gaz pour accueillir de l'hydrogène, l'installation de tuyaux neufs de différentes tailles, les compresseurs, ainsi que la maintenance du réseau¹⁸.

Le scénario Sobriété projette une consommation d'hydrogène significativement inférieure à celle du scénario Pro-Techno donc un besoin d'investissement inférieur :

- Sobriété : 200M€/an sur 2021-2050 contre 100M€/an actuellement
- Pro-Techno : 300M€/an sur 2021-2050

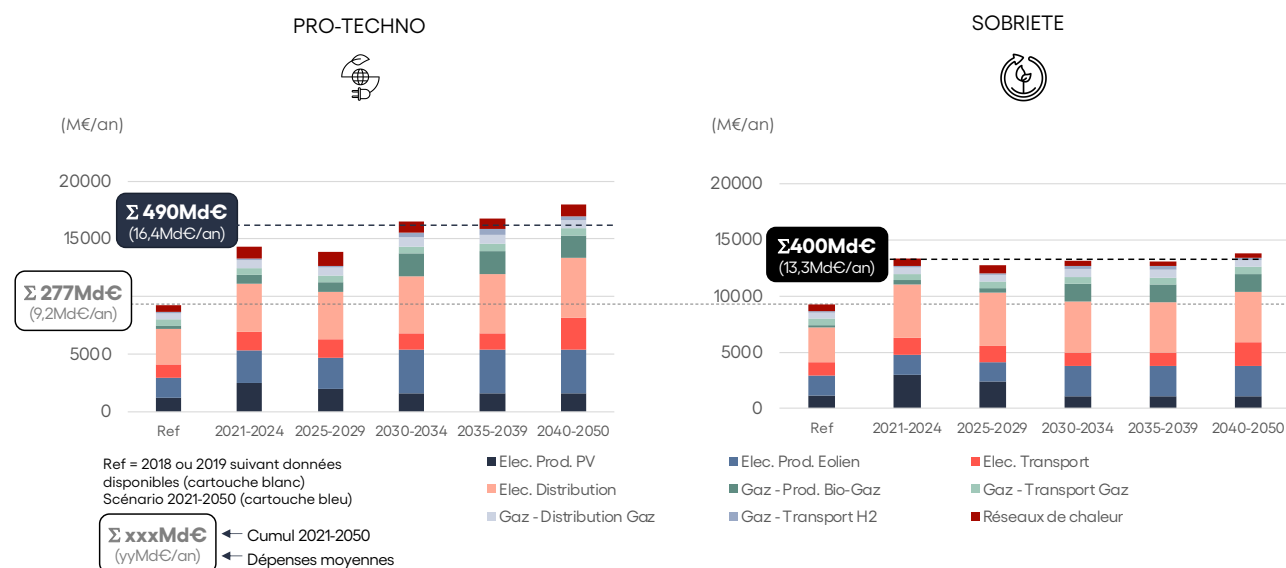
Après une phase de développement du réseau jusqu'en 2040, les dépenses baissent en fin de période.

¹⁶ L'usage de l'H2 dans le stockage de l'énergie électrique n'a pas été inclus dans cette étude

¹⁷ l'étude European Back Bone a constitué une source de référence sur ce sujet

¹⁸ Ne sont pas inclus les coûts relatifs à la production d'hydrogène bas-carbone

Bilan des dépenses pour les infrastructures électriques et gazières projetées dans les deux scénarios (hors nucléaire)



Chronique des dépenses pour les infrastructures électriques et gazières dans les deux scénarios (hors nucléaire)

Les deux scénarios se caractérisent par :

- **Un cumul de dépenses sur les 30 prochaines années fortement différencié** : le scénario Pro-Techno conduit à un accroissement moyen de 77% des dépenses sur les 30 prochaines années par rapport à la référence historique (16,4Md€/an contre 9Md€/an), alors que le scénario Sobriété conduit à des dépenses annuelles moyennes de 13,3Md€/an, soit environ +44% par rapport au scénario de référence. Cette différence est due au premier ordre au développement des capacités ENR solaire et éoliennes et à ses conséquences sur le réseau de distribution. La capacité de production de biogaz plus importante dans le scénario Pro-Techno contribue aussi à cet écart.
- **Une très forte croissance des dépenses (+5 Md€/an) dans les deux scénarios sur la période 2020-2030** allouées à **des projets d'infrastructures différents, typiquement** : développement plus important de l'éolien, du biogaz et des réseaux de chaleur dans le scénario Pro-Techno.
- **Post 2030**, une poursuite de la **hausse des dépenses** dans Pro-Techno portées par la hausse des consommations d'énergie alors que dans le **scénario Sobriété**, après une phase de développement rapide du parc d'infrastructures, la modération des usages permet de **stabiliser les dépenses malgré le développement de la production de biogaz et du réseau d'hydrogène**.

Concernant les enjeux climat et cette synthèse des dépenses pour les infrastructures de l'industrie de l'énergie, dans nos deux scénarios, il est à noter :

- qu'un rebouclage carbone sur le cycle de vie des différentes infrastructures serait à réaliser en complément afin d'apprécier les performances climat des différentes actions,
- que ceci est d'autant plus vrai que le surcroît d'activité (et donc d'émissions de carbone) et de dépenses associées n'est pas forcément lié à des investissements de transition bas-carbone. Une part significative des investissements considérés ne résultent pas au premier ordre de la stratégie de décarbonation retenue : l'électricité Française étant déjà décarbonée, le choix du mix nucléaire - électricité renouvelable solaire ou éolienne n'est pas lié aux enjeux climat, et par conséquent les dépenses d'adaptation des réseaux de transport et distribution. A contrario, la part de production correspondant à l'électrification d'usages auparavant alimentés en énergies fossiles peut être considérée comme directement décarbonante, tout comme les investissements permettant de passer du gaz fossile au bio-gaz.

Les infrastructures électriques hors nucléaire (production EnR solaire et éolien, transport et distribution d'électricité) continuent à concentrer 75% des dépenses dans les deux scénarios

NB : d'après RTE, le maintien et le développement des capacités nucléaires du scénario N03 qui est proche du scénario Pro-Techno représenteraient un coût annuel de 20Md€/an¹⁹.

¹⁹ Coût intégrant un coût de financement contrairement aux chiffrages produits dans ce rapport

Les infrastructures du numérique (réseau fixe et mobile)

LES USAGES DU NUMERIQUE DANS LA TRANSITION BAS-CARBONE

Le **numérique** est à la fois un **levier de décarbonation** des économies en permettant l'accroissement de l'efficacité énergétique (optimisation des réseaux logistiques et énergétiques ou des processus de production) et un **contributeur direct à l'empreinte carbone** de la France (avec une forte dynamique de croissance).

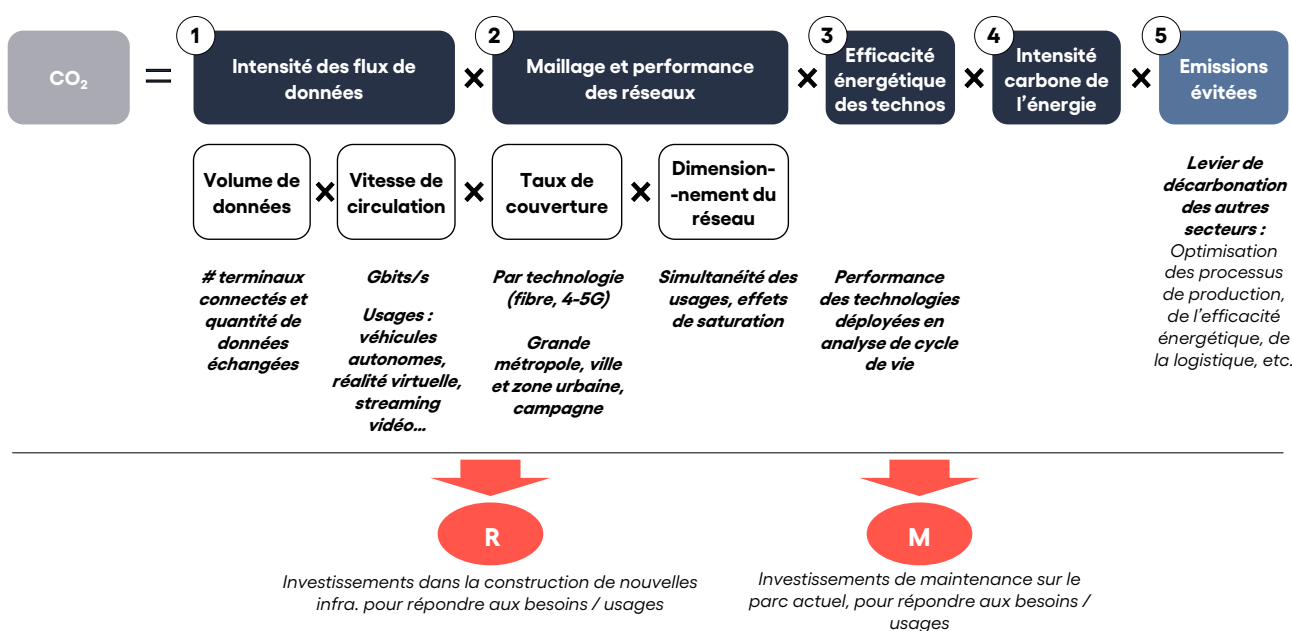
Le Sénat a publié en Juillet 2020 le résultat de la « Mission d'information sur l'empreinte environnementale du numérique » et conclut que le numérique constitue en France une source importante d'émissions de gaz à effet de serre territoriales (15 millions de tonnes équivalent CO₂, soit 2% du total des émissions en 2019). Cette part pourrait s'accroître considérablement dans les années à venir si rien n'est fait pour en réduire l'impact (+ 60% d'ici 2040, pour atteindre 24 MtCO₂eq).

La SNBC2 n'a pas établi de budget carbone spécifique pour le secteur. Par ailleurs une part importante des émissions du numérique sont hors territoire Français, car elle est liée à la fabrication et l'usage des terminaux de stockage des données (serveurs) et des terminaux d'utilisation (ordinateurs, télévisions, smartphone, tablette, objets connectés).

Nous nous intéressons ici aux infrastructures de transport de données (fixes et mobiles) via leur usage, et à la maîtrise de la consommation énergétique associée.

Les leviers de décarbonation du numérique sont multiples et sont représentés ci-dessous :

Leviers de décomposition des émissions du numérique hors stockage et terminaux – Paramètres de 1^{er} ordre



Notes : Les émissions de stockage dans les data centers et de fabrication des terminaux (PC, smartphones, objets connectés...) ne sont pas inclus dans le périmètre considéré

Dans le scénario Pro-Techno, la part du numérique dans l'économie continue sa croissance exponentielle au détriment des émissions directes, mais en faveur d'une baisse des émissions territoriales et d'une économie de ressources significatives dans nos usages (mobilité, processus de production, santé, etc.).

Les technologies sont omniprésentes, avec le développement massif d'innovations numériques qui viennent à la fois compléter les technologies existantes et les substituer. Ces innovations participent notamment à l'atteinte des objectifs de décarbonation de l'économie :

- A travers une **optimisation du trafic et des flux**, sans perte de qualité de service : augmentation du taux d'utilisation et de remplissage avec des véhicules autonomes et connectés ; essor de l'Intelligence Artificielle et de l'ordinateur quantique permettant d'optimiser les flux logistiques ; *Maas (mobility-as-a-service)*.
- L'avènement de l'ordinateur quantique et d'autres technologies de pointe permet la multiplication et l'optimisation des calculs tout en **baissant drastiquement la consommation énergétique**.

Ces avancées technologiques recherchent avant tout **la croissance de l'activité économique, de la rentabilité et du confort**, sans recherche systématique d'un impact social et environnemental positif. Par exemple, le véhicule autonome se déploie fortement. Malgré plusieurs aspects environnementaux positifs (fluidification du trafic, autopartage...), cette évolution crée une demande accrue en métaux rares, en consommation numérique, et surtout crée un fort "effet rebond" : incitation au transport routier via la baisse des coûts de transport de marchandises, baisse du coût des taxis, facilitation de trajets routiers longues distance pour les particuliers, etc.

Dans le scénario Sobriété, la croissance de la consommation de données ralentit pour se stabiliser vers 2050, et les technologies déployées répondent davantage à une logique « **low-tech** » en **limitant la consommation de ressources** (matières premières, eau) **et les émissions de GES**.

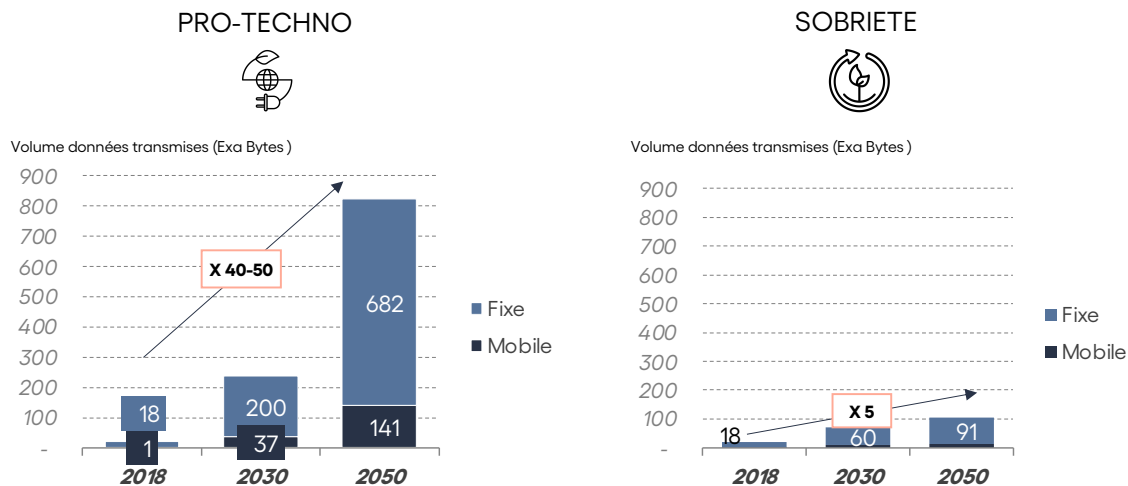
Le numérique reste présent, et vient en particulier alimenter le développement de l'économie collaborative et de la fonctionnalité.

- Développement limité des nouvelles technologies (5G, intelligence artificielle, ordinateur quantique...), guidé par l'impact social et environnemental.
- Les technologies déployées répondent davantage à une **logique « low-tech »** en limitant la consommation de ressources (matières premières, eau) et les émissions de gaz à effet de serre. La priorité est donnée à la durabilité et la réparation / modularité des appareils et non à l'augmentation de la satisfaction des usages. Le numérique reste présent, en particulier il vient alimenter le développement de l'économie collaborative et de la fonctionnalité (autopartage ; plateforme de marché de seconde main ; optimisation des chaînes logistiques).

		Intensité des flux de données	Maillage et performance du réseau	Efficacité énergétique des technologies	Traité dans la partie Energie
Pro-Techno	Activation leviers	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	
	Synthèse des narratifs	<ul style="list-style-type: none"> Hausse exponentielle liée à de nouveaux réseaux (5G) qui alimentent la croissance et la multiplication des usages dans un mode virtualisé (réalité virtuelle) et connecté (IoT, véhicule autonome) Augmentation forte du nombre de terminaux par personne et objets connectés (smart city, domotique) 	<ul style="list-style-type: none"> Les réseaux d'infrastructure fixes et mobiles sont déployés sur l'ensemble du territoire pour assurer la démocratisation des nouveaux usages (IA, véhicules autonomes...). Pas de mesure d'impact environnemental avant déploiement des technos Surdimensionnement des infrastructures pour garantir une consommation simultanée sans saturation 	<ul style="list-style-type: none"> L'augmentation de l'efficacité énergétique des technologies de réseaux fixes et mobiles est particulièrement importante et compense une partie de la hausse de la consommation des données qu'elle a engendrée 	<ul style="list-style-type: none"> L'intensité carbone de l'énergie électrique consommée diminue fortement (cf la partie Energie)
Sobriété	Activation leviers	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	
	Synthèse des narratifs	<ul style="list-style-type: none"> Limitation des usages (facturation croissante selon la donnée consommée) et plans de gestion durable des données dans les entreprises Fléchage vers l'économie collaborative (autopartage ; plateforme de marché de seconde main ; optimisation des chaînes logistiques...) 	<ul style="list-style-type: none"> Le réseau fibre est le seul à couvrir l'ensemble du territoire La 5G et les technologies ultérieures, favorisant une hausse des débits, sont limités aux usages qui justifient des émissions évitées supérieures (optimisation de la mobilité, industrie) 	<ul style="list-style-type: none"> L'efficacité énergétique des appareils augmente fortement en faveur d'une moindre sollicitation du réseau (échange avec serveur cloud) Les réseaux fixes et mobiles améliorent significativement leur performance énergétique sans impliquer l'obsolescence des terminaux 	<ul style="list-style-type: none"> L'intensité carbone de l'énergie électrique consommée diminue fortement (cf la partie Energie)

1 2 3 4 5 Intensité d'activation des leviers

La trajectoire de consommation de données résultant de ces évolutions est très différente dans chaque scénario :



- Les hypothèses sont dimensionnée pour être cohérentes avec les objectifs de réduction de CO₂ de la Stratégie Nationale Bas Carbone
- Les hypothèses (mobilité électrique, taux remplissage, etc.) sont mise en cohérence avec les hypothèses Energie et Numérique

Dans le scénario Pro-Techno, l'utilisation de moyens de transmission plus efficaces (5G notamment) et l'augmentation de l'efficacité énergétique en général permettent de **limiter l'augmentation de la consommation énergétique** (x2 en 2050 vs. 2018) **malgré une explosion du flux de données** (x40 en 2050 vs. 2018), selon les mêmes tendances que celles observées durant les dernières années.

La pénétration forte des technologies les plus efficaces accentuent ce phénomène : 90% des données mobiles circulent par des réseaux 5G.

Dans le scénario Sobriété, malgré la sobriété des usages numériques, les besoins sous-jacents nécessitent une **croissance des flux de données transmises** (x5 en 2050 vs. 2018), ne serait-ce que pour alimenter les nouveaux usages (économie collaborative et de la fonctionnalité).

La pénétration des technologies les plus efficaces reste limitée : 50% des données mobiles circulent par des réseaux 5G.

Ainsi l'efficacité énergétique par volume de données transmises est sensiblement plus faible que dans le scénario Pro-Techno. Il en résulte un **accroissement de la consommation énergétique** pour la transmission des données dans les mêmes ordres de grandeur que le scénario Pro-Techno (x1.5 en 2018 vs. 2050).

ÉVOLUTION DES INFRASTRUCTURES DU NUMERIQUE

Approche de chiffrage pour le réseau mobile

En ce qui concerne les travaux publics, l'étude porte sur les infrastructures nécessaires pour permettre les différents flux de données évoqués. Pour le réseau mobile, on s'intéresse aux supports d'antennes (chacun pouvant accueillir plusieurs antennes) nécessaires sur le territoire.

On distingue deux types de supports d'antennes en fonction de la zone géographique :

- En zone urbaine, les supports sont légers (ex : sur toiture),
- En zone non urbaine, les supports sont plus lourds (ex : pylône métallique).

NB : Du fait des longueurs d'ondes utilisées, la 5G a une portée plus faible et il faut davantage d'antennes que pour les technologies précédentes. Ainsi, en zone urbaine il faudra 30% de supports d'antennes supplémentaires par rapport à la 4G et 100% de plus en zone non urbaine²⁰.

L'abandon de la 2G et 3G ainsi que le développement de la 4G sur l'ensemble du territoire sont les points communs aux deux scénarios. Ces derniers se distinguent par le développement de la 5G. Si elle se développe sur l'ensemble du territoire dans le scénario pro-techno, le scénario Sobriété limite son extension. Elle s'implante en zone urbaine (avec un besoin de nouveaux supports) mais en zone non urbaine, elle ne s'installe que sur des supports déjà existants.

Afin de considérer les renouvellements, une hypothèse de durée de vie de 50 ans²¹ est prise pour les supports d'antennes. Un renouvellement d'un cinquième des supports d'antenne existants chaque année est alors nécessaire.

²⁰ Tactis – Couverture 5G en France

²¹ ADEME – Durée de vie des constructions immobilières

Résultats

Le scénario pro-techno projette donc une quantité plus importante d'antennes à installer et à maintenir :

- Pro-techno : Installation de 3072 supports par an jusqu'en 2030 (1140 en zone urbaine et 1932 en zone non urbaine) et rénovation de 1208 à 1761 supports par an entre 2021 et 2050.
- Sobriété : Installation de 1140 supports par an jusqu'en 2030 (en zone urbaine uniquement) et rénovation de 1169 à 1374 supports par an entre 2021 et 2050.

Approche de chiffrage pour le réseau fixe

Pour le réseau fixe, on s'intéresse au nombre de prises FttH (Fibre optique jusqu'au domicile) connectées sur le territoire. Dans les deux scénarios nous faisons l'hypothèse que l'ensemble des logements sera raccordé à la fibre (d'ici à 2025 en pro-techno et 2030 en sobriété).

Installation de nouveaux raccordements :

On sait qu'en 2020 il reste 11 millions de logements à raccorder à la fibre. En prenant en compte la distinction entre logements individuels et collectifs²², c'est donc 6,4 millions de bâtiments qui seraient à raccorder à la fibre.

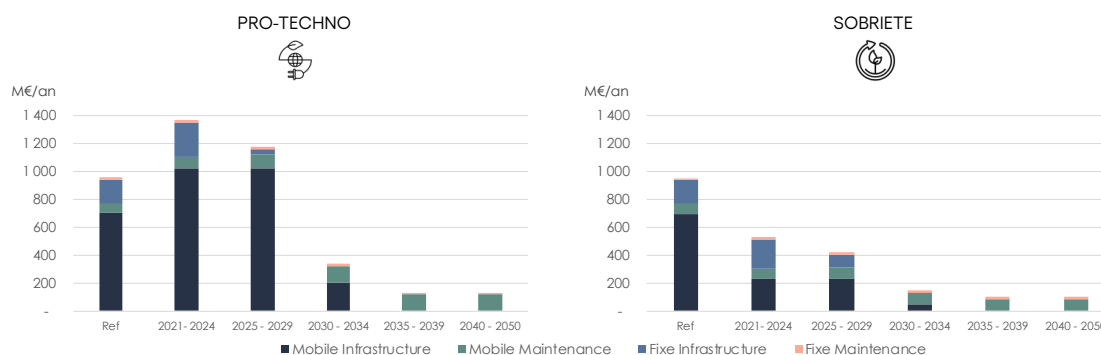
Maintenance sur des raccordements existants :

D'après le rapport Objectif Fibre du ministère du travail²³, le taux de panne annuel est de 2%. On considère donc que chaque année, 2% des raccordements existants ont un besoin de maintenance. Cette hypothèse de maintenance est la même dans les deux scénarios.

Résultats pour le numérique (réseaux mobile et fixe)

Sur la période 2021-2050, les investissements nécessaires pour les réseaux mobile et fixe sont plus importants en Pro-techno qu'en Sobriété :

- Pro-techno 15,1Md€ (dont 13,5Md€ pour le réseau mobile)
- Sobriété 6,7Md€ (dont 4,7Md€ pour le réseau mobile)



Chronique des dépenses pour la création et la maintenance d'infrastructures pour le réseau numérique dans les deux scénarios

²² On prend les hypothèses suivantes :

- En zone urbaine, 45% des logements sont individuels. (INSEE)
- En zone rurale, 90% des logements sont individuels
- En moyenne un logement collectif contient 22 foyers. (CEREN – Surface de plancher moyenne pour un logement collectif : 1365m². Surface moyenne d'un logement collectif : 63m²)

²³ <https://travail-emploi.gouv.fr/IMG/pdf/cep-rapporta44e4.pdf>. La maintenance peut comprendre : l'intervention chez le particulier, la réparation d'équipements ou le rétablissement du signal sur le réseau

Capture et stockage technologique de carbone

La capture et le stockage technologiques du carbone visent à contribuer à l'atténuation du changement climatique en séquestrant durablement du CO₂ par le recours aux technologies dites de capture et stockage du carbone (CCS).

NOTA BENE : la SNBC classe la CCS parmi les puits de carbone avec les puits biologiques. La technologie CCS ne permet pas une séquestration du carbone depuis l'atmosphère, mais seulement une réduction des émissions, capturées et séquestrées suite à leur formation. A ce titre elle est intégrée au volet Réduction des émissions de cette étude.

Deux technologies majeures de capture et stockage technologiques du carbone (CCS) sont envisagées afin d'éviter des émissions de CO₂ issues de sources fixes²⁴ :

- La CCS appliquée à des sites de combustion d'énergies fossiles.
- La CCS appliquée à des sites de combustion de bioénergie (alors appelée BECCS), qui permet de générer des émissions négatives car le carbone stocké dans les sols a préalablement été retiré de l'atmosphère par la croissance de la biomasse.

Bien que peu développées actuellement, ces technologies de capture et stockage technologiques du carbone sont prises en compte dans la grande majorité des scénarios prospectifs d'émission de GES, dont la SNBC (avec un objectif de -1MtCO₂e/an en 2030 et -15MtCO₂e/an en 2050) et ceux publiés par le GIEC²⁵.

Dans le scénario Pro-Techno, on prévoit un développement proactif des technologies de CCS, poussé par des subventions gouvernementales et des investissements importants des acteurs de l'énergie. En particulier, Pro-Techno prévoit un développement du BECCS pour générer des émissions négatives. Elles seront un pilier important de la stratégie de neutralité carbone, permettant d'atteindre les objectifs fixés par la SNBC, soit 15MtCO₂e/an séquestrées à l'horizon 2050.

Dans le scénario Sobriété, on fait l'hypothèse d'une posture attentiste sur le développement des technologies de CCS, qui seront employées selon les progrès réalisés globalement sur leur efficacité et leur coût et leur acceptabilité sociale. Ces technologies permettront toutefois de participer à l'atteinte de l'objectif zéro émissions nettes, sachant que les émissions résiduelles en 2050 sont plus faibles dans le scénario Sobriété.

Les besoins en investissements évalués ici, concernent uniquement la construction des infrastructures onshore de transport du CO₂ (comprimé ou liquéfié), permettant d'acheminer le CO₂ depuis les lieux d'émissions jusqu'aux côtes afin de l'acheminer ensuite vers les sites de stockage off-shore. Nous nous sommes appuyés sur l'identification des potentiels gisements français par l'ADEME²⁶. Les sites considérés étant

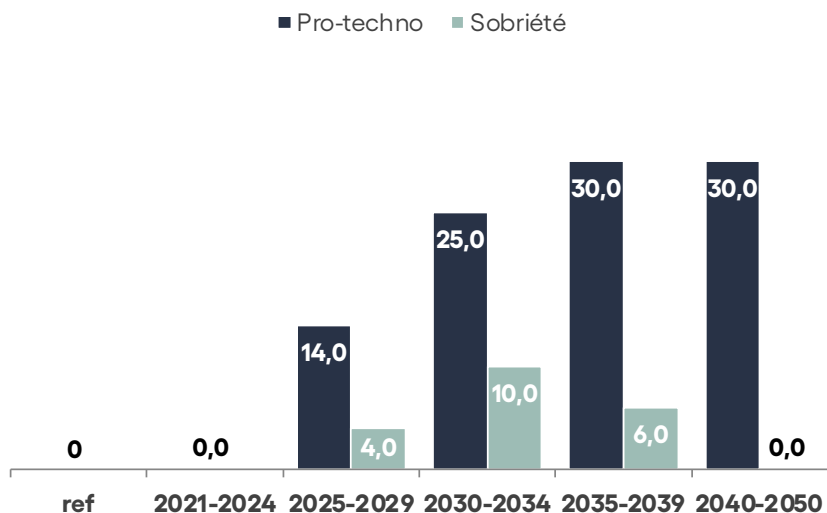
²⁴ Les autres technologies de stockage technologique du carbone associées au CCS (BECCS, Direct Air Capture ou DAC) sont relativement peu documentées. Il est difficile d'évaluer le potentiel d'activités occasionnées par leur développement dans les décennies à venir. En particulier, les technologies Direct Air Capture (DAC) sont, très coûteuses et fortement consommatrices d'énergie

²⁵ rapport spécial « réchauffement planétaire de 1,5°C » : résumé à l'intention des décideurs, GIEC (2019). À l'exception du scénario p1, tous les scénarios prévoient l'utilisation de CCS et BECCS

²⁶ ADEME (2020) : les avis de l'ADEME : « le captage et stockage géologique de CO₂ (CCS) en France : un potentiel limité pour réduire les émissions industrielles ». Le gisement évalué en Nouvelle-Aquitaine n'est pas considéré dans nos estimations, pour des raisons de faisabilité technique, d'acceptabilité plus complexe, et d'un potentiel de CCS relativement réduit

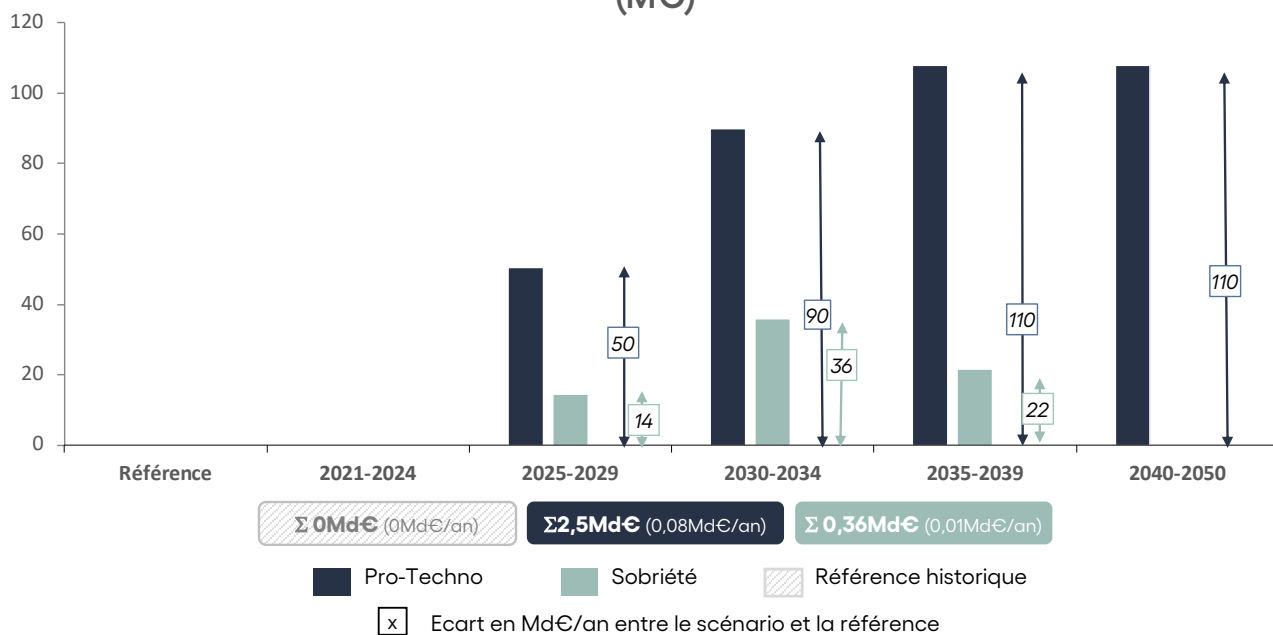
offshore, les activités d'aménagement des sites de stockage géologiques n'ont pas été considérés.

Aménagements annuels pour le transport du CO2 (km)



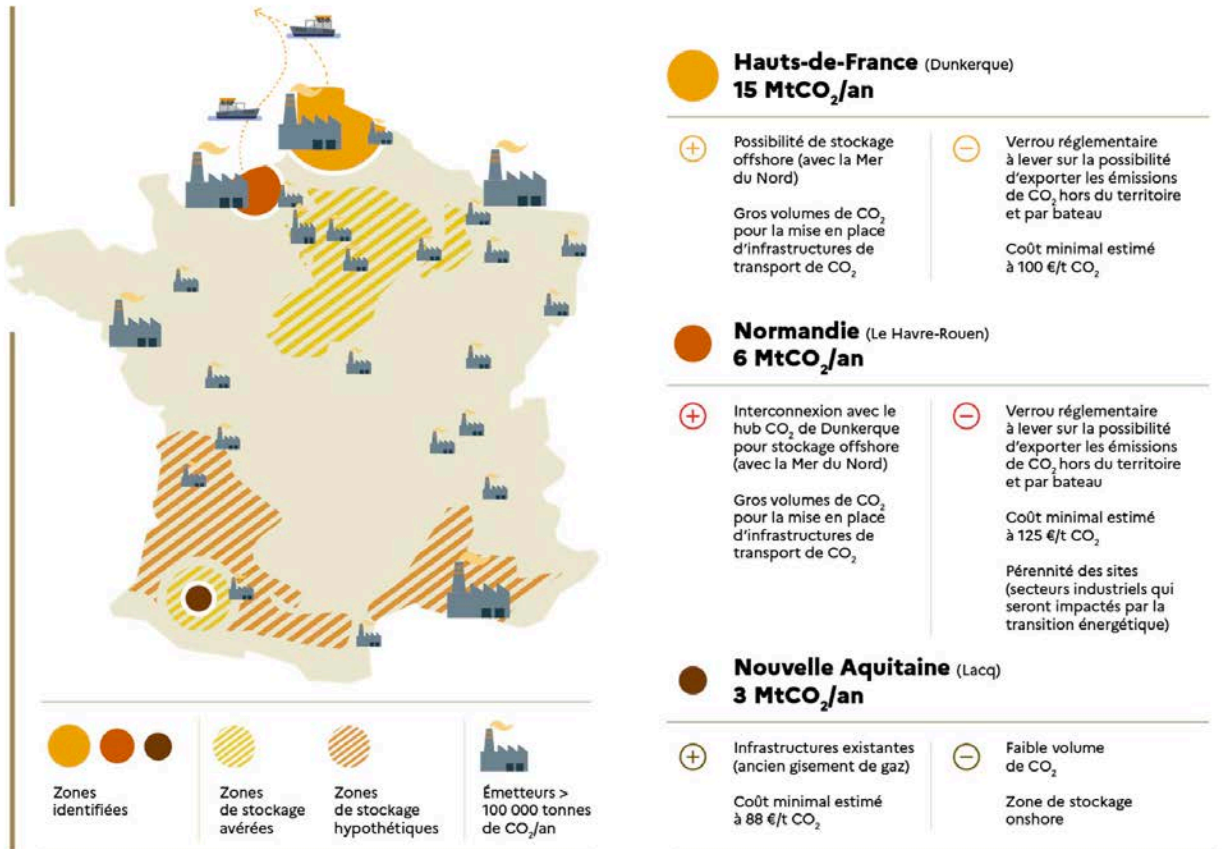
Environ 700 km de canalisations sont déployés à horizon 2050 dans le scénario Pro-Techno, et environ 100 km de canalisations dans le scénario Sobriété. Cela représente respectivement 2,5Md€ et 0,3Md€ d'investissements cumulés entre 2020 et 2050.

Investissement dans le transport onshore du CO2 (M€)

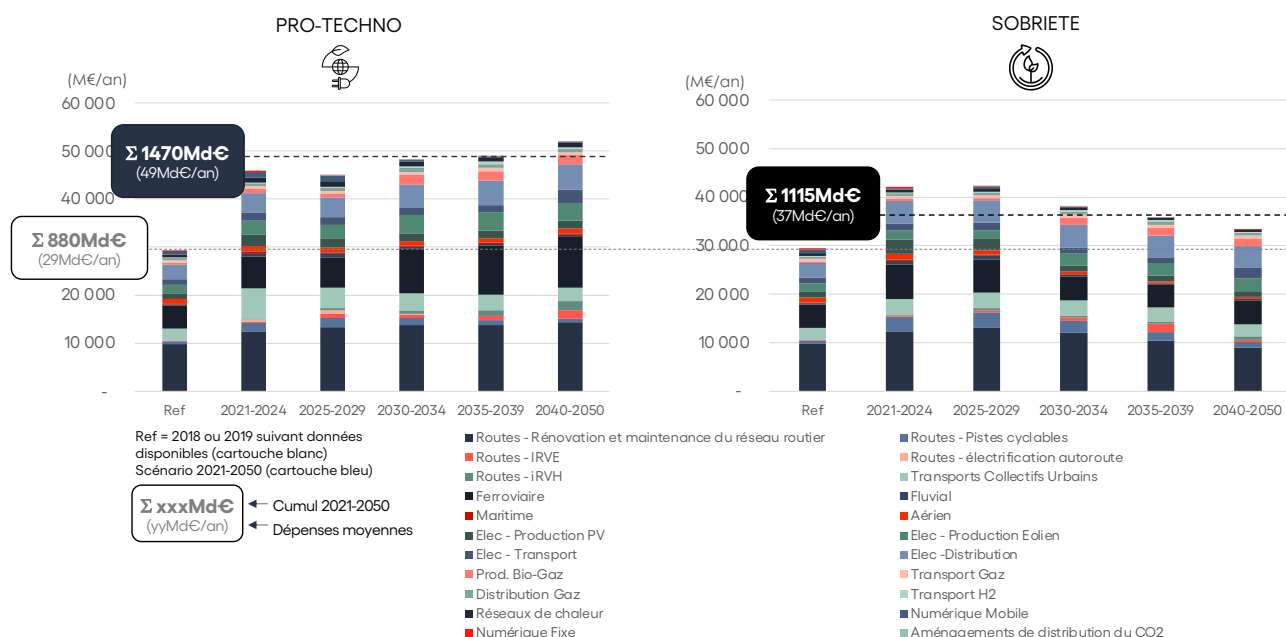


Les technologies de CCS étant actuellement à un stade de développement non mature, les investissements (aujourd'hui inexistants) sont considérés comme augmentant progressivement à partir de 2025.

POTENTIEL POUR LA MISE EN ŒUVRE DE CSC EN FRANCE



Bilan réduction




Ainsi, le cumul des dépenses d'investissement sur la période est très différent selon les scénarios (1470Md€ cumulés soit **49Md€/an** correspondant à un accroissement moyen de 67% pour Pro- Techno et 1115Md€ cumulés soit **37Md€/an** soit un accroissement de 27% pour Sobriété entre 2021 et 2050, pour une référence de **29 Md€/an** en 2018).

Dans les deux scénarios, un accroissement important des dépenses d'investissement est nécessaire d'ici à 2030. Leur différence en termes de dépense est marquée surtout à partir de 2030 et portée à l'ordre 1 par la route, le rail ainsi que la production électrique (hors nucléaire), et à l'ordre 2 par les réseaux de transport et distribution électrique.

Au-delà de ces volumes d'investissements, ce sont les paysages d'infrastructures qui sont contrastés, en cohérence avec les évolutions des usages dans chaque scénario.

Une transition socio-environnementale, deux paysages d'infrastructures

	 Pro-Techno	 Sobriété
Rappel des narratifs	Miser sur des innovations technologiques qui alimentent la croissance du PIB et de la consommation tout en diminuant significativement les impacts environnementaux	Miser sur des évolutions sociales et sociétales , accompagnée d'une diminution pilotée de la consommation
Mobilité	La mobilité qui représente 135 Mt/CO ₂ e en 2018 atteint 4MtCO ₂ e/an en 2050, soit 97% de moins qu'en 2018. Une certaine similitude des deux paysages jusqu'en 2030, l'effet de la transformation des infrastructures s'observant surtout à partir de 2030. Dans les deux scénarios, quasi disparition des motorisations thermiques hors biocarburant en 2050. Le trafic fluvial, non saturé aujourd'hui, continue de se déployer dans les deux scénarios.	
	<p>Augmentation du trafic passager après 2030, de l'ordre de 1,1% par an jusque 2050, et du volume de fret de 1,4% par an jusque 2050, avec une forte pénétration des véhicules électriques et hydrogènes, ainsi que des véhicules au gaz naturel comprimé pour le trafic routier. Cela permet le maintien de chaînes logistiques longues, avec une vitesse de livraison accélérée.</p> <p>Électrification d'une partie du réseau autoroutier (3000 km).</p> <p>Augmentation du trafic ferroviaire (en volume et en part modale), principalement sur les grandes lignes à fort trafic. Les métropoles observent un déploiement des transports urbains collectifs, avec le Grand Paris Express pour l'Île de France et l'extension de métros et tramway pour les autres villes.</p> <p>Le trafic aérien métropolitain est très légèrement croissant entre 2030 et 2050.</p>	<p>Baisse du trafic passager après 2030, de l'ordre de 1,1% par an jusque 2050, avec un renforcement des mobilités douces (triplement des voies cyclables en 2050 qui permet un maillage complet du territoire) et une contraction de la part modale des véhicules particuliers de l'ordre de 2,5% par an entre 2030 et 2050. Contraction de 1,9% du volume de fret entre 2030 et 2050, et particulièrement du trafic poids lourds (-3,4% par an), au profit du ferroviaire. Déploiement important de bornes de recharges électriques, car peu de recours aux bio carburants et à l'hydrogène.</p> <p>Renouveau du réseau ferré secondaire.</p> <p>Les transports collectifs dans les villes moyennes remplacent une partie des usages de la voiture particulière.</p> <p>Les longues distances métropolitaines sont couvertes par d'autres modes de transport que l'avion en 2050.</p>
Energie	En 2050, les émissions annuelles liées à l'énergie sont réduites d'environ 95% par rapport à 2018, la seule énergie fossile encore présente dans le mix énergétique est le gaz à hauteur de 2%.	
	<p>Consommation électrique en augmentation (croissance de 12% jusque 2030, puis de 40% entre 2030 et 2050). Près de 50% de cette électricité est renouvelable, notamment grâce à l'éolien off shore.</p> <p>Baisse de la consommation de gaz de 12% en 2030 et de près de 60% en 2050. La production de biogaz, qui représente plus de 99% du gaz en 2050, est alors assurée à 80% par la méthanisation.</p> <p>Les projets de développement des capacités d'énergies renouvelables se concentrent sur le biogaz (notamment pour le fret poids lourd), les réseaux de chaleur.</p>	<p>Consommation électrique en diminution (-12% entre 2030 et 2050), le mix est majoritairement décarboné, avec un redimensionnement du réseau de distribution pour accueillir plus d'énergies renouvelables (solaire et éolien).</p> <p>Développement supérieur du photovoltaïque, notamment en toiture entre 2021 et 2030, puis baisse des investissements car avant tout sobriété des usages électriques.</p> <p>Le biogaz (produit à 93% en 2050 par méthanisation) a remplacé le gaz naturel fossile, et le gaz devient une partie très faible des consommations (baisse de 68% en 2050 par rapport à 2018)</p>
Technologie et numérique	Support de toutes les innovations de ruptures attendues par le scénario Pro techno (IA, ordinateur quantique) Le volume de données transmises est multiplié par 40 en 2050 (exemple : 5G sur tout le territoire avec plus d'antennes)	Catalyseur d'une logique low tech et d'une économie collaborative de la fonctionnalité. Le volume de données transmises est multiplié par 5 en 2050, avec une efficacité énergétique moindre. La 5G limitée ne concerne que 50% des données mobiles.
CCS	Deux gisements de stockage retenus, avec développement des canalisations de transport de CO ₂ à hauteur de 700 km.	La technologie CCS reste peu mature, seulement 100km de nouvelles canalisations de transport de CO ₂ issus CCS



**Résilience des
infrastructures**

III - Résilience des infrastructures

Introduction

Les épisodes extrêmes vont devenir plus fréquents et plus intenses du fait du changement climatique en cours. Les précipitations extrêmes par exemple sont supposées s'intensifier de 7% par degré de réchauffement supplémentaire, alors même que l'évolution tendancielle de nos émissions de GES pourrait nous amener à +3°C de réchauffement par rapport à l'ère préindustrielle dès 2050.

La France métropolitaine, comme le reste du monde, va devoir faire face rapidement à cette nouvelle donne climatique : en plus d'investir dans la réduction des émissions territoriales, il est nécessaire de se préparer à ses impacts. En effet, au niveau global, le coût de l'inaction face au changement climatique est bien supérieur à la somme des investissements nécessaires pour réduire nos émissions et se préparer à cette nouvelle donne climatique²⁷. Le chiffrage global de ce coût de l'inaction n'a pas encore été réalisé pour la France spécifiquement car il nécessite une approche type d'infrastructure par type d'infrastructure et territoire par territoire. Le CEREMA y travaille actuellement²⁸.

Cela dit, le premier défi de l'adaptation au changement climatique est désormais de passer d'une réponse réactive, sectorielle et au cas par cas, à une logique systémique, proactive et préventive.

Se préparer à ce changement climatique passe donc par **l'adaptation des infrastructures existantes**, de manière à conserver leur **intégrité structurelle** et à **maintenir leur fonctionnalité**. Deux types d'investissements doivent être réalisés : des **investissements dits préventifs** qui visent à éviter tout ou partie des dommages probables prévisionnels, mais aussi des **investissements dits curatifs** qui correspondent au coût de la reconstruction des ouvrages endommagés par un aléa climatique.

L'évolution notable de certains risques climatiques dans un scénario climatique pessimiste, comme l'élévation du niveau de la mer, la plus grande intensité d'épisodes de crues fluviales ou encore le stress hydrique, doivent également donner lieu à la construction ou au renforcement **d'ouvrages de protection** vis-à-vis de ces risques.

Ce volet « Résilience » se structure en deux exercices distincts :

1. L'évaluation du besoin d'adaptation du parc des infrastructures existantes à l'horizon 2050 et dans un scénario qui reflète les dynamiques actuelles d'évolution des émissions de gaz à effet de serre.

²⁷ Lord Nicholas Stern, « The economics of climate change », Cambridge University Press, 2006

²⁸ <https://www.cerema.fr/fr/actualites/cout-inaction-face-au-changement-climatique-cerema-elabore>

2. L'évaluation du besoin d'adaptation via de nouvelles infrastructures publiques de protection vis-à-vis de 3 risques distincts : le risque d'élévation du niveau de la mer, celui d'inondation des cours d'eau, et le risque de stress hydrique.

Une contextualisation préalable du climat futur de la France métropolitaine a été réalisée. Elle prend la forme d'une représentation cartographique, qui se retrouve dans l'**Annexe Résilience**. L'étude de l'évolution de quelques aléas climatiques, qu'ils soient relatifs à l'évolution des températures, des précipitations ou de la montée du niveau de la mer, suffit à comprendre que **la France métropolitaine va devoir faire face, y compris à court terme, à une nouvelle donne climatique : en plus d'investir dans la réduction des émissions, il est nécessaire de se préparer à ce nouveau climat.**

Dans la suite de cette étude sur la résilience climatique des infrastructures, le scénario de réchauffement de référence utilisé est le RCP 8.5, issu du 5^{ème} rapport du GIEC. Ce choix est sans regret, les différents scénarios climatiques divergeant nettement après 2050, mais restant relativement proches d'ici cette date.

Besoin en adaptation des infrastructures existantes

La première phase du volet « Résilience » a pour objectif de quantifier, par rapport à la situation actuelle, le **besoin en investissement *additionnel*** nécessaire au maintien du niveau de service rendu par les infrastructures existantes, que ce soit via des **travaux préventifs** visant à éviter tout ou partie des dommages causés par les aléas climatiques futurs ou via des **travaux curatifs**, pour remettre en fonction ces infrastructures à la suite des impacts d'un aléa climatique.

Le présent travail sur ces questions est exploratoire. Son approche méthodologique fondée, entre autres, sur l'utilisation du score de risque climatique, permet cependant de s'assurer que les enjeux clés ont bien été traités pour les infrastructures de France métropolitaine. Une première quantification des enjeux d'investissement a été réalisée au niveau d'un échantillon, puis extrapolée à la maille nationale. Ce chiffrage permet de pointer le niveau d'efforts d'investissements à fournir, et également d'encourager la création d'une politique nationale sur le sujet de l'adaptation au changement climatique.

Le besoin en investissement est qualifié d'« Additionnel » car il s'ajoute aux travaux usuels de rénovation et maintenance déjà identifiés comme nécessaires pour conserver l'intégrité des infrastructures et leur niveau de service actuel (qui sont traités dans la partie « Réduction » de cette étude). Dit autrement, cette étude tente d'isoler et quantifier le coût de l'adaptation à une nouvelle donne climatique, se caractérisant par une multiplication et une intensification des aléas climatiques.

Ce besoin en investissement porte sur les types d'infrastructures suivants, illustrés avec des exemples d'impact du changement climatique :

		Exemple d'impact du dérèglement climatique
Mobilité	Routes	Chaussées fissurées
	Tunnels (surface)	Perturbation du trafic
	Tunnels (souterrain)	
	Ponts	Ouvrage détruit par une inondation
	Rail (surface)	Rail déformés
	Rail (souterrain)	
	Ports	Aménagements littoraux mis en danger par des submersion marines
	Aéroports	Ramollissement de l'asphalte
Eau	Réseau de distribution de l'eau	Corrosion des tuyaux
	Station de traitement de l'eau	
Energie	Infrastructures réseau électrique (surface)	Surchauffe des équipements
	Infrastructures réseau électrique (souterrain)	
Numérique	Infrastructures télécom (fibre optique, surface)	Surchauffe des équipements
	Infrastructures télécom (fibre optique, souterrain)	

Les impacts du dérèglement sur les infrastructures sélectionnées ont été détaillés au sein des « profils de vulnérabilité » construits dans le cadre de cette étude et explicités par la suite.

Principes méthodologiques

La démarche générale proposée se déroule en 4 phases successives et repose sur une réflexion par échantillonnage, par la suite extrapolée au reste du territoire métropolitain. Le choix de cette approche s'est trouvé renforcé par la nécessité de disposer de données géolocalisées, car l'évolution de l'aléa climatique varie en fonction de la localisation.

Cette approche permet de produire un premier **ordre de grandeur** pertinent du besoin d'investissements pour adapter les infrastructures existantes, malgré un nombre très important d'ouvrages à traiter, une accessibilité souvent non immédiate de certaines informations, ou encore une absence de données.

1. La première étape consiste à définir un échantillon pour chaque catégorie d'infrastructure de sorte à disposer de données géolocalisées à exploiter.
2. Sur la base de cet échantillon, un score de risque climatique a été calculé, c'est à dire un score de vulnérabilité de l'infrastructure en question face à différents aléas climatiques extrêmes et graduels. La méthodologie de calcul de ce score est détaillée par la suite et se base en partie sur la méthodologie CIARA²⁹ développée par Carbone 4. L'évolution de ce score de risque climatique dans le futur permet

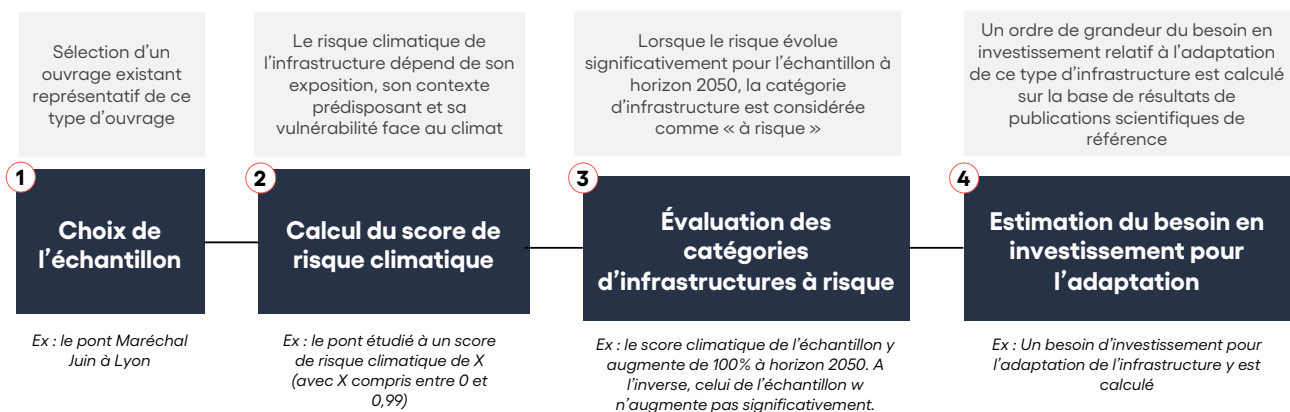
²⁹ <https://ciara.carbone4.com/>

d'identifier les infrastructures à risque et les aléas climatiques induisant les dommages les plus importants.

3. L'évolution de ce score de risque climatique dans le futur permet d'identifier les infrastructures à risque et les aléas climatiques induisant les dommages les plus importants.
4. Lorsque ce score de risque évolue significativement, le besoin en investissement pour l'adaptation de cette catégorie d'infrastructure a été estimé sur la base de publications scientifiques et à l'échelle du territoire métropolitain.

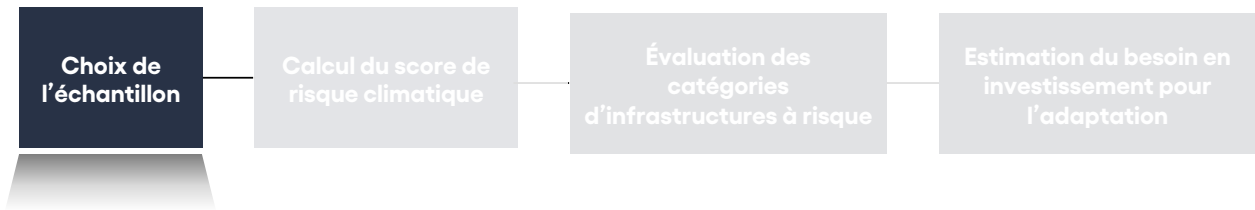
Cette approche en entonnoir a permis de recentrer l'étude sur les sujets les plus importants. Ainsi, les ordres de grandeur d'investissements quantifiés couvrent la partie la plus significative de la question de l'adaptation au changement climatique pour les infrastructures existantes.

Synthèse de la méthodologie adoptée



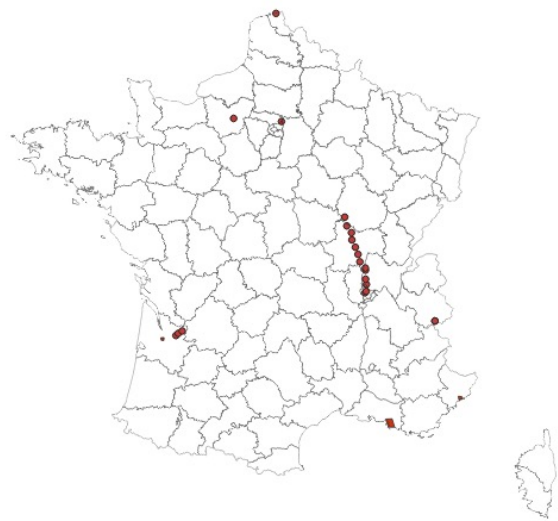
En d'autres termes, cette étude propose une première estimation du coût d'investissement additionnel pour 1. Réparer et 2. Se préparer à la multiplication et à l'intensification des impacts induits par les aléas climatiques en France ; ceci à horizon 2050 et dans un scénario pessimiste de l'évolution des émissions de GES au niveau mondial.

1 - Le choix des échantillons



-  Route : **D1089 de Libourne à Saint Médard de Guzières**
-  Tunnel : **Tunnel du Fréjus**
-  Pont : **Pont Maréchal Juin à Lyon**
-  Rail (surface) : **Tronçon de 100km du trajet Paris Gare de Lyon à Lyon Perrache**
-  Rail (souterrain) : **Tunnel ferroviaire de Fréjus**
-  Port : **Port de Dunkerque**
-  Aéroport : **Aéroport de Roissy**
-  Réseau de distribution de l'eau : **Ville de Bordeaux**
-  Station de traitement de l'eau : **Centre de traitement des eaux usées de Gravigny**
-  Infrastructures réseau électrique (surface et souterrain) : **Ville de Marseille**
-  Infrastructures télécom (fibre optique surface et souterrain) : **Ville de Nice**

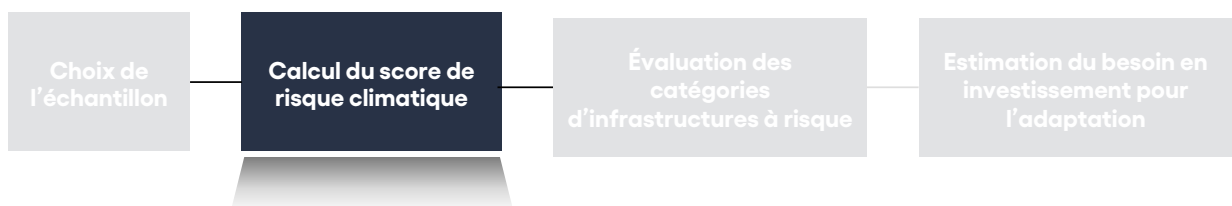
Vision géographique des échantillons retenus

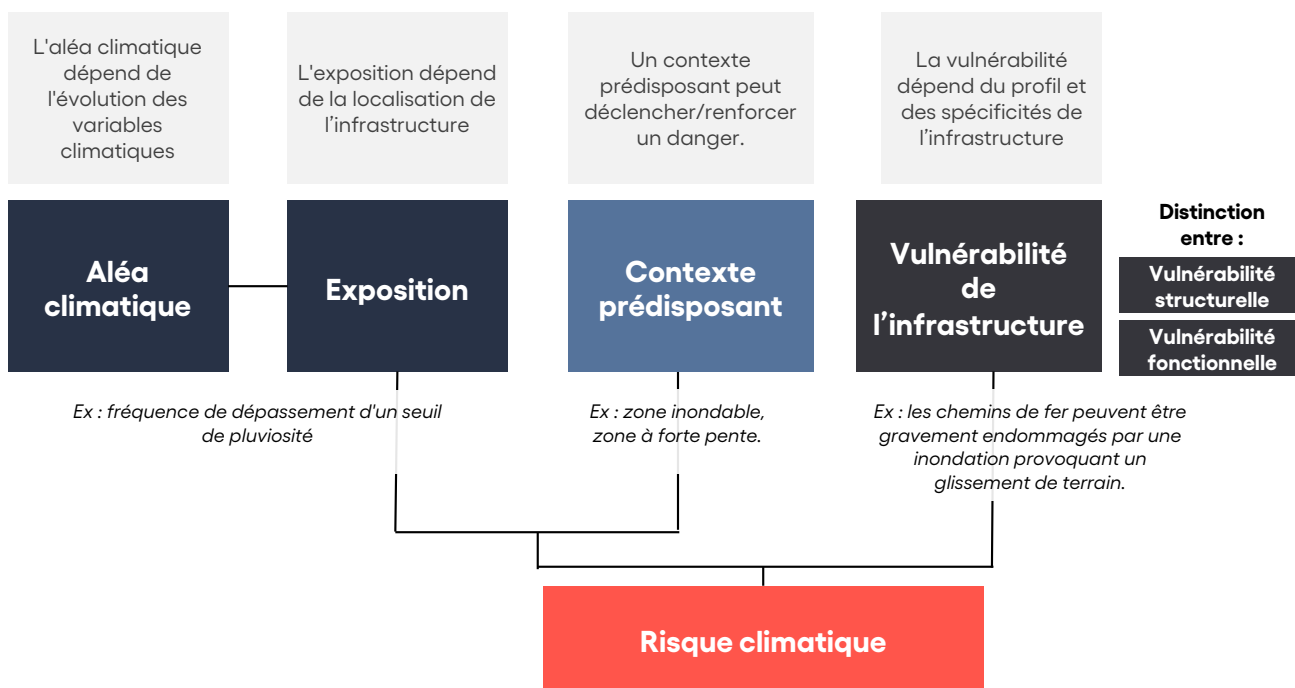


Les échantillons choisis couvrent un périmètre géographique large, et des infrastructures connues par le grand public.

2 - Calcul du score de risque climatique

Pour chaque aléa climatique et chaque type d'infrastructure, le risque est une combinaison de projections climatiques, d'une exposition, d'un contexte prédisposant et d'une vulnérabilité structurelle.

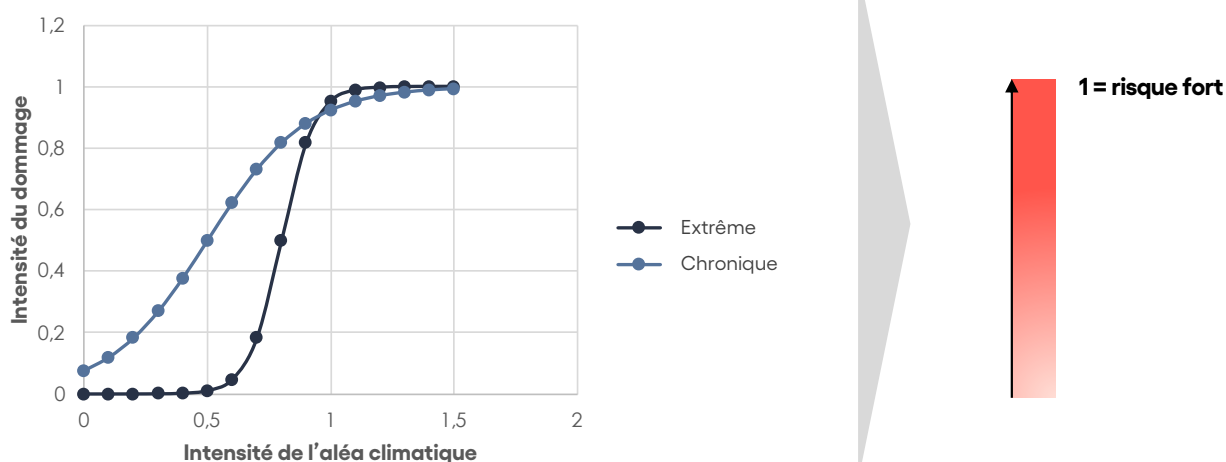




A - Exposition d'une infrastructure à un aléa climatique.

Pour aboutir à un score de risque sur ces deux briques, il est nécessaire de faire le lien entre l'aléa climatique et les dommages potentiels infligés à une infrastructure : 11 fonctions de dommages ont été créées. Ces fonctions suivent soit un profil d'aléa extrême, soit un profil d'aléa chronique. Des scores sont produits pour chacun sur une échelle de 0 à 1.

Exemple de fonctions de dommage



- o Certaines fonctions de dommages sont spécifiques à un type d'infrastructure (par exemple, les rails sont très sensibles à une période de trois jours consécutifs pendant laquelle la température dépasse 30°C - vagues de chaleur).

- Certaines fonctions de dommages sont utilisées pour différents types d'infrastructures (par exemple les inondations).

Davantage d'informations sur la méthodologie adoptée, notamment sur la construction des fonctions de dommages, sont disponibles en **annexe 3** de l'étude.

B - Vulnérabilité de l'infrastructure

- Pour chaque infrastructure retenue, des profils de vulnérabilité ont été construits sur la base de 9 aléas climatiques, à la fois aigus et chroniques.

9 aléas climatiques, à la fois aigus et chroniques

évaluée avec l'expérience multi-modèle CORDEX, pour 2050 et le scénario RCP 8.5

	Hausse de la température moyenne	C
	Hausse des précipitations	C
	Baisse des précipitations	C
	Vagues de chaleur	A
	Feux de forêt	A
	Stress hydrique	A
	Inondations et glissement de terrain	A
	Vents violents et tempêtes	A
	Montée du niveau de la mer, érosion côtière	C

13 profils de vulnérabilité

créé par Carbone 4 sur la base de l'expertise de Carbone 4 et d'une analyse documentaire

Routes
Tunnels
Ponts
Rail (surface/souterrain)
Ports
Aéroports
Réseau de distribution de l'eau
Station de traitement de l'eau
Infrastructures réseau électrique (surface/souterrain)
Infrastructures télécom (fibre optique, surface/souterrain)

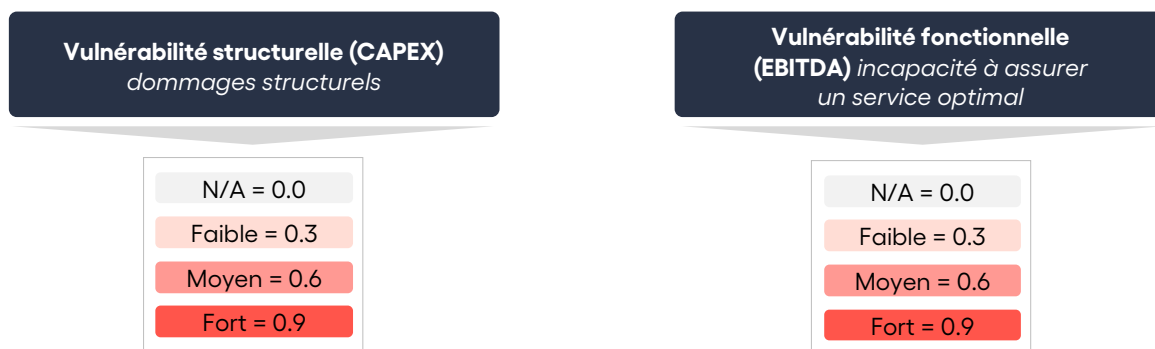
Pour aboutir à un besoin en financement, la vulnérabilité physique a été rapproché d'un indicateur financier, le CAPEX, tandis que la vulnérabilité fonctionnelle a été rapprochée de l'EBITDA.

Vulnérabilité structurelle	- CAPEX
Vulnérabilité fonctionnelle	- EBITDA

- A** Aléa aïgu
- C** Aléa chronique

- La vulnérabilité d'une infrastructure est construite comme le dommage théorique maximum provoqué par un ou plusieurs aléas climatiques sur cette infrastructure. La vulnérabilité a été évaluée en fonction de l'impact potentiel sur l'intégrité de l'infrastructure (vulnérabilité structurelle - dommages structurels sur l'infrastructure) et sa capacité à rester fonctionnelle (vulnérabilité fonctionnelle - incapacité à assurer un service optimal, ou perte de revenus pour l'exploitant). Là aussi, des scores sont produits pour chaque infrastructure et chaque aléa sur une échelle de 0 à 1.

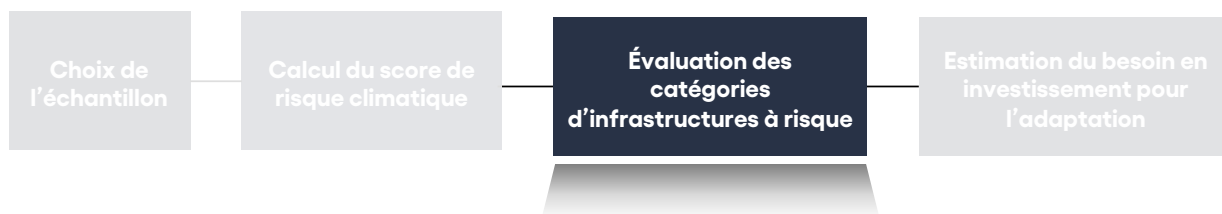
Pour chaque aléa et chaque type d'infrastructure



C - Calcul du score de risque climatique

La combinaison du score relatif aux projections climatiques et du score relatif à la vulnérabilité structurelle ou fonctionnelle des infrastructures permet d'obtenir un ultime score, dit « de risque climatique », qui reflète l'impact futur sur les infrastructures de l'ensemble des aléas climatiques étudiés.

Taux de croissance du score de risque par type d'infrastructures



Le détail des scores de risque climatique est disponible en **annexe 3**. Ils doivent être interprétés comme reflétant l'évolution dans le temps des dommages anticipés sur les infrastructures. La valeur « de référence » donne une indication sur l'impact d'un climat semblable à la période de référence utilisée (1976-2005) sur l'infrastructure. La valeur « future » donne une indication sur l'impact d'un climat semblable à celui de 2050 (pour être plus précis, au climat attendu entre les années 2041-2070) sur l'infrastructure.

Ces scores sont dits « climatiques » en ce qu'ils donnent une indication du risque encouru par les infrastructures face aux 9 aléas climatiques, aigus et chroniques, décrits précédemment. Pour cette raison, certains scores peuvent paraître faibles au global, comme c'est le cas pour la route. Pour autant, la sensibilité de l'infrastructure à un risque climatique en particulier, comme les fortes chaleurs pour la route, peut être élevée.

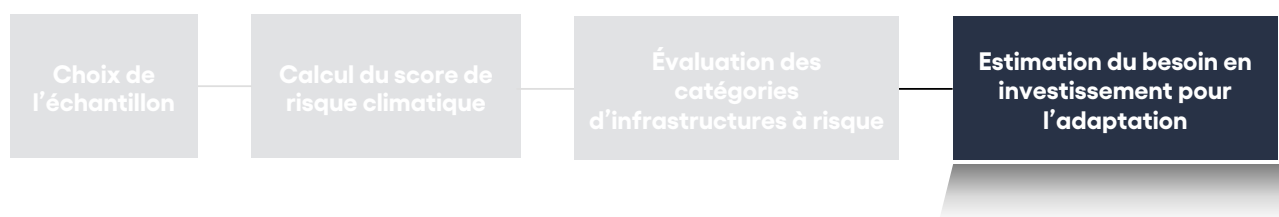
Un score de risque climatique en tant que tel est une donnée sans unité physique immédiate, mais son évolution dans le temps nous donne une indication sur l'évolution des impacts induits par le changement climatique et subis par les infrastructures.

Pour cette raison, *l'évolution de ce score a été utilisée dans la suite de l'étude pour identifier les infrastructures « à risque », et par conséquent celles pour lesquelles un calcul du besoin en investissement pour leur adaptation a été réalisé.*

La quantification du besoin en investissement pour adapter les infrastructures existantes aux aléas les plus impactants a ensuite été réalisée sur la base des résultats d'une ou plusieurs publications scientifiques, selon une méthode détaillée en **annexe 3** pour chaque catégorie d'infrastructure. Les chiffrages réalisés ne peuvent toutefois pas être comparés entre infrastructures : le périmètre d'étude dépend directement de l'infrastructure étudiée, sa vulnérabilité face au climat, et l'état de la connaissance sur les coûts induit par l'adaptation de ces ouvrages.

Synthèse des résultats

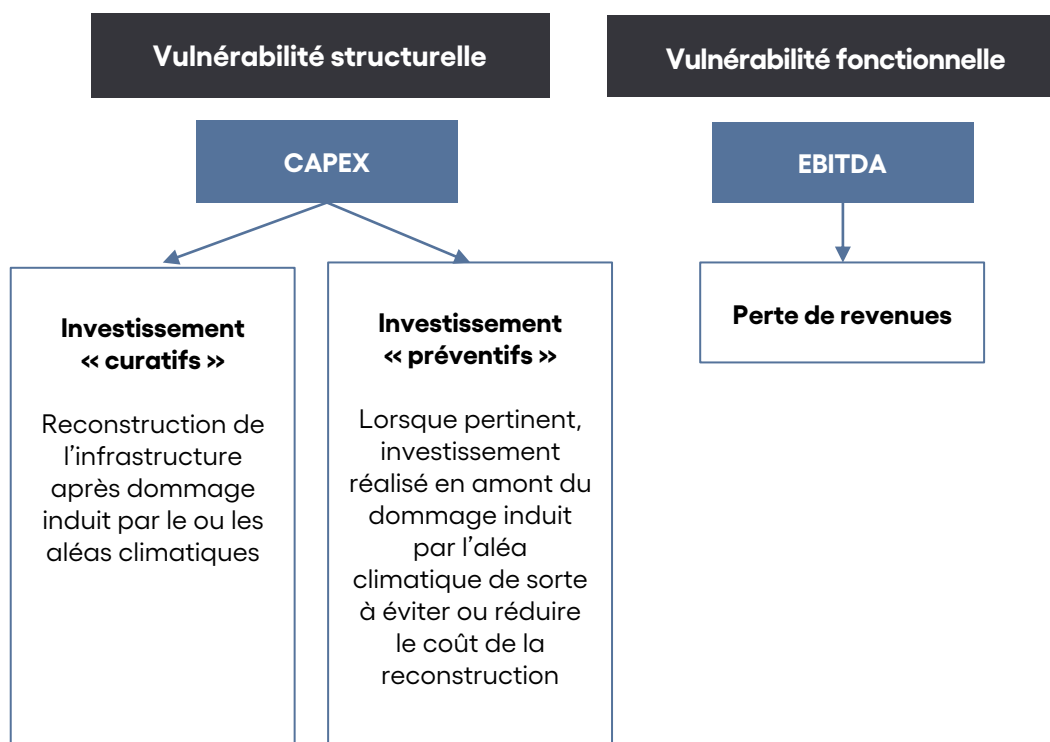
Les résultats suivants doivent être interprétés comme des **ordres de grandeur**. Ils ont été construits sur la base d'un échantillon, par définition non représentatif de la diversité des ouvrages en France³⁰, et extrapolés à l'ensemble du territoire métropolitain. Les hypothèses structurantes et le chemin d'extrapolation du besoin d'investissement, de l'échantillon à la maille nationale, sont détaillés en annexe du rapport.



Selon le résultat des scores climatiques, trois éléments distincts ont pu être calculés pour chaque catégorie d'infrastructures :

- Le besoin d'investissement *curatif*, c'est-à-dire nécessaire à la reconstruction des ouvrages à la suite d'un aléa climatique ou une combinaison d'aléas.
- Le besoin d'investissement *préventif*, c'est-à-dire nécessaire pour éviter tout ou partie des dommages probable à venir du fait du dérèglement du climat.
- L'impact de l'évolution des aléas climatiques sur les pertes liées à l'excédent brut d'exploitation, ou autrement dit, les pertes induites pour l'exploitant de l'infrastructure par l'arrêt temporaire du service fourni aux usagers (vulnérabilité fonctionnelle).

³⁰ Notamment du point de vue de leur exposition



Ces investissements ne seront pas additionnés au sein du rapport final pour aboutir à un chiffrage global.

Synthèse des résultats :

	Aléas les plus impactants	Perte potentielle d'exploitation	Investissements « curatifs » potentiels à réaliser entre 2035 et 2050	Investissements « préventifs » à réaliser entre 2020 et 2035
Route	Augmentation de l'intensité et de la fréquence des vagues de chaleur	Aucun changement notable dans l'évolution du risque pour l'échantillon retenu	22 000 millions d'euros	Non évalué par manque d'informations
Tunnel	pluies intenses entraînant des inondations et glissements de terrain	10 millions d'euros	Aucun changement notable dans l'évolution du risque pour l'échantillon retenu	Non pertinent pour l'échantillon retenu
Pont	pluies intenses entraînant des inondations et glissements de terrain	Non évalué par manque d'informations	Non évalué par manque d'informations	12 000 millions d'euros
Voie ferroviaire	Vagues de chaleur et pluies intenses	Non évalué par manque d'informations	200 millions d'euros	Non évalué par manque d'informations
Tunnel ferroviaire	Pluies intenses entraînant des inondations et glissements de terrain	150 millions d'euros	Aucun changement notable dans l'évolution du risque pour l'échantillon retenu	Non pertinent pour l'échantillon retenu
Port	Elévation du niveau de la mer	Aucun changement notable dans l'évolution du risque pour l'échantillon retenu	Aucun changement notable dans l'évolution du risque pour l'échantillon retenu	200 millions d'euros
Aéroport	Augmentation de l'intensité et de la fréquence des vagues de chaleur	100 millions d'euros	Aucun changement notable dans l'évolution du risque pour l'échantillon retenu	8 millions d'euros
Réseau d'eau	Pas d'aléa mais rénovation pour limiter le taux de fuite	Non pertinent pour l'échantillon retenu	Non pertinent pour l'échantillon retenu	11 000 millions d'euros (calcul issu de la phase 3)
Station de traitement de l'eau	Vagues de chaleur et pluies intenses	Aucun changement notable dans l'évolution du risque pour l'échantillon retenu	Aucun changement notable dans l'évolution du risque pour l'échantillon retenu	Non pertinent pour l'échantillon retenu
Réseau électrique aérien/souterrain	Vagues de chaleur, sécheresses entraînant feux de forêts, et pluies intenses entraînant inondations et glissement de terrain	Non pertinent pour l'échantillon retenu	1700 millions d'euros	800 millions d'euros
Réseau numérique aérien/souterrain	Vagues de chaleur, sécheresses entraînant feux de forêts, et pluies intenses entraînant inondations et glissement de terrain	Description qualitative	Description qualitative	Description qualitative

La séquence d'investissements à réaliser est différente entre les deux types d'investissements :

- Les investissements *préventifs* doivent être réalisés au plus tôt de sorte à éviter la destruction d'infrastructures ou leur mise hors d'usage. Selon toute vraisemblance, ces investissements doivent intervenir dans les 15 prochaines années.
- Les investissements *curatifs* sont supposés inéluctables puisqu'intervenant à la suite d'un aléa climatique. Ils correspondent à une adaptation spontanée à ces impacts. Selon toute vraisemblance, les investissements à allouer à la reconstruction ne seront pas répartis uniformément dans les 30 prochaines années, mais plutôt resserrés à mesure que nous nous rapprocherons du milieu du siècle.

A titre illustratif sont interprétés ci-dessous deux de ces montants :

- **Les Routes** : D'abord, le calcul du score climatique sur l'échantillon sélectionné (D1089) a permis de mettre en valeur la sensibilité de l'échantillon à l'augmentation de l'intensité et de la fréquence des vagues de chaleur, dont les impacts principaux sont le ramollissement de l'asphalte et le risque d'orniérage. Pour aboutir à un chiffrage du coût lié à la multiplication des vagues de chaleur et à leurs impacts sur les routes, notre travail s'est appuyé sur une étude faisant la démonstration qu'à horizon 2050 et dans un scénario climatique pessimiste, les travaux de réfection du revêtement des routes interviennent 8 à 16% plus tôt du fait du changement climatique. En considérant une hypothèse conservatrice de 8% et après évaluation des dommages potentiels à l'échelle du territoire métropolitain, le montant liées aux réparations des routes en France s'élève à 22 Md€.
- **Les ponts routiers** : Sur la base de l'échantillon sélectionné (Pont Maréchal Juin à Lyon), l'analyse de risque climatique indique que les infrastructures de type « pont routier » ne sont pas, de façon intrinsèque, menacées par le changement climatique à horizon 2050. Toutefois, au regard de l'intensification et de la multiplication de certains aléas climatiques, comme l'augmentation des pluies intenses entraînant des inondations ou glissements de terrain, les infrastructures en mauvais état structurel sont et seront de plus en plus à risque. Ainsi, l'étude a porté sur des investissements préventifs à réaliser pour remettre les ponts les plus à risque en bon état. Le rapport commandé par le Sénat en 2019 et intitulé « Sécurité des ponts : éviter un drame » permet d'évaluer le nombre de pont départementaux en mauvais état structurel³¹ à plus de 19 000.

Concernant l'adaptation du parc d'infrastructures existant, des montants proches de 13 Md€ pour les investissements préventifs et de 25 Md€ pour les investissements curatifs pourraient être nécessaires en cumulé d'ici 2050 dans le scénario pessimiste (mais tendanciel) d'évolution de nos émissions de GES, pour adapter nos routes, nos ponts routiers, nos tunnels, voies ferroviaires, ports, aéroports, réseaux d'eau, stations de

³¹ Pont nécessitant des réparations des travaux de réparations (niveau 3) ou ponts gravement altérés (niveau 4) selon l'Observatoire National de la Route (ONR).

traitement d'eau et stations d'eau potable et autres infrastructures de l'eau et enfin, notre réseau électrique.

Cette étude est un travail exploratoire : elle donne une première vision d'ensemble de la problématique et doit être complétée par des analyses approfondies, plus proche du terrain, de la vulnérabilité structurelle et fonctionnelle des ouvrages d'art ainsi que des solutions spécifiques d'adaptation à mettre en œuvre.

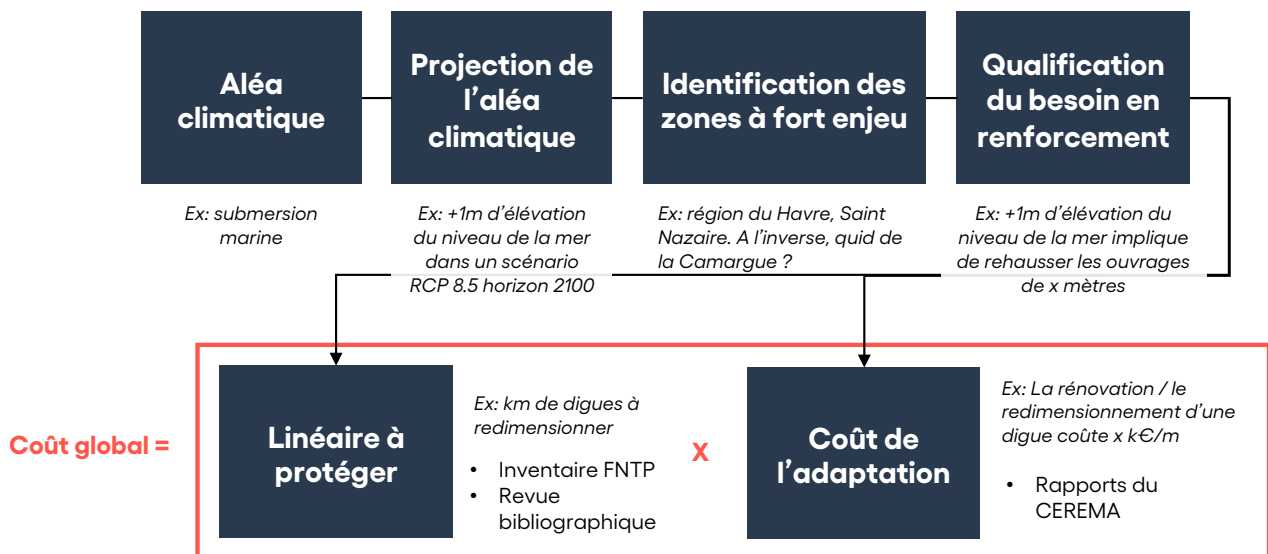
Besoin en ouvrages de protection

La seconde phase de ce volet « Résilience » a pour objectif d'évaluer une première estimation des investissements qu'il serait nécessaire d'engager pour développer des infrastructures de *protection* vis à vis de 3 risques induits par le changement climatique, à l'échelle de la métropole.

Périmètre d'étude

Érosion et submersion du littoral	Digues, brise-lames
	Perrés
	Murs et ouvrages de soutènement
Inondations fluviales	Digues, brise-lames
	Perrés
	Murs et ouvrages de soutènement
Stress hydrique Accès à l'eau Traitement eaux usées	Canalisations et distribution de l'eau
	Systèmes de rechargement de nappes phréatiques
	Dispositifs de retenues d'eau

Sur les deux premiers risques, pour chaque type d'ouvrage, la méthodologie adoptée a consisté à traduire les projections climatiques sur les aléas retenus en besoin d'adaptation. Une fois ce travail réalisé, il a été nécessaire de construire une table de correspondance entre ce besoin et le coût de l'adaptation. La méthodologie se résume comme suit :



L'évaluation du besoin d'adaptation des ouvrages de protection concernant le risque de stress hydrique a donné lieu à des méthodologies spécifiques à chaque type d'ouvrage et expliquées dans chacune des sous-parties.

Érosion et submersion du littoral

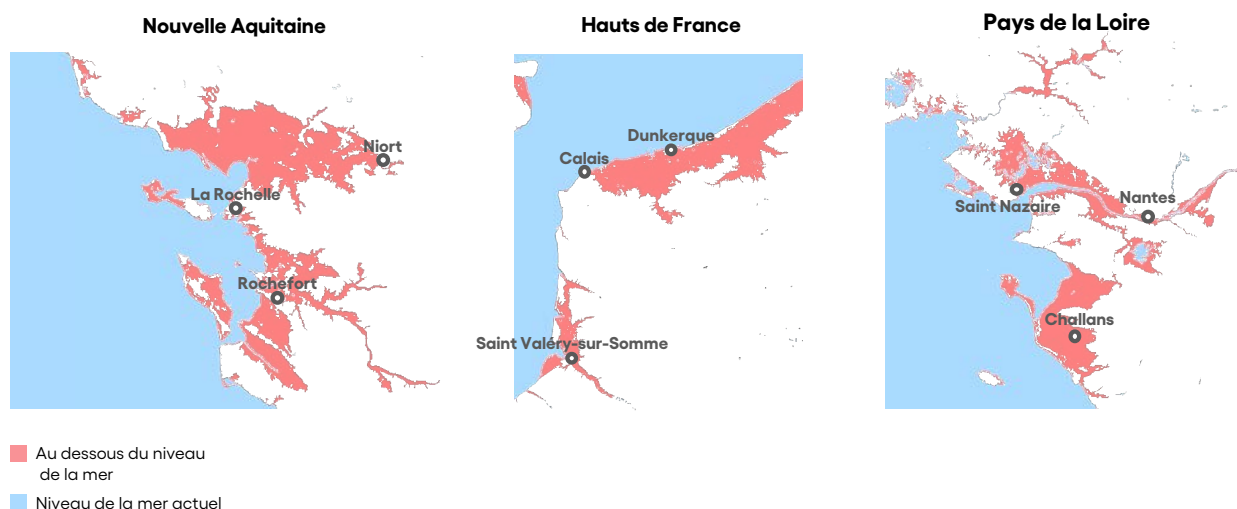
Cette première sous-partie vise à évaluer le montant nécessaire à l'adaptation des digues, perrés, murs et brise-lames de la France métropolitaine à horizon fin de siècle pour se défendre face au risque d'érosion et de submersion du littoral.

Pour commencer, des zones à fort enjeu ont été définies selon la densité de population et d'activité économique à protéger. Au total, 6 zones ont été retenues :

- Le **pourtour méditerranéen ouest**
- La **région bordelaise** en Nouvelle-Aquitaine
- La **région autour de la Rochelle, Rochefort et Niort** en Nouvelle-Aquitaine
- La **région de Saint Nazaire, du delta de la Loire et autour de Challans** en Pays de la Loire
- La **région autour du Havre et de Caen** en Normandie
- La **région côtière entre Saint Valéry-sur-Somme, Calais et Dunkerque** dans les Hauts de France

Extrait des zones identifiées comme « à fort enjeu »

Extrait de l'évolution du niveau marin à horizon fin de siècle pour les régions étudiées



Au global, l'étude porte 800km d'ouvrages de protection. Des précisions sur la méthodologie adoptée sont disponibles en annexe.

Résultats du besoin en investissement

L'étude du besoin en rehausse des ouvrages de protection a été réalisée pour le scénario de référence RCP 8.5 du 5^{ème} rapport du GIEC, dit « à très hautes émissions de GES ».

+0,82m	Besoin en investissement par type d'ouvrage (en Millions d'€)							
	Linéaire couvert (km)	Pourtour méditerranéen	Nouvelle Aquitaine - Région bordelaise	Nouvelle Aquitaine - Région de la Rochelle	Pays de la Loire	Normandie	Hauts de France	Total par type d'ouvrage
Brise-lames	17	55	13	2	2	-	8	80
Digue côtière	380	100	80	380	220	30	110	920
Epi	88	Non traité	Non traité	Non traité	Non traité	Non traité	Non traité	
Mur, mur de soutènement	126	2	12	10	60	15	5	105
Perré	187	18	65	180	160	77	100	600
Total							1,7 Milliard d'euros	

Le besoin d'investissement pour la rehausse des ouvrages de protection vis-à-vis de l'érosion et de la submersion du littoral pour le scénario RCP 8.5 est évalué à 1,7 Md€ entre 2020 et 2100.

Limites de l'étude

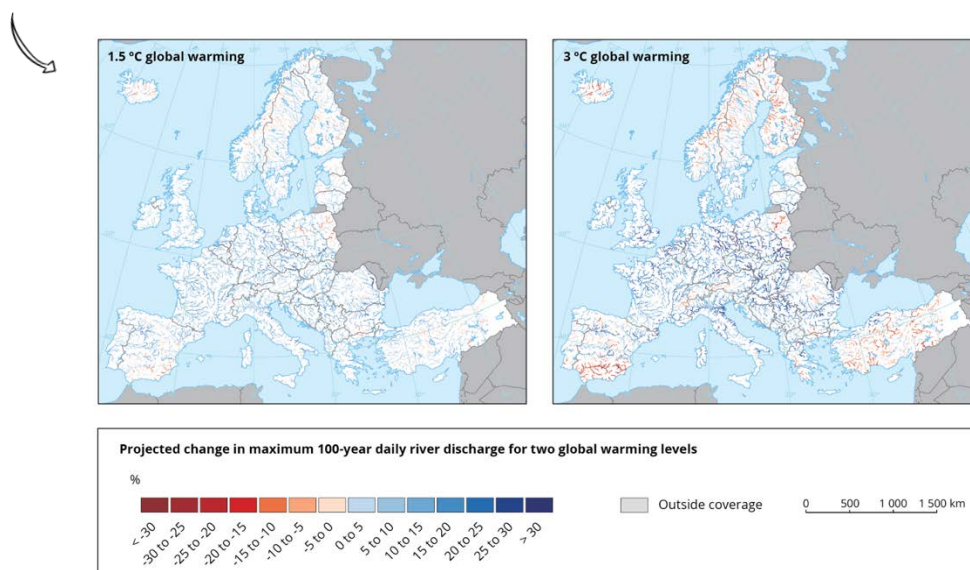
- Les aménagements des futurs espaces côtiers récréatifs (rechargement des plages par exemple) n'ont pas été pris en compte, ni la construction d'ouvrages de protection supplémentaires. Seul le rehaussement des ouvrages actuels a été considéré.
- Le coût de maintenance/entretien des digues n'a pas été pris en compte ; seul l'effort financier destiné au rehaussement des ouvrages a été évalué.
- La solution d'adaptation via les digues est toutefois insuffisante pour espérer gérer le risque de submersion marine efficacement. Pour ce faire, il est nécessaire de penser l'aménagement des littoraux dans leur globalité (retrait de certaines activités / habitations du trait de côte, solutions d'adaptation fondées sur la nature comme des barrières naturelles de protection côtières).

Inondations fluviales

Cette seconde sous-partie vise à évaluer l'investissement nécessaire à l'adaptation de nos digues fluviales à horizon fin de siècle pour se défendre face au risque d'inondations des fluviales.

L'évolution des intensités des crues fluviales en contexte de changement climatique reste encore un sujet de recherche. Pour cet aléa, les travaux et les données les plus à jour sont ceux de l'Agence Européenne de l'Environnement, que nous avons choisi d'exploiter pour évaluer l'évolution de l'intensité des crues centennales en France métropolitaine. Ce projet évalue l'évolution des précipitations extrêmes en France selon deux scénarios : un monde à +1,5°C, et un monde à +3°C qui correspond à un intermédiaire entre les scénarios RCP 4.5 et 8.5. Par manque d'informations sur l'évolution de cet aléa dans le futur pour le territoire français, et par souci de rester cohérent avec le choix d'utiliser un scénario pessimiste d'évolution des GES dans cette étude, c'est ce dernier scénario qui a été retenu.

Changement projeté du débit journalier maximal d'une rivière sur 100 ans pour deux niveaux de réchauffement climatique (AEE, 2019)



Le changement d'intensité des crues centennales a été extrait pour la France métropolitaine. En moyenne, dans un monde à +3°C de réchauffement comparé à la période préindustrielle, il est attendu que ces crues soient entre 10 et 15% plus importantes.

Des précisions sur la méthodologie adoptée sont disponibles en annexe.

Région	Coût relatif à la rehausse des digues (millions d'euros)
Provence-Alpes-Côte d'Azur	165
Pays de la Loire	145
Occitanie	215
Nouvelle-Aquitaine	230
Normandie	120
Ile-de-France	70
Hauts-de-France	100
Grand Est	145
Centre-Val de Loire	135
Bourgogne-Franche-Comté	120
Auvergne-Rhône-Alpes	120
Total	1,7 Milliard d'euros

Limites de l'étude

- Pour aboutir à un impact sur le besoin en rehaussement des digues fluviales, l'hypothèse d'une relation linéaire entre le changement d'intensité des crues centennales et le besoin en rehaussement des digues a été posée. Cette relation est une simplification car il n'est pas possible d'établir une relation directe, notamment linéaire, entre l'accroissement de l'intensité des crues et le rehaussement des digues. En effet, les conditions d'écoulement lors de crues plus intenses dépendront des évolutions du lit de la rivière et notamment de son lit majeur. La gestion de ces épisodes nécessite de penser l'aménagement du bassin versant dans sa globalité et pas seulement par une rehausse des ouvrages de protection. A titre d'exemple, la création de zones d'expansion de crue judicieusement choisies peut permettre d'abaisser la ligne d'eau au droit des enjeux majeurs et limiter ainsi les besoins de rehausse des ouvrages de protection.
- Les précipitations sont une variable dont la modélisation des évolutions est moyennement fiable. De plus, l'évolution des intensités des crues fluviales en contexte de changement climatique reste encore un sujet de recherche.
- Le corps de digue, dont la fonction principale est d'assurer la stabilité propre de la digue, est très souvent constitué de matériaux prélevés à proximité immédiate du site, comme l'argile. A dire d'expert, une partie des ouvrages sont soumis à des cycles de dessiccation-réhydratation liés à la sécheresse pouvant impacter leur résistance et performance. Cet impact n'a pas pu être quantifié par manque de données.

Stress hydrique

Les ressources en eau douce sont affectées par les changements de précipitation et la disparition des glaciers qui jouent un rôle régulateur du débit des cours d'eau. Pour ces deux raisons, le dérèglement du climat met directement en danger les réserves d'eau douce du territoire métropolitain. En outre, l'intensification des canicules et l'augmentation des températures conduisent à une augmentation de la consommation d'eau douce : +3% à l'année en 2050, +6% en été, +10% en période de canicule³².

Pour lutter contre le stress hydrique, il pourrait être nécessaire de récupérer et d'utiliser à grande échelle les eaux pluviales et eaux usées, ou encore de changer certaines pratiques agricoles (gestion de l'eau, de l'irrigation) pour rendre nos territoires plus résilients, solidaires, et par conséquent capables de s'adapter à une multiplication d'événements climatiques extrêmes.

Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes intéressés au rôle qu'allaient jouer certaines infrastructures publiques dans cette lutte pour préserver la ressource en eau douce. La première partie de l'étude s'intéresse au besoin de rénovation du réseau de distribution d'eau, dont le taux de fuite est encore de 20% à l'heure actuelle. La seconde propose une comparaison entre deux catégories d'infrastructures de stockage/gestion de la ressource en eau, que sont les retenues d'eau artificielles d'une part et les technologies de gestion des nappes phréatiques d'autre part. Ces deux solutions d'adaptation sont largement débattues à l'heure actuelle³³ ; l'objectif de ce travail est d'éclairer la prise de décision sur le développement de l'une ou de l'autre de ces solutions.

La première étude s'intéresse au besoin de rénovation du réseau de distribution d'eau. La seconde propose une comparaison entre deux catégories d'infrastructures de stockage/gestion de la ressource en eau, que sont les retenues d'eau artificielles d'une part et les technologies de gestion des nappes phréatiques d'autre part.

L'ACCELERATION DE LA RENOVATION DES CANALISATIONS

DE

DISTRIBUTION D'EAU POTABLE ET D'EAUX USEES

Le besoin en investissements a été évalué par deux approches :

-  **Le respect de la Loi Grenelle de 2012**

Le taux de fuite du réseau de distribution est évalué à 20% en France, avec un taux de renouvellement annuel des canalisations estimé à 0,5% depuis 2009, alors même que l'objectif national de 15% de fuite maximum a été fixé par décret en janvier 2012. Respecter ce décret signifierait rénover 1100km de linéaire supplémentaire par an pour les canalisations d'eau potable, soit un besoin d'investissement supplémentaire de 250 M€ par an. Quant aux eaux usées, cet objectif impliquerait de rénover 500 km de linéaire

³² Expertise Carbone 4

³³ Voir le rapport intermédiaire issu des « Varenne agricole de l'eau et de l'adaptation au changement climatique », 2021

supplémentaire par an pour un besoin d'investissement supplémentaire annuel de 110 M€.

Au total, le **besoin d'investissements supplémentaires est estimé à 360 M€ par an**, à réaliser le plus tôt possible.

- **Le renouvellement des canalisations une fois vétustes**

Une canalisation est changée en moyenne tous les 160 ans. Or le taux de fuite est notamment le fait de la corrosion des tuyaux par l'eau qui y transite, ou le vieillissement des joints entre les canalisations. Renouveler les canalisations une fois vétustes signifierait passer à une moyenne de 80 ans entre la pose et le renouvellement d'une canalisation.

Le taux de renouvellement du réseau d'eau potable et d'eaux usées devrait passer à 1,25%/an, soit 6800km de linéaire supplémentaire à rénover par an pour les canalisations d'eau potable. Il en résulte un besoin d'investissement supplémentaire de 1,5 Md€ par an. De plus, 3000km de linéaire supplémentaire de canalisations d'eaux usées seraient à rénover chaque année, générant un besoin d'investissement supplémentaire de 650 M€ par an.

Au total, le **besoin d'investissements supplémentaire est estimé à 2,2 Md€ par an**.

LES INFRASTRUCTURES DE RETENUE D'EAU ARTIFICIELLES ET LES TECHNOLOGIES DE GESTION DE NAPPES PHREATIQUES

Par manque de ressources et de données, et surtout d'une politique nationale³⁴ sur la question, cette dernière partie propose une comparaison - technique et en termes de coûts d'investissement unitaire – entre deux catégories d'infrastructures visant à pallier le risque de stress hydrique : les retenues d'eau artificielles, et les technologies de gestion de nappe.

Les retenues d'eau – une solution généralement identifiée comme relevant de la mal-adaptation³⁵ par la communauté scientifique

Les retenues d'eau artificielles ont pour idée de se protéger des conséquences du dérèglement climatique en stockant en surface les pluies d'hiver en prévision des besoins estivaux. Une retenue d'eau est constituée par l'accumulation d'eau produite par une construction sur le lit d'une rivière ou d'un ruisseau. Elle est alimentée par pompage dans les cours d'eau et les nappes souterraines, les pluies et les ruisseaux étant loin de suffire à remplir ces installations de grande taille.

Cette technologie comporte toutefois quatre limites principales, qui en font pour la communauté scientifique une solution de mal-adaptation face au risque de croissant de stress hydrique :

³⁴ Une stratégie nationale sur la question du stress hydrique est en cours de discussion à l'occasion du « Varenne agricole de l'eau et de l'adaptation au changement climatique ».

³⁵ Désigne un changement opéré dans les systèmes naturels ou humains qui font face au changement climatique et qui conduit à augmenter la vulnérabilité au lieu de la réduire.

- Une concurrence à la recharge naturelle des nappes phréatiques ;
- Des pertes conséquentes par évaporation ;
- Un risque de contamination de l'eau ;
- Des dégradations sur les écosystèmes en aval.

Les technologies de gestion de nappes

Il existe 3 technologies de gestion de nappes :

- Les bassins d'infiltration,
- Les méthodes d'injection directe d'eau de pluie,
- Les méthodes d'injection indirecte : elles consistent à augmenter le transfert d'eau entre un cours d'eau et une nappe alluviale en mettant en place des sites de pompage souterrains à proximité des berges.

Comparaison et coût d'investissement unitaire de ces deux solutions

Une analyse bibliographique a permis de mettre en lumière le coût bien supérieur des retenues d'eau face aux technologies de gestion des nappes, en particulier car les retenues nécessitent un foncier important. Le tableau ci-dessous propose une comparaison globale entre les deux technologies :

Comparaison stockage artificiel en aquifère et retenue collinaire :

Propriétés	Retenue collinaire	Stockage en aquifère
Superficie de terrain requise	Élevée	Très petite
Proximité des zones urbaines	Loin	A l'intérieur
Coûts d'investissements	Elevés	Faibles
Coûts d'études	Elevés	Faibles
Débit de prise et d'approvisionnement en eau	Élevé	Faible
Perte par évaporation	Modérées	Aucune
Problèmes d'algues toxiques	Modérées	Faibles
Moustiques	Modérées	Faibles
Pertes dans l'aquifère	Aucune	Aucune à élevées
Elimination des pathogènes	Faible	Significative
Potentiel de re-contamination	Modéré	Aucun à modéré
Energie de construction	Elevée	Faible
Energie de fonctionnement	Faible à modérée	Modérée
Milieu naturel nécessaire pour la viabilité	Vallée favorable	Aquifère favorable

Selon l'Agence de l'eau³⁶, le coût d'une retenue d'eau se situerait entre 2 et 2,5€/m³. En comparaison, la faible emprise au sol nécessaire dans le cadre d'un dispositif de gestion de nappe (hors bassin d'infiltration) justifie un coût unitaire complet variant de 0,5 à 0,75€/m³, soit 4 à 5 fois moins qu'une retenue collinaire³⁷.

Ainsi, **les solutions de recharge de nappes semblent très pertinentes à déployer plus largement sur le territoire pour faire face au stress hydrique** (moindre impact environnemental et coût compétitif) par rapport à un développement massif de retenues collinaires, identifiées généralement comme des solutions de mal-adaptation par la communauté scientifique.

Il n'est, en revanche, pas aisé de quantifier un besoin d'investissement à la maille nationale pour le développement de solutions de gestions de nappes (voire dans certains cas très spécifiques de retenues collinaires). En effet, les impacts du changement climatique sur le stress hydrique et par conséquent les besoins d'investissements pour y faire face sont très spécifiques à chaque contexte local (évolutions des précipitations, bassin hydrologique, activités humaines, ...) et nécessitent des études ad-hoc.

La conclusion de cet encart sur la gestion du stress hydrique est double : **une première solution consiste à accélérer la rénovation des canalisations d'eau potable et d'eaux usées ; une seconde solution consiste à déployer plus largement sur le territoire des technologies de gestion de nappes**, jugées plus intéressantes sur le plan environnemental et financier par rapport à des retenues d'eaux, pourtant souvent préférées. Pour aller plus loin, il est également plus que recommandé que chaque collectivité territoriale s'empare de cette problématique pour développer un plan d'adaptation pertinent, comme l'appelle le Varenne Agricole de l'eau mais également le Plan National d'Adaptation au Changement Climatique.

L'adaptation au stress hydrique en France ne pourra toutefois se limiter à ces deux uniques solutions d'adaptation. Dans un contexte de raréfaction de la ressource et parallèlement à nos besoins croissants, le **renouvellement et le renforcement des réseaux d'eaux pluviales** sont à étudier, et certains changements de paradigme pourraient être nécessaire, par exemple en **recyclant** lorsque cela est possible **les eaux usées traitées** pour certains usages agricoles, urbains et industriels.

³⁶ Agence de l'eau – Références de coûts pour la construction des retenues collinaires

³⁷ Infoterre, BRGM, Évaluation du coût de mobilisation de nouvelles ressources en eau souterraine dans l'Ouest de l'Hérault, 2013

Conclusion du volet résilience

Le coût de l'inaction face au changement climatique est supérieur au coût de l'action (réduction des émissions) et de l'adaptation.

Sans donner un chiffrage complet et absolu des enjeux d'investissement, cette étude donne toutefois une première vision d'ensemble de la problématique et devra être complétée par des analyses approfondies, plus proches du terrain, de la vulnérabilité structurelle et fonctionnelle des ouvrages d'art ainsi que des solutions spécifiques d'adaptation à mettre en œuvre. Progresser sur ces questions nécessiterait de passer par le renforcement des capacités d'organisation comme le CEREMA ou le BRGM, ce qui donnerait accès à une connaissance plus précise pour mobiliser l'action publique et accompagner la transition des territoires vers des systèmes davantage résilients.

Concernant l'adaptation du parc d'infrastructures existant, pour les investissements préventifs d'une part, et pour les investissements curatifs d'autre part, un montant proche de 25 dans chaque cas pourrait être nécessaire d'ici 2050 dans un scénario pessimiste (mais tendanciel) d'évolution de nos émissions de GES, pour adapter nos routes, nos ponts routiers, nos tunnels, voies ferroviaires, ports, aéroports, réseau d'eau, station de traitement d'eau et notre réseau électrique. Un ordre de grandeur de ~1,5 à 2 Md€ par an de besoin d'investissement est donc à garder en tête pour anticiper et/ou réparer les dégâts causés par la dérive climatique sur les infrastructures.

Concernant les ouvrages de protection, le rehaussement identifié comme nécessaire (mais non suffisant) des digues fluviales et côtières nécessiterait un investissement cumulé de plus de 3 d'ici la fin de siècle pour protéger les zones côtières à plus forts enjeux (très exposées et avec une population et une activité économique importantes). Ceci n'exclut pas l'investissement dans d'autres approches d'adaptation (solutions fondées sur la nature, retrait tactique du trait de côte, ..., non chiffrées ici car leur pertinence ou non est directement reliée au contexte local). Par ailleurs, pour préserver la ressource en eau face au stress hydrique, il apparaît nécessaire de privilégier le déploiement des technologies de gestion de nappes phréatiques, qui comparées à un développement massif des retenues collinaires ont l'avantage d'un moindre impact environnemental et d'un coût unitaire de construction compétitif.

**Restauration et besoins
en investissements pour
les activités des TP**



IV - Restauration et besoins en investissements pour les activités des TP

La restauration regroupe l'ensemble des actions visant à rétablir la structure et le bon fonctionnement d'un milieu ou d'un écosystème, en fonction des dégradations humaines subies.

Ces actions visent typiquement à :


- Enrayer la perte et la fragmentation des habitats naturels, premiers facteurs responsables du déclin de la biodiversité,
- Contribuer à l'atténuation du changement climatique en séquestrant durablement du CO₂ dans les différents puits de carbone : sols, arbres..., mais aussi - tel que catégorisé dans la SNBC - en développant l'utilisation de produits bois à longue durée de vie,
- Contribuer à l'adaptation au changement climatique en agissant sur le climat local ou en améliorant la résilience des territoires.

Elle apporte encore d'autres bénéfices : amélioration du paysage, soutien à l'agriculture par la régénération des services écosystémiques, protection des sols, création de valeur économique, etc.

Le volet « Restauration » complète les deux premiers volets de l'étude dans une optique de renforcement de la résilience de la France.

Périmètre et objectifs nationaux du volet restauration




Axes étudiés dans le volet restauration

	<p>Vers le Zéro Artificialisation Nette</p>	<p>Réduction de l'artificialisation de nouvelles surfaces (recyclage de friches, réutilisation du bâti, densification)</p> <p>Atténuation de l'impact de l'artificialisation (désimperméabilisation des sols, structures moins impactantes)</p> <p>Désartificialisation des sols (déconstruction, dépollution, régénération des sols)</p>
	<p>Renaturation des milieux</p>	<p>Renaturation des villes (végétalisation des villes et gestion des îlots de chaleur urbains)</p> <p>Renaturation des cours d'eau (débétonisation, modifications morphologiques, restaurations structurelles et fonctionnelles, ripisylve)</p> <p>Reforestation / Afforestation en forêt et milieu agricole (plantation d'arbres, gestion forestière, agroforesterie)</p> <p>Renaturation des prairies et zones humides</p>
	<p>Infrastructures linéaires et Trame verte & bleue</p>	<p>Gestion des eaux polluées (réseaux d'assainissement, bassins de traitement)</p> <p>Transparence écologique (dépendances vertes, aménagements pour la faune)</p>

Trois axes principaux sont abordés :

- « **Vers l'objectif Zéro Artificialisation Nette** » :
 - o Eviter l'artificialisation,
 - o Améliorer la valeur écosystémique d'un site artificialisé,
 - o Désartificialiser (rendre un site artificialisé de nouveau disponible pour la nature).
- « **Renaturation des milieux** » : Introduire ou réintroduire des éléments naturels sur un site naturel ou artificialisé, restaurer le bon fonctionnement d'espaces naturels tels que les cours d'eau.
- « **Infrastructures linéaires et Trame verte et bleue** » : Réduire l'impact environnemental, notamment en termes de qualité de l'eau et de transparence écologique des infrastructures linéaires relevant des travaux publics.

La restauration joue un rôle important dans la stratégie biodiversité de la France et dans la stratégie nationale bas-carbone, ainsi qu'au niveau des politiques territoriales. Les **principaux objectifs nationaux (ou locaux** dans le cas de la végétalisation des villes) associés aux différents axes de cette étude sont résumés ci-dessous :

Axes majeurs de la restauration	Exemples d'objectifs nationaux ou locaux
 <p>Vers le Zéro Artificialisation Nette</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Division par 2 du rythme d'artificialisation d'ici 2030 : 10 à 15 kHa/an maximum de nouvelles surfaces artificialisées ● Objectif « Zéro Artificialisation Nette » à horizon 2050
 <p>Renaturation des milieux</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Végétalisation de Paris : 40% du territoire en surfaces perméables végétalisées (2040) ● Restauration de la continuité aquatique sur 50 000 km de cours d'eau à horizon 2030 ● Augmentation des surfaces de forêt en France métropolitaine : <ul style="list-style-type: none"> - 2030 : 17 Mha (+0.5 Mha vs. 2015) - 2050 : 17.7 Mha (+1.2 Mha vs. 2015) ● Augmentation de l'emprise des arbres sur les surfaces agricoles (haies notamment) : <ul style="list-style-type: none"> - 2030 : 0.6 Ha (+0.2 Mha vs. 2015) - 2050 : 1.9 Ha (+1.5 Mha vs. 2015)
 <p>Infrastructures linéaires et Trame verte & bleue</p>	N/A

Objectif issu de :

Plan Biodiversité 2018

Stratégie Nationale Bas Carbone 2020

Loi Climat et Résilience 2021

Plan Climat Paris 2018

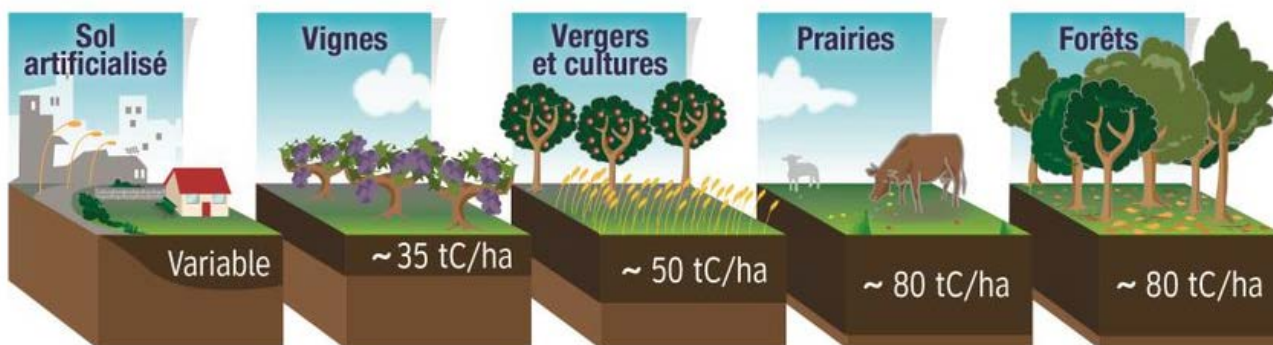
D'autres objectifs complémentaires utilisés dans cette analyse sont détaillés dans les méthodologies de chiffrage de chacun de ces axes. Ils intègrent aussi l'impact des deux scénarios prospectifs étudiés « Sobriété » et « Pro-Techno », qui sont cependant moins structurants pour ce volet.

Vers l'objectif Zéro Artificialisation Nette

L'artificialisation des sols désigne la conversion d'espaces naturels, agricoles, ou forestiers (ENAF) en surfaces non ENAF, dites « artificialisées » (tissu urbain, zones industrielles et commerciales, infrastructures de transport, espaces verts artificialisés...).

Les surfaces artificialisées sont généralement caractérisées par un fort degré d'imperméabilisation et de perturbation des sols, à l'origine d'impacts environnementaux importants :

- faiblesse de l'activité biologique ;
- renforcement des phénomènes de ruissellement et d'inondation ;
- contribution au phénomène d'îlots de chaleur urbains ;
- déclin de la biodiversité, par son impact sur l'habitat et des espèces ;
- réduction du captage de CO₂ par les sols (les sols artificialisés sont impropres à capter du CO₂, et l'artificialisation entraîne sur la durée un déstockage du carbone contenu dans le sol).



Estimation du stock de carbone dans les 30 premiers centimètres du sol

Source : GIS Sol / ADEME, Carbone organique des sols, l'énergie de l'agro-écologie, une solution pour le climat

En France, on estime qu'environ 20 000 à 30 000 hectares de surfaces sont artificialisés chaque année³⁸. Actuellement, l'artificialisation est à destination de l'habitat (70%), suivi par l'activité (24%), et 2% à usage mixte, la destination du reste étant non connue³⁹.

Les objectifs nationaux

Le plan Biodiversité (2018) a fait de la lutte contre l'artificialisation des sols l'un de ses axes prioritaires, affichant à terme un objectif de « Zéro Artificialisation Nette » (ZAN). Plus récemment, la Loi Climat et Résilience adoptée en août 2021 a fixé l'atteinte de cet objectif à l'horizon 2050, avec une division par deux du rythme d'artificialisation brute⁴⁰ d'ici 2030.

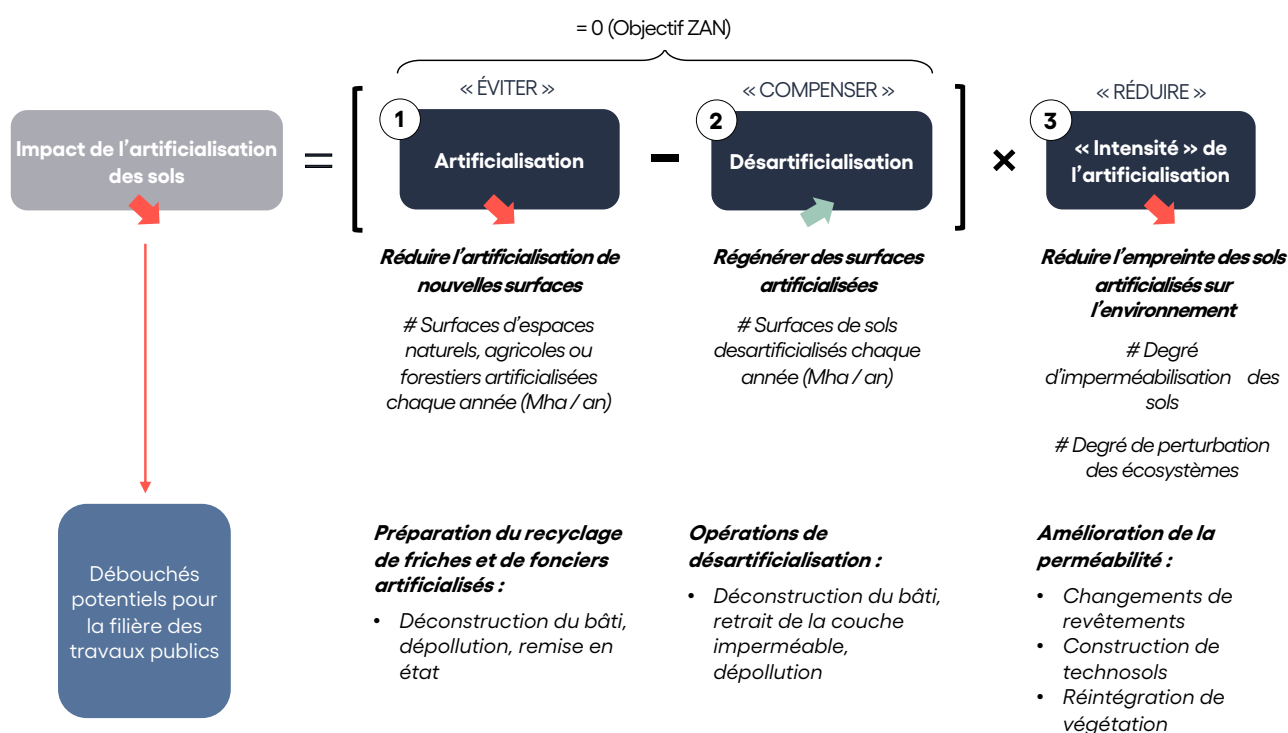
La mise en œuvre de cette Zéro Artificialisation Nette se décompose en plusieurs leviers, dont certains peuvent mobiliser des activités du secteur des travaux publics :

³⁸ Ministère de la Transition Écologique (juillet 2021)

³⁹ Cerema (2018), L'artificialisation et ses déterminants d'après les fichiers fonciers

⁴⁰ Consommation de sol non artificialisé

Leviers d'actions pour réduire les impacts liés à l'artificialisation des sols

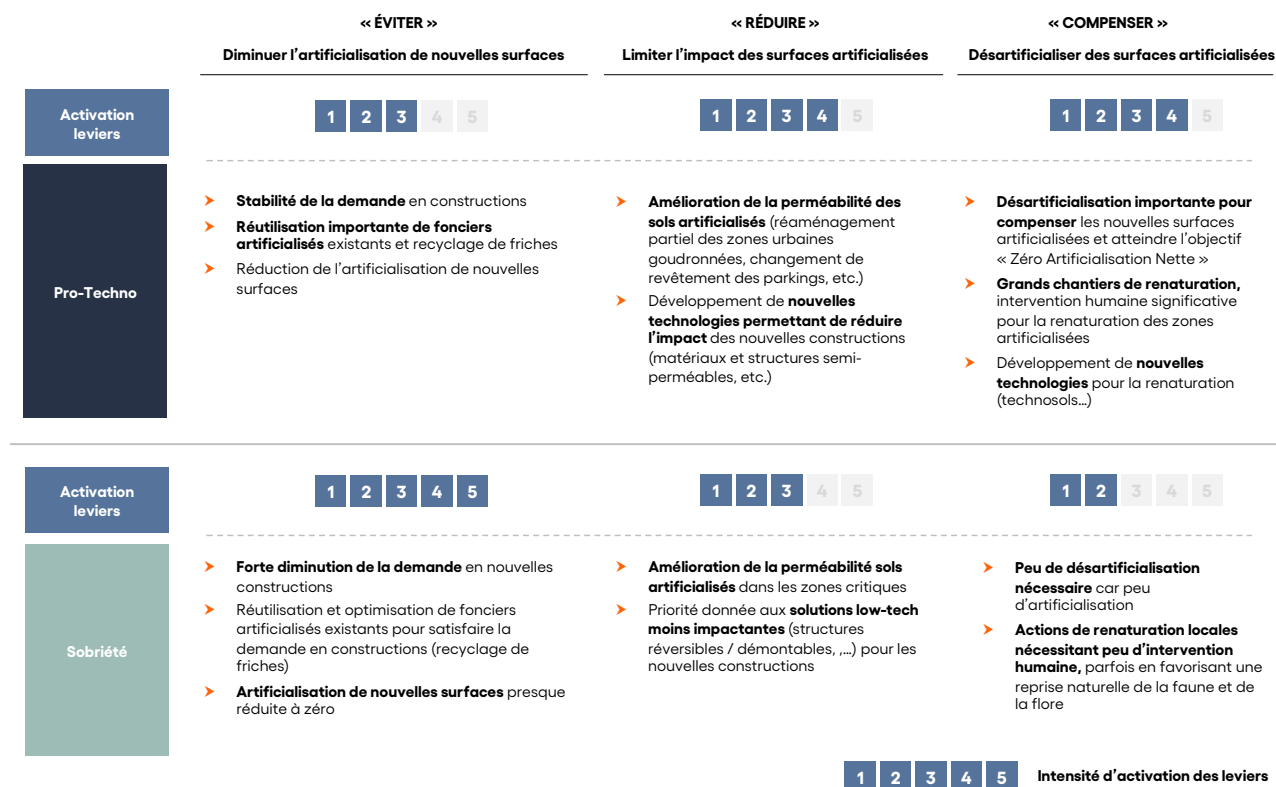


- 1) Diminuer l'artificialisation de nouvelles surfaces : réduction des constructions sur sol vierge.
- 2) Limiter l'impact des surfaces artificialisées : favoriser des techniques de construction et de gestion des sols préservant au maximum leurs fonctions écosystémiques et leur capacité à stocker du carbone.
- 3) Désartificialiser des surfaces artificialisées par des travaux relevant du génie écologique, dans le but de restaurer le « bon » état fonctionnel et écologique des sols ayant perdu leurs propriétés initiales.

A noter que, dans tous les cas, il faut très longtemps pour retrouver la totalité des fonctions écosystémiques perdues. La possibilité d'une « compensation » pour l'artificialisation des sols reste très controversée. Il est par conséquent crucial, en premier lieu, de réduire au maximum l'artificialisation de nouvelles surfaces ; la « compensation » des artificialisations incompressibles (s'il en reste) ne doit intervenir qu'en dernier recours, et pour un flux de surfaces limité.

L'artificialisation dans nos deux scénarios

Dans chacun des deux scénarios, ces leviers sont activés de manière différente, en cohérence avec les politiques et trajectoires correspondantes.



Dans le scénario Pro-Techno, les impacts de l'artificialisation sont limités par une modification des pratiques et un recours important à la désartificialisation.

- La demande en construction nouvelle est stable s'expliquant par un léger accroissement de la population associé à une légère diminution du nombre de personnes par foyer (l'un des principaux sous-jacents de la demande en nouveaux logements sur les 40 dernières années, qui va mécaniquement ralentir), mais aussi par une concentration de la population et de l'activité dans les grandes villes (impliquant une augmentation de la vacance dans les villes et territoires moins dynamiques).
- Pour limiter l'artificialisation, cette demande est satisfaite par la réutilisation du bâti ou des surfaces bâties existantes ou par le recyclage de friches. De plus, la densification des constructions continue à se développer.
- Le développement de nouvelles technologies et la réalisation de travaux de réaménagement permettent de réduire l'impact environnemental de l'artificialisation des sols (constructions sur pilotis, structures réversibles, technosols, nouveaux revêtements semi-perméables, etc.).

Des travaux de désartificialisation et de renaturation sont réalisés afin de compenser les pertes occasionnées par l'artificialisation, et ainsi atteindre l'objectif « Zéro Artificialisation Nette ».

Dans le scénario Sobriété, on artificialise peu et on privilégie une reprise naturelle nécessitant peu d'intervention humaine.

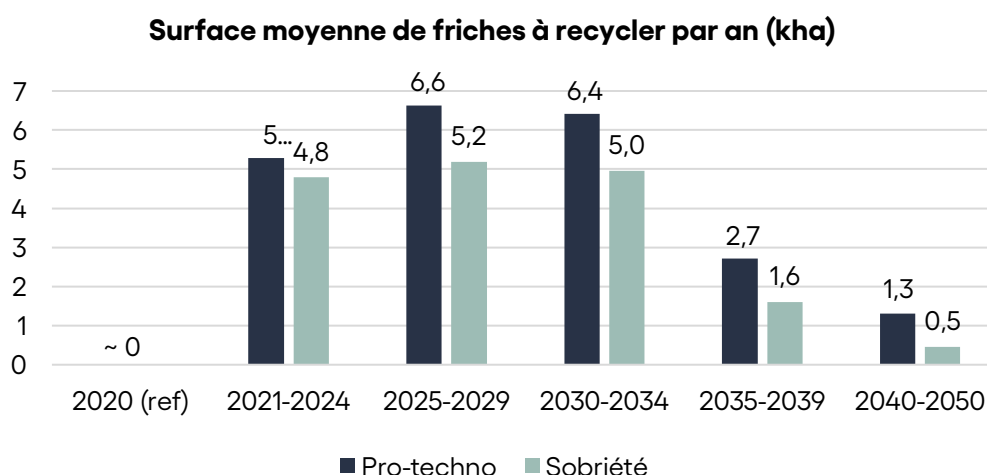
- La consommation de nouveaux espaces naturels ou agricoles diminue, dans le cadre d'une optimisation de l'usage des bâtiments, d'un réaménagement territorial et d'une réhabilitation des espaces vacants disponibles.
- L'usage des bâtiments est optimisé (intensification de l'usage des surfaces construites) grâce à de nouvelles initiatives qui se développent.
- L'hybridation des bâtiments (espaces multi-usages) est augmentée :
 - La réversibilité des constructions nouvelles (par exemple la possibilité de convertir des bureaux en logements),
 - La mutualisation d'espaces pour certains usages et publics,
 - La cohabitation intergénérationnelle se développe dans certaines franges de la population (exemple de la loi Elan 2018).
- La structure de l'activité est transformée, dans ce scénario engendrant une nouvelle répartition de l'emploi sur le territoire. Ainsi, les villes petites et moyennes se développent, tout en se densifiant pour limiter l'artificialisation.
- La réutilisation du bâti existant et le recyclage de friches sont privilégiés.
- L'utilisation de solutions low-tech ou basées sur la nature, avec un faible impact sur l'environnement est développée.

L'objectif « Zéro Artificialisation Nette » est atteint en ayant peu recours à la désartificialisation. Des travaux de renaturation naturelle accompagnée sont mis en place à petite échelle, avec une intervention humaine réduite.

Réduction de l'artificialisation

Les superficies de friches industrielles et urbaines à recycler (activités de déconstruction, de dépollution, traitement, reconstruction des sols, etc.) ont été évaluées dans les deux scénarios.

- La trajectoire d'artificialisation modélisée respecte les objectifs nationaux de réduction du rythme d'artificialisation⁴¹ ;
- La superficie de friches recyclées chaque année est estimée à partir de cette trajectoire et du taux de renouvellement urbain⁴² ;
- La proportion de renouvellement urbain par recyclage des friches sur 2020-2050 est dimensionnée afin de rester compatible avec le volume de friches disponibles⁴³.



La différence entre les deux scénarios résulte de l'écart sur le besoin projeté en constructions neuves : il est plus important dans le scénario Pro-Techno et l'artificialisation de nouvelles surfaces restant limitée, davantage de friches sont recyclées.

A l'heure actuelle la conversion de friches industrielles est très peu développée.

Dans le scénario Pro-Techno, environ 95% des friches industrielles actuellement recensées sont recyclées à horizon 2050 (~ 110 kha entre 2020 et 2050). Le montant de dépenses associées a été estimé à 106Md€ sur la période, soit 3,5Md€/an.

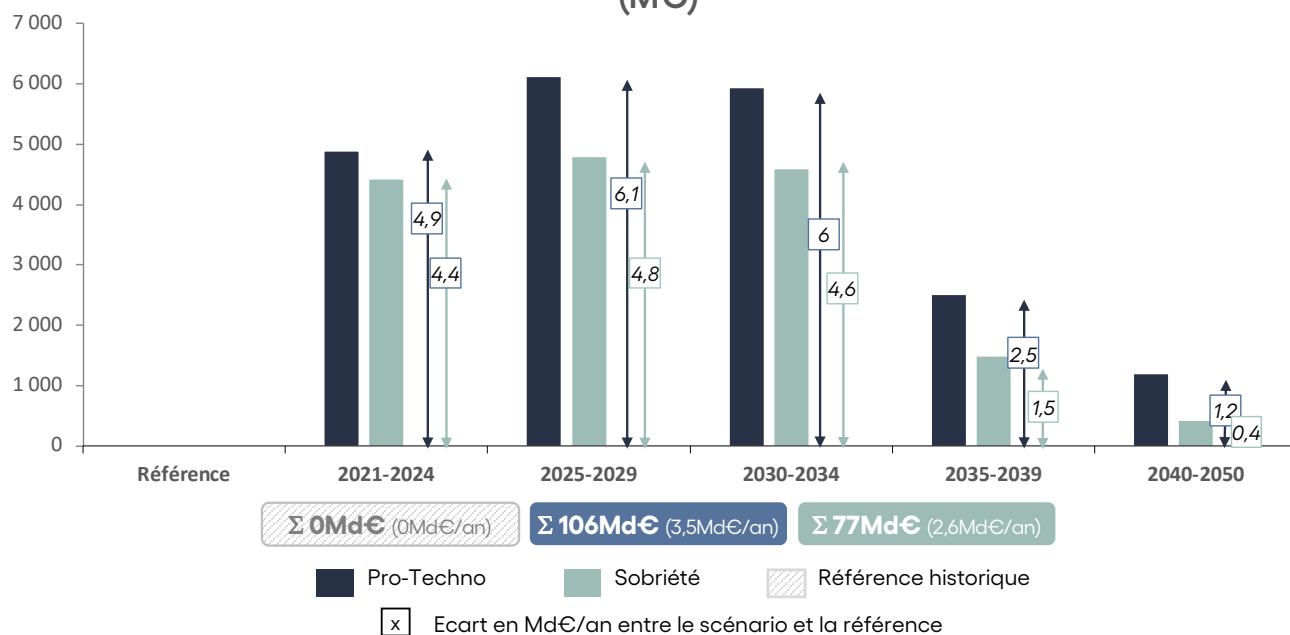
Dans le scénario Sobriété, environ 70% des friches industrielles actuellement recensées sont recyclées à horizon 2050 (~ 80 kha entre 2020 et 2050). Le montant de dépenses associées a été estimé à 77Md€ sur la période, soit 2,6Md€/an.

⁴¹ Loi Climat et Résilience (2021)

⁴² Le renouvellement urbain désigne le fait de reconstruire la ville sur elle-même, à partir du recyclage de ses ressources bâties et foncières. Il peut s'agir donc principalement de la réutilisation directe de bâtiments existants ou du recyclage de friches (déconstruction, dépollution, etc.).

⁴³ La superficie de friches industrielles existante est estimée entre 90 et 150 kha par l'observatoire de l'artificialisation des sols (2020). Les surfaces occupées par l'ensemble des friches urbaines ne sont pas connues

Investissement dans le recyclage des friches (M€)



Réduction de l'impact des sols artificialisés

Nous traitons ici des activités de désimperméabilisation des sols hors travaux de désartificialisation.

La désimperméabilisation des sols urbains couvre deux types d'actions :

- La végétalisation urbaine qui fait partie de l'axe "renaturation des milieux".
- La mise en place de « solutions technologiques » de désimperméabilisation : retrait des revêtements scellés, mise en place de revêtements "techniques" drainants, perméables ou semi-perméables (revêtements bois, pavés à joints engazonnés, bétons drainants, nappes alvéolées, résines drainantes, stabilizers, etc.).

Le développement de revêtements alternatifs est récent et les exemples de travaux réalisés sont relativement rares. Peu d'études se sont penchées sur les usages de ces revêtements à l'échelle des villes ou des territoires, au-delà du périmètre très local d'un projet individuel⁴⁴.

Sans étude dédiée, il est trop peu robuste d'estimer le déploiement potentiel de ces technologies.

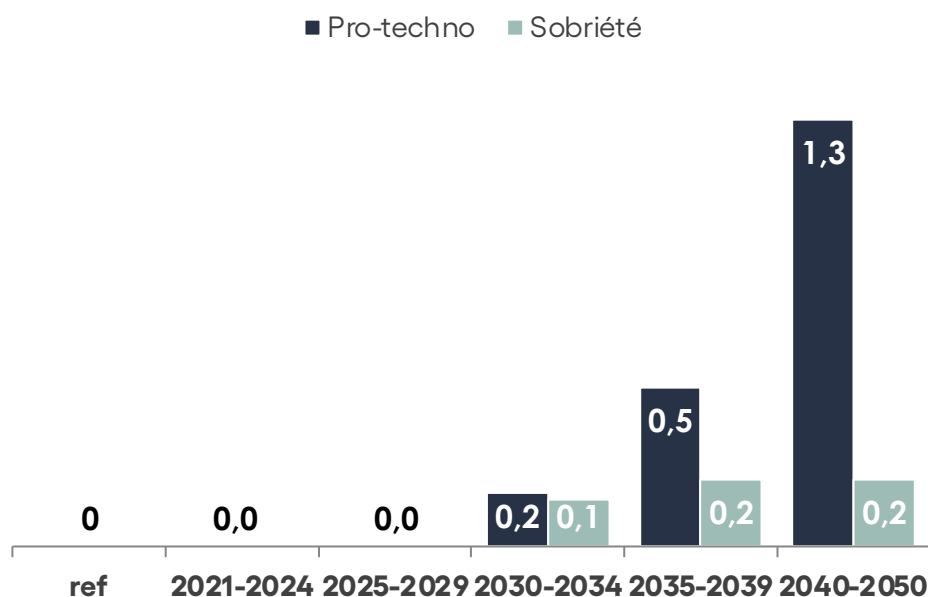
Il est toutefois vraisemblable qu'une partie des travaux de désimperméabilisation effectués dans les villes feraient appel à des changements de revêtements, en particulier dans le cas du scénario Pro-techno. Dans le scénario Sobriété, ce levier « technologique » de la désimperméabilisation serait moins actionné.

⁴⁴ Guide technique du SDAGE Bassin Rhône-Méditerranée, « Vers la ville perméable – comment désimperméabiliser les sols », 2017

Désartificialisation

Dans chacun des scénarios nous avons quantifié les superficies de sols actuellement artificialisées qui doivent faire l'objet d'une désartificialisation afin d'atteindre l'objectif de Zéro Artificialisation Nette pour 2050, en prenant en compte l'évolution des surfaces artificialisées.

Surface moyenne à désartificialiser par an (kha)

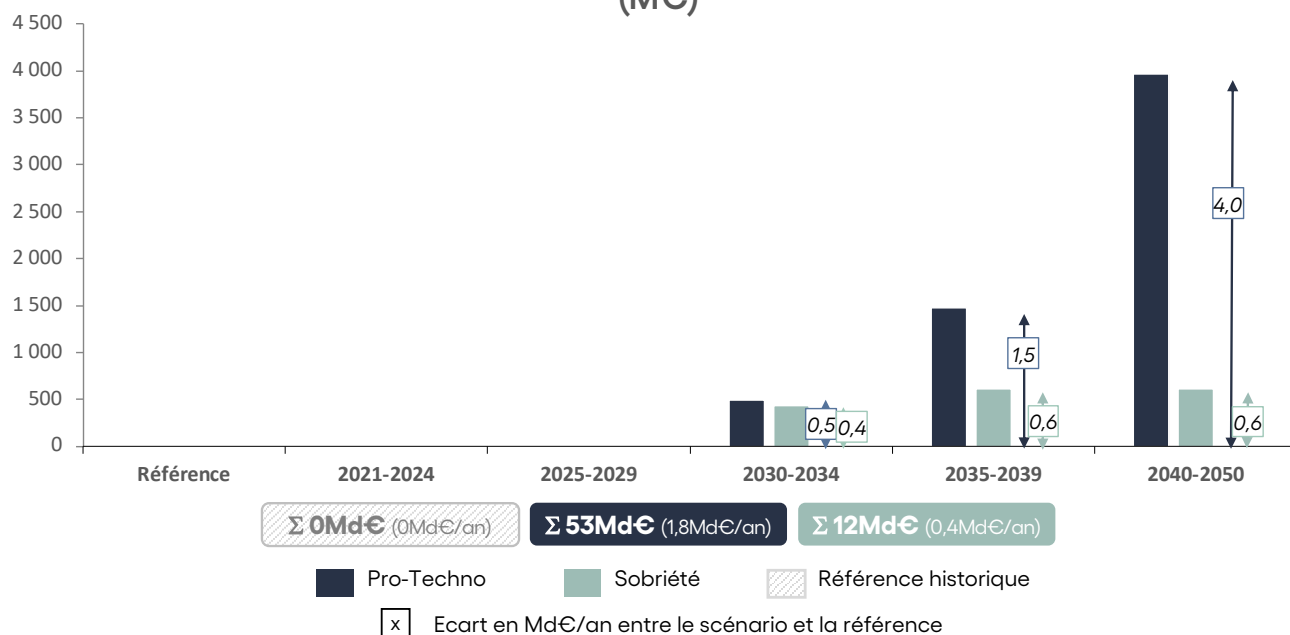


Dans les deux scénarios, les travaux de désartificialisation deviennent significatifs à partir de 2030, avec un total de 17 kha⁴⁵ à désartificialiser dans le scénario Pro-techno et 4 kha dans le scénario Sobriété sur l'ensemble de la période 2030-2050. Cela correspondrait respectivement à 53Md€ et 12Md€ de dépenses.

Les travaux de désartificialisation sont plus importants dans le scénario Pro-Techno que dans le scénario Sobriété, en phase avec leurs taux respectifs d'artificialisation brute qui impactent le besoin en désartificialisation pour respecter l'objectif ZEN 2050.

⁴⁵ Un ratio de compensation de 2:1 est appliqué afin de s'approcher d'un impact fonctionnel nul sur l'écosystème (la désartificialisation d'1 ha de terres artificialisées ne compense pas les pertes occasionnées par l'artificialisation d'1 ha d'espaces naturels / agricoles / forestiers, et il faut donc désartificialiser des surfaces plus étendues que celles que l'on artificialise en parallèle)

Investissement dans la désartificialisation (M€)



Contribuer à la renaturation des milieux

Les écosystèmes fonctionnels offrent un habitat pour la biodiversité et séquestrent du carbone dans la biomasse des espèces végétales, dans les sols et les dépôts de résidus organiques.

La renaturation consiste à restaurer les fonctions écosystémiques de milieux naturels et à introduire (ou réintroduire) des éléments naturels au sein de milieux, que ceux-ci soient naturels ou artificiels. Cette renaturation prend différentes formes selon les espaces concernés :

- Renaturation des villes
- Restauration de cours d'eau
- Reforestation / afforestation en milieux forestiers et agricoles (haies)
- Recréation et restauration de prairies, zones humides, et autres écosystèmes naturels ouverts

Typologie des travaux de renaturation selon les milieux

Milieu	Villes	Cours d'eau	Forêts et milieux agricoles	Prairies et zones humides (autres milieux)
Exemples de travaux	<ul style="list-style-type: none"> Trame Verte Urbaine Réalisation de forêts et parcs urbains Végétalisation des rues, plantation d'arbres, installation de végétation basse Création de rues-jardins Gestion des îlots de chaleur urbains 	<ul style="list-style-type: none"> Restauration morphologique, reméandrage Suppression ou aménagement des seuils et barrages Diversification des habitats aquatiques Reconnexion d'annexes hydrauliques Ripisylve 	<ul style="list-style-type: none"> Afforestation Reforestation Gestion forestière Agroforesterie, plantation d'arbres et de haies sur des surfaces agricoles 	<ul style="list-style-type: none"> Régénération de prairies et autres écosystèmes ouverts Régénération et création de zones humides (marais, tourbières, etc.) Autres interventions
Bénéfices majeurs	<ul style="list-style-type: none"> Séquestration C Biodiversité Climat local Gestion de l'eau Qualité de l'air 	<ul style="list-style-type: none"> Biodiversité Qualité de l'eau Régulation du niveau d'eau 	<ul style="list-style-type: none"> Séquestration C Biodiversité Production 	<ul style="list-style-type: none"> Séquestration C Biodiversité

Les bénéfices de ces actions de renaturation sont multiples.

- L'ensemble de ces mesures contribue à préserver et favoriser la biodiversité locale, en limitant l'impact de l'homme sur les écosystèmes et en restaurant leur bon fonctionnement.
- La végétation, et en particulier les forêts, permettent en outre de capturer et séquestrer le CO₂, participant ainsi à lutter contre le réchauffement climatique.
- La végétalisation des villes apporte un grand nombre de bénéfices supplémentaires pour les populations : une diminution locale de la température (réduction du phénomène d'îlot de chaleur urbain), une amélioration de la qualité de l'air, une meilleure infiltration des eaux (moins de ruissellement), une atténuation des nuisances sonores, et d'autres services de portée sociale ou économique.
- Le bon fonctionnement des cours d'eau a aussi été perturbé par diverses perturbations d'origine anthropique : digues, seuils, enrochement des berges, coupures de méandres... Leur restauration permet de favoriser la biodiversité aquatique, d'améliorer leurs capacités d'autoépuration et la qualité des eaux, de réguler l'érosion et l'occurrence des crues et étiages, d'augmenter la résilience des écosystèmes face aux aléas, ou encore de diminuer les coûts de gestion et d'entretien de ces milieux.

Au-delà de programmes nationaux ou territoriaux de renaturation des milieux, ces travaux peuvent s'inscrire dans le cadre de mesures compensatoires, dont la mise en

place est obligatoire pour les nouvelles constructions en milieu naturel (prescrites des atteintes à la biodiversité). Dans ce cas, il est primordial de s'assurer de l'impact réel de la dite compensation, qui doit permettre un gain écologique net. Cela dépend de la superficie de milieu naturel restaurée, mais aussi du type de milieu : jusqu'à présent, seuls 20% des projets de compensation sont mis en place sur des terres réellement dégradées⁴⁶ (ex. friches industrielles, terrains épuisés par une agriculture intensive). Les autres mesures, souvent insuffisantes, sont réalisées sur des terres naturelles ou semi-naturelles, et ne consistent qu'à préserver ou à améliorer légèrement l'état écologique du site.

Rappel des Narratifs pour le volet Restauration

La renaturation des milieux naturels, agricoles, et forestiers, prend différentes formes selon les scénarios :

Dans le scénario Pro-Techno, on privilégie une vision productiviste des écosystèmes, associée à des travaux de renaturation de grande ampleur, est privilégiée :

- La végétalisation des villes, où la population est très concentrée, est centrale. Une végétalisation dense et peu consommatrice d'espace, intégrée aux infrastructures urbaines, est privilégiée. Le développement de nouvelles technologies et de nouvelles architectures peut participer à l'intégration de la végétation au sein des villes. Le phénomène d'îlot de chaleur urbain est traité par des interventions complémentaires sur les revêtements des villes (solutions permettant d'augmenter l'albédo, par exemple sur les revêtements de sol).
- Des travaux de renaturation des écosystèmes naturels (cours d'eau, milieux humides, prairies) de grande ampleur sont réalisés. De nouvelles solutions technologiques et des matériaux techniques innovants sont développés (géotextiles biodégradables, etc.).
- La reforestation permet d'augmenter modérément les surfaces forestières et de compenser les pertes liées au changement climatique. Dans les forêts, la croissance de la biomasse est optimisée par la plantation dense d'espèces à croissance rapide et le recours à l'ingénierie forestière. Les forêts et autres milieux productifs sont gérés de manière intensive. Les filières bois permettant de séquestrer du carbone ou d'éviter des émissions sont fortement développées (bois-construction et bois-énergie). Les surfaces agricoles font l'objet de plantation de haies.
- La renaturation est orientée de manière à maximiser les services écosystémiques rendus en fonction des besoins (séquestration du carbone, régulation du climat local, résilience du territoire) et est organisée à large échelle.

⁴⁶ Weissgerber et al., 2019, Biodiversity offsetting: Certainty of the net loss but uncertainty of the net gain

	Renaturer les villes	Restaurer les cours d'eau	Renaturer les prairies, zones humides, et autres milieux naturels	Reforester / afforester en milieux forestiers et agricoles
Activation leviers	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5
Pro-Techno	<ul style="list-style-type: none"> Importance centrale de la végétalisation des villes, où la population est très concentrée Végétalisation dense et compacte, en étroite interaction avec les constructions urbaines Gestion technologique des îlots de chaleur urbains 	<ul style="list-style-type: none"> Restauration des cours d'eau impactés par les activités anthropiques Développement de nouvelles techniques et de matériaux innovants pour la restauration des milieux Travaux de grande ampleur, avec une intervention humaine importante 	<ul style="list-style-type: none"> Restauration des prairies et milieux humides impactés par les activités anthropiques Développement de nouvelles techniques et matériaux innovants pour la restauration des milieux Travaux de grande ampleur, avec une intervention humaine importante Les stratégies de renaturation cherchent à optimiser les services écosystémiques par des techniques précises en fonction des besoins 	<ul style="list-style-type: none"> Volonté de reforestation, mais disponibilité limitée des terres Gestion forestière intensive pour maximiser la croissance des arbres Développement de l'agroforesterie pour certaines cultures
Activation leviers	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5	1 2 3 4 5
Sobriété	<ul style="list-style-type: none"> La végétalisation des villes est étalée sur de plus grandes surfaces, avec la mise en place de grande trames vertes urbaines, de forêts et de parcs urbains Création de points d'eau au sein des villes 	<ul style="list-style-type: none"> Restauration des cours d'eau impactés par les activités anthropiques Travaux restreints favorisant les solutions de restauration peu interventionnistes et un retour des milieux à l'état naturel 	<ul style="list-style-type: none"> Recréation de milieux humides, prairies, et autres écosystèmes ouverts sur les surfaces disponibles Restauration des prairies et milieux humides impactés par les activités anthropiques Travaux restreints favorisant les solutions de restauration peu interventionnistes et un retour des milieux à l'état naturel Règlementation ambitieuse sur la protection des milieux naturels, avec de vastes espaces sanctuarisés 	<ul style="list-style-type: none"> Plans de reforestation avec mise à disposition de terres Gestion forestière extensive Règlementation ambitieuse sur la protection des forêts, avec de vastes espaces sanctuarisés Généralisation de l'agroforesterie avec le développement de l'agro-écologie
			1 2 3 4 5	Intensité d'activation des leviers

Dans le scénario Sobriété, on privilégie une vision conservationniste des écosystèmes, orientée vers une restauration de leur bon fonctionnement, est privilégiée :

- Des plans de reforestation et de régénération de milieux naturels sont mis en place.
- Une politique de préservation des espaces naturels et une demande modérée dans la filière bois entraînent une faible exploitation des ressources forestières.
- La densité de population augmente dans les moyennes et petites villes (ainsi que dans les gros bourgs), par suite d'une redistribution de la population sur l'ensemble du territoire, au sein de villes de petites et moyennes tailles. La végétalisation des très grandes villes, moins denses, peut s'étendre sur de plus grandes surfaces.
- La renaturation des écosystèmes naturels (cours d'eau, milieux humides, prairies) vise avant tout à rétablir leur bon fonctionnement. Les travaux de restauration privilégient les solutions de renaturation proches de l'état naturel des écosystèmes, nécessitant des travaux et un entretien restreint.

Ces différences sont principalement qualitatives. Une présentation plus détaillée des scénarios et des travaux correspondants est disponible en annexe.

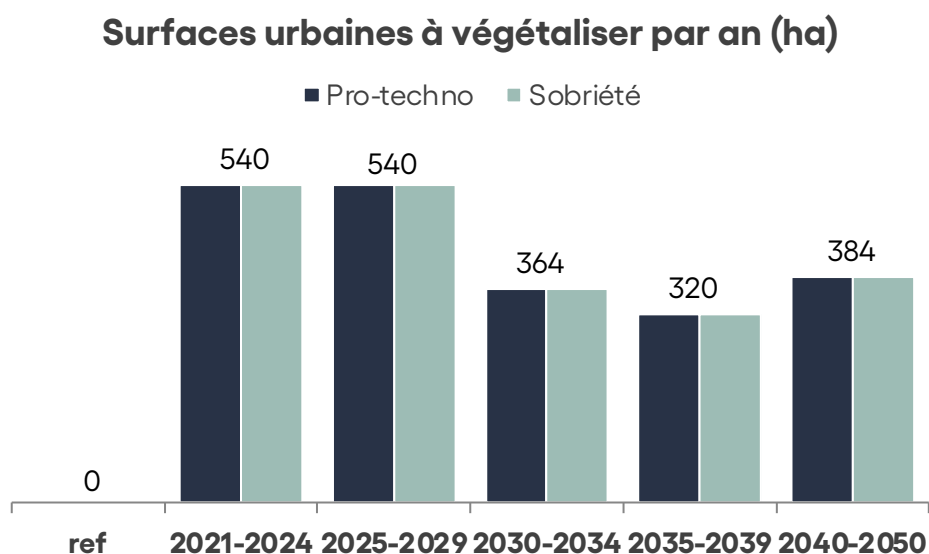
Besoins en investissements, objectifs et méthodologie de chiffrage

Le chiffrage des investissements pour la renaturation des milieux se base sur plusieurs objectifs et hypothèses, spécifiques à chacun des 4 axes présentés : renaturation des villes, restauration des cours d'eau, reforestation en milieux forestier et agricole, restauration des autres écosystèmes ouverts. Des fiches détaillées explicitant les méthodologies utilisées sont disponibles en annexe.

Dans son ensemble, l'axe « renaturation des milieux » représente un total de 91Md€ entre 2020 et 2050 dans les deux scénarios.

Renaturation des villes

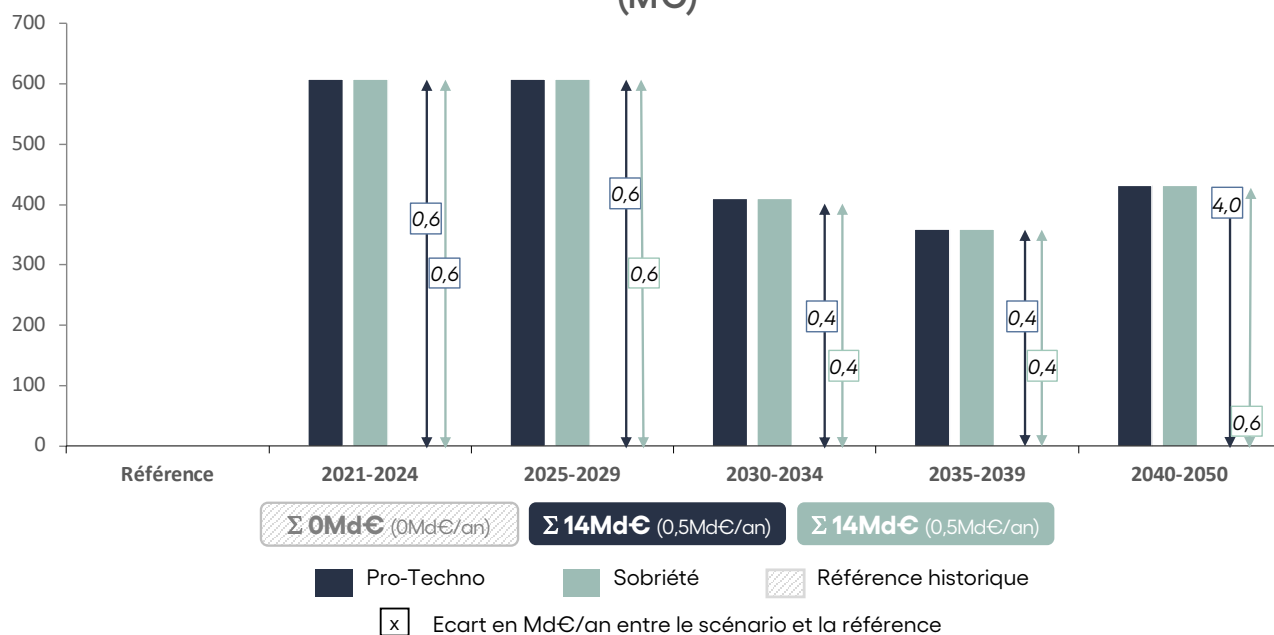
La renaturation des villes consiste en la réalisation de trames vertes urbaines, de forêts et parcs urbains, d'infrastructures vertes, en la plantation d'arbres et installations de linéaires, la végétalisation des murs et toitures, et la mise en place de techniques complémentaires permettant de réduire les effets d'îlots de chaleur urbains.



La superficie urbaine totale à végétaliser sur l'ensemble des grandes villes françaises est estimée⁴⁷ similaire dans les deux scénarios : 12,5kha entre 2020 et 2050, à raison 540 ha/an d'ici à 2030 puis autour de 370ha/an entre 2030 et 2050. Ceci correspond à des dépenses d'environ 14Md€ sur la période 2021-2050 (traduction monétaire des investissements). Les différences entre les deux scénarios sont principalement qualitatives (liées à la nature des travaux, aux solutions retenues plutôt qu'à la surface considérée), et non quantifiées ici.

⁴⁷ Les activités de végétalisation urbaine sont estimées à partir des objectifs de végétalisation officiels de plusieurs grandes villes françaises

Investissement dans la végétalisation des villes (M€)

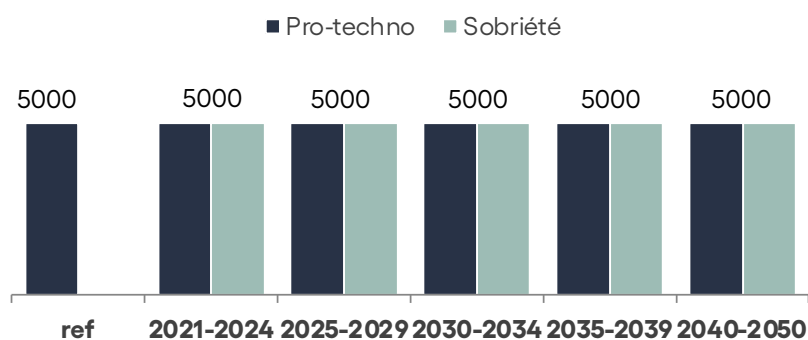


Nota : Le déploiement des solutions, en dehors de la végétalisation, n'a pas été projeté compte tenu des données disponibles et de la maturité du sujet : le développement de ces technologies est récent et très restreint ; leur potentiel de déploiement à large échelle n'a pas été évalué. De manière générale, les solutions fondées sur la nature sont a priori à privilégier. Par rapport aux solutions technologiques, elles sont souvent plus efficaces et présentent de nombreux co-bénéfices, notamment pour la biodiversité, la gestion des eaux pluviales, la séquestration du carbone ou encore la qualité du cadre de vie⁴⁸.

Restauration des cours d'eau

La restauration des cours d'eau consiste en la suppression de constructions existantes, débétonisation, modifications morphologiques et reméandrage des cours d'eau, restaurations structurelles et fonctionnelles, création de ripisylves, etc.

Longueur de cours d'eau restaurée par an (km)



⁴⁸ ADEME, « Rafraîchir les villes, des solutions variées », 2021

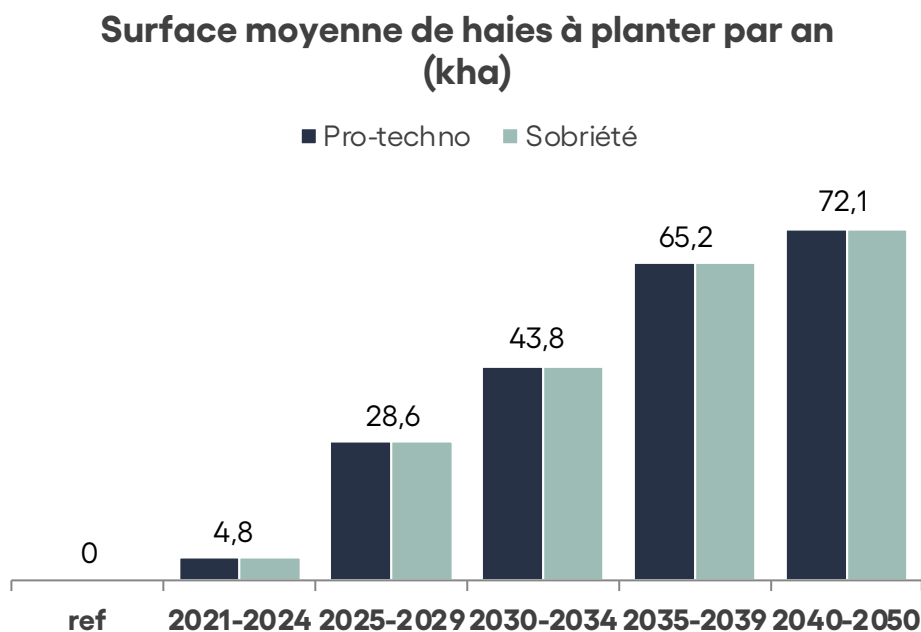
En 2020, environ 55% des 430 000 km de cours d'eau métropolitains sont évalués comme étant en mauvais état, soit 237 000 km au total⁴⁹.

Dans les deux scénarios, un total de 150 000 km de cours d'eau sont restaurés entre 2020 et 2050, sur un rythme constant de 5 000 km/an, en cohérence avec l'objectif national de restauration de la continuité aquatique (50 000 km de cours d'eau à horizon 2030)⁵⁰, qui a été extrapolé à horizon 2050. Ce montant est estimé à 1,9Md€ par an soit 57Md€ cumulés sur la période, et correspond à une prolongation des dépenses de l'année de référence.

NB : Les investissements de développement du transport fluvial présentés dans le volet « réduction » de cette étude incluent des travaux pour la biodiversité. Ces investissements ne concernant que les voies navigables (8500 km⁵¹), le recouvrement avec les travaux quantifiés dans cette section est marginal.

Plantation d'arbres en milieu agricole

Il s'agit ici de l'introduction d'arbres dans des surfaces agricoles, sous forme de haies ou à l'intérieur des parcelles. La trajectoire associée a été évaluée en réponse aux objectifs de la SNBC (l'enjeu carbone associé peut être estimé à -3MtCO₂e/an à l'horizon 2050) et est cohérente avec les actions du plan de relance 2020⁵².



⁴⁹ DataLab du MTE, Eau et milieux aquatiques, les chiffres clés (2020)

⁵⁰ Plan Biodiversité (2018)

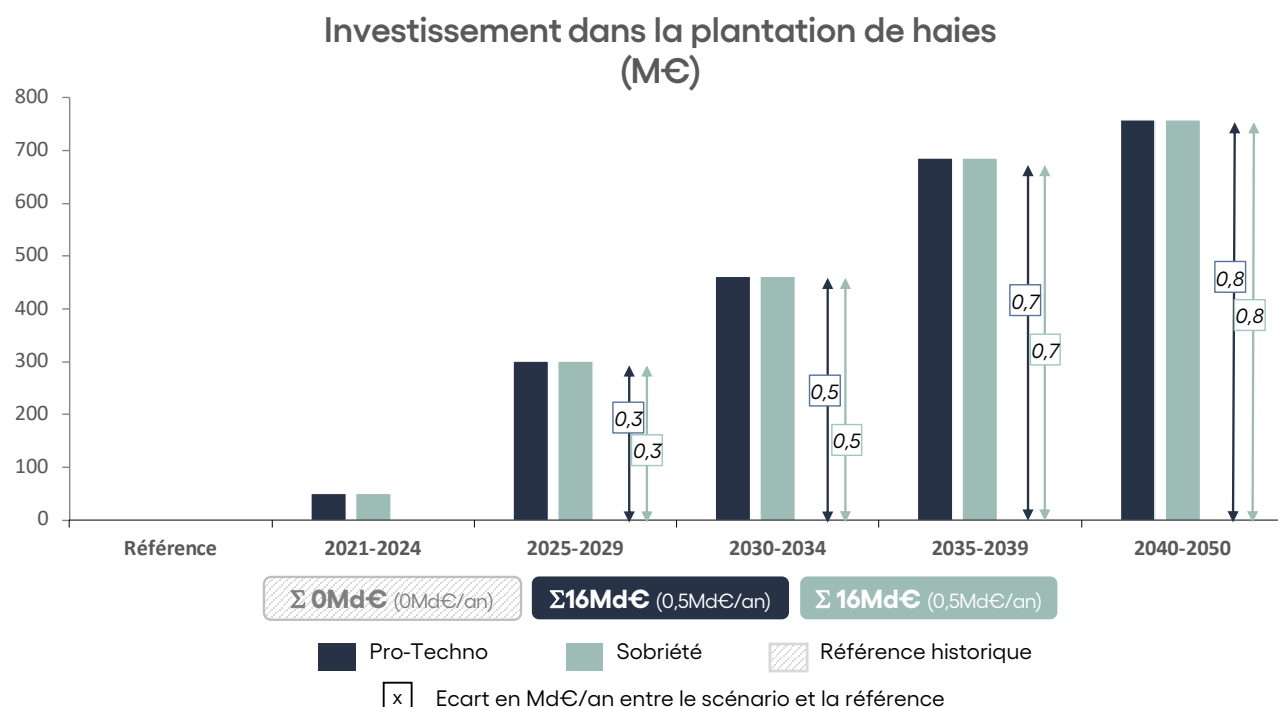
⁵¹ VNF (Voies Navigables de France), 2021

⁵² <https://agriculture.gouv.fr/plan-france-relance-une-feuille-de-route-au-service-de-la-filiere-foret-bois-face-au-defi-du>

Au total, 1,5 Mha de haies serait planté en milieu agricole entre 2020 et 2050 (en considérant une largeur de haie moyenne de 2,5m⁵³), en partant du taux actuel d'extension des surfaces de haies (nul, voire négatif estimé à -8 kha/an sur la période 2012-2014⁵⁴).

L'évolution des régimes alimentaires et des pratiques agricoles associées à nos deux scénarios pourrait conduire à une différenciation des trajectoires, notamment par le développement des pratiques agroécologiques et agroforestières, et leur gestion des haies. Ceci nécessiterait des approfondissements complémentaires.

Ces travaux représenteraient 16Md€ sur la période soit 0,52Md€ par an en moyenne (traduction monétaire des investissements).

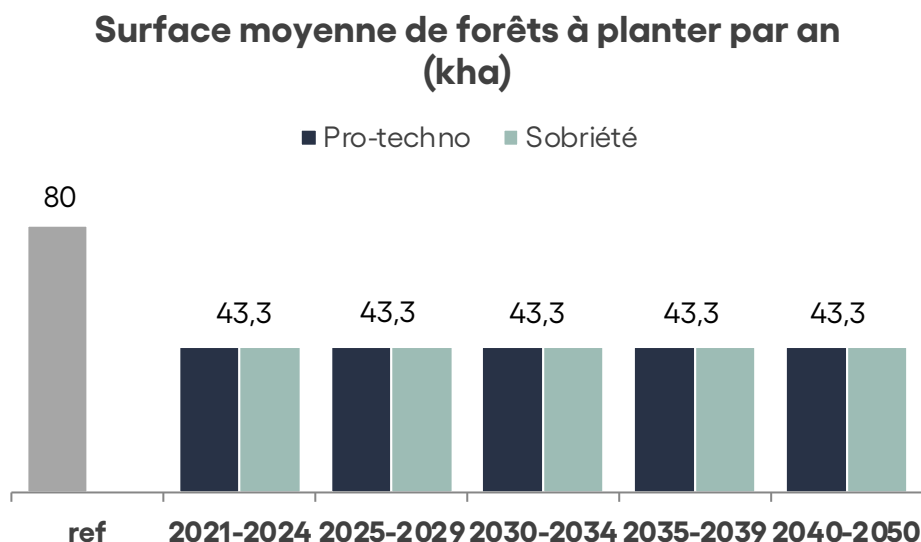


⁵³ AFAC (association française arbres champêtres et Agroforesteries)

⁵⁴ Enquête Terruti-Lucas du service statistique du ministère de l'Agriculture, sur la période 2012-2014

Plantation d'arbres en milieu forestier

Nous avons évalué la superficie de forêts à planter ou replanter afin de contribuer à l'accroissement des puits de carbone visé par la SNBC (enjeu de -12MtCO₂e/an en 2050) et compenser les impacts du changement climatique sur la forêt.



Un total de 1,3 Mha de plantation d'arbres en milieu forestier entre 2020 et 2050 permet de répondre aux objectifs de la SNBC (0,8MHa) et de compenser les pertes de forêt liée au changement climatique⁵⁵ (0,5MHa).

Le taux actuel d'accroissement des surfaces forestières est d'environ 80 kha/an (2020)⁵⁶. Comme ces surfaces rassemblent des surfaces forestières de qualité très diverses⁵⁷, nous projetons un rythme de reboisement sur un rythme régulier de 43kHa/an.

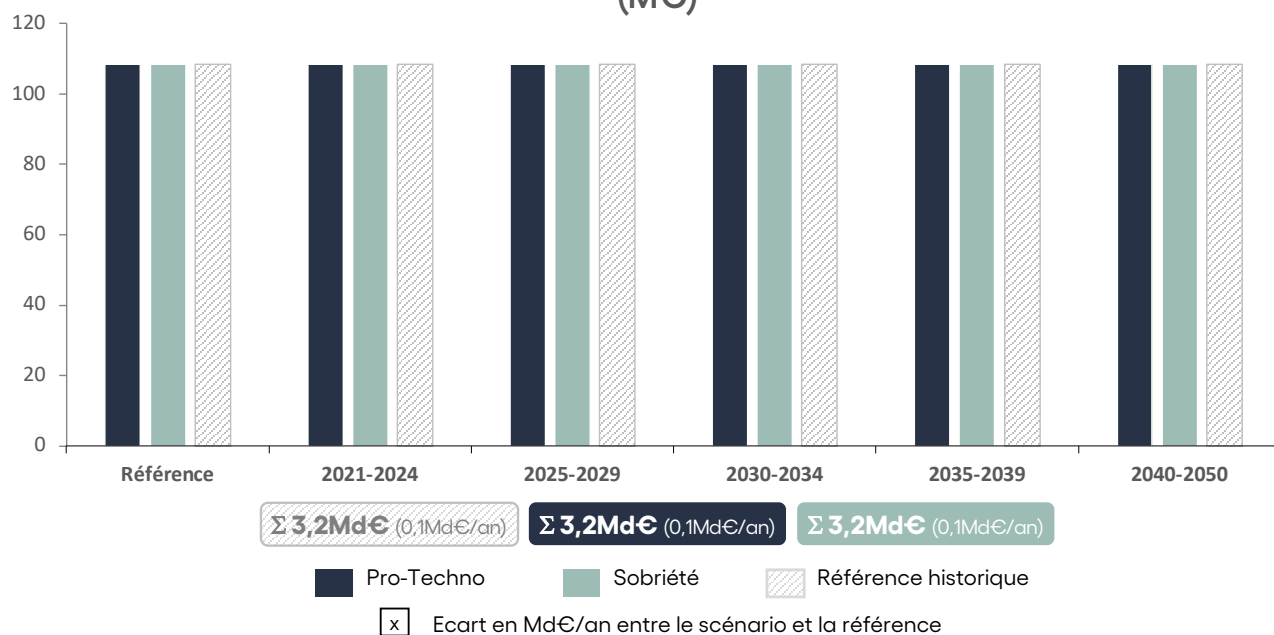
Ces travaux représentent 108M€ par an sur l'ensemble de la période, soit 3,2Md€ cumulés (traduction monétaire des investissements).

⁵⁵ Estimation de l'ONF : <https://www.onf.fr/onf/+//7a2::lonf-prepare-lavenir-des-forets-publiques.html>

⁵⁶ IGN, Inventaire Forestier Memento 2020

⁵⁷ Retour d'entretiens d'experts

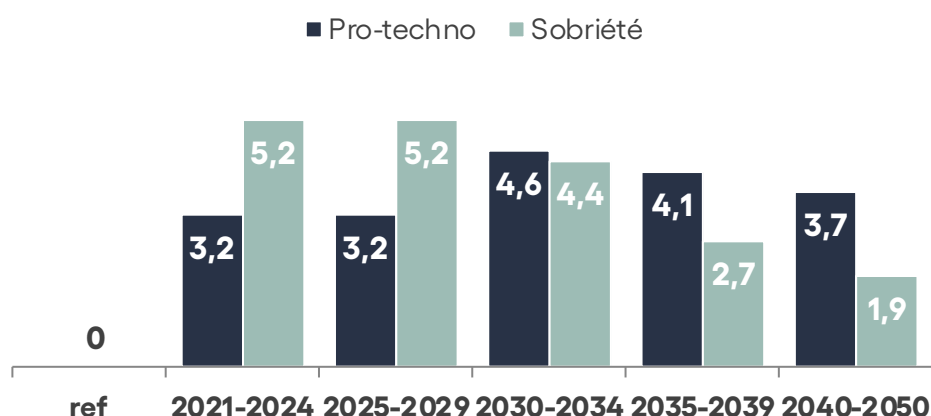
Investissement dans la plantation forestière (M€)



Restauration des autres écosystèmes (prairies, zones humides, autres milieux ouverts)

La superficie des autres milieux (prairies, zones humides, autres milieux ouverts) à restaurer a été évaluée en se limitant aux activités de restauration, résultant des mesures de compensation obligatoires dans le cas d'aménagements affectant des milieux naturels (développement de nouvelles infrastructures).

Surface d'autres milieux à renaturer (kha)



Un minimum de 113 kha de milieux naturels sont restaurés dans le scénario Pro-Techno, et 103 kha dans le scénario Sobriété associés à des natures de projets différentes, en considérant un ratio moyen de compensation de 2⁵⁸.

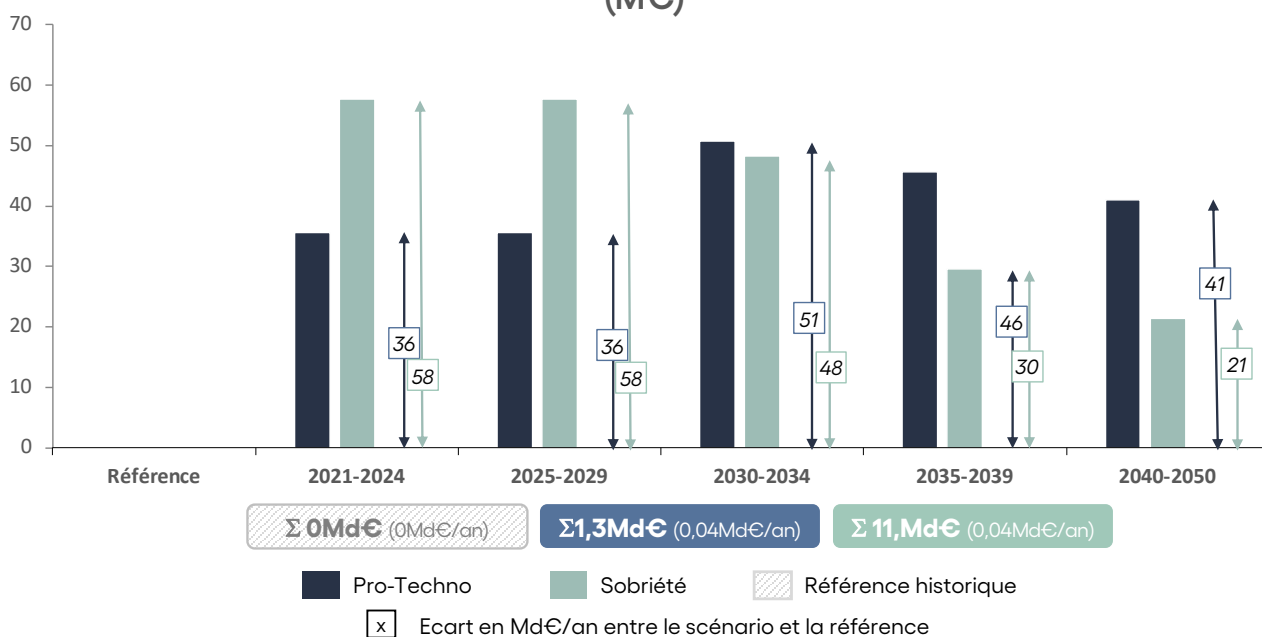
La surface d'implantation des nouveaux ouvrages concernés ici est issue des chiffrages présentés dans le volet « Réduction » de cette étude. En particulier :

- L'extension du réseau ferroviaire
- L'extension du réseau de pistes cyclables (pas d'extension du réseau routier dans nos scénarios)
- Le développement du parc éolien terrestre^{59,60}

Le taux actuel de renaturation de ces milieux n'est pas connu.

Surfaces à renaturer 2021-2050 (kha)	Pro-Techno	Sobriété
Extension réseau ferroviaire	65,3	34,3
Pistes cyclables	25,5	48,9
Production éolienne	22,5	20,2
Total	113,3	103,5

Investissement dans la restauration des autres milieux (M€)



⁵⁸ Les impacts environnementaux occasionnés ne pouvant généralement pas être compensés à surface égale, un ratio de compensation est déterminé, spécifique à chaque projet. Il varie généralement entre 1/1 et 10/1 (10 ha à renaturer pour 1 ha consommé). On considère ici un ratio de compensation moyen égal à 2/1

⁵⁹ Les éléments disponibles sur les installations photovoltaïques au sol ne nous ont pas conduit à les intégrer

⁶⁰ Hypothèse d'une artificialisation de 0,5Ha par éolienne, intégrant les dessertes

Les infrastructures linéaires et les trames vertes et bleues

Les infrastructures linéaires de transport – route, autoroute, voie ferrée, canal, rivière aménagée, gazoduc, ligne électrique – occupent une grande partie du territoire (en 2012, l'ensemble du réseau routier représentait ainsi 1 230 kha⁶¹, soit la superficie de l'Île-de-France).

Ces infrastructures - pour la plupart construites à des époques où la réglementation environnementale était beaucoup moins stricte - sont responsables de diverses nuisances écologiques : pollution des sols et des eaux par ruissellement sur les routes, fragmentation des habitats naturels, perturbation des espèces vivantes et des écosystèmes, etc.

La modernisation de ces infrastructures concerne principalement deux problématiques nécessitant une part significative de travaux publics :

- **La protection de la ressource en eau.** En plus de perturber quantitativement le cycle de l'eau, les surfaces imperméabilisées des routes peuvent être responsables de la pollution des sols et des points d'eau alentour. En cas de pluie, les eaux de ruissellement se chargent en polluants qui risquent de contaminer l'environnement. Afin de traiter ce problème, des fossés ou bassins de rétention permettent d'éviter le relargage d'eaux polluées dans la nature. Des équipements d'assainissement le long des routes (décanteurs, déshuileurs, etc.) peuvent servir à traiter et dépolluer les eaux avant tout rejet dans l'environnement. Actuellement, la ressource en eau est protégée sur 88% du réseau autoroutier concédé⁶². La proportion du réseau routier national non concédé où elle est protégée n'est pas connue.
- **La transparence écologique.** Les infrastructures de transport, en particulier, constituent une source d'impacts temporaires et permanents non négligeables pour les espèces locales. En plus d'engendrer des perturbations et destructions d'habitats, leur caractère linéaire contribue à fragmenter et cloisonner les espaces naturels, et à réduire les corridors écologiques. Divers aménagements peuvent servir à améliorer la transparence écologique de ces infrastructures. En 2020, le réseau autoroutier concédé comportait ainsi 1804 passages à faune recensés⁶³. Le nombre d'aménagements sur le reste du réseau routier français n'est pas connu.

Il n'est pas possible aujourd'hui de chiffrer avec une robustesse suffisante les besoins en activités et investissements relatifs à ces sujets, et ce pour deux raisons majeures :

1. La connaissance de l'état actuel des infrastructures existantes en termes de bassins de traitement de l'eau et d'aménagements pour la faune est très lacunaire ;

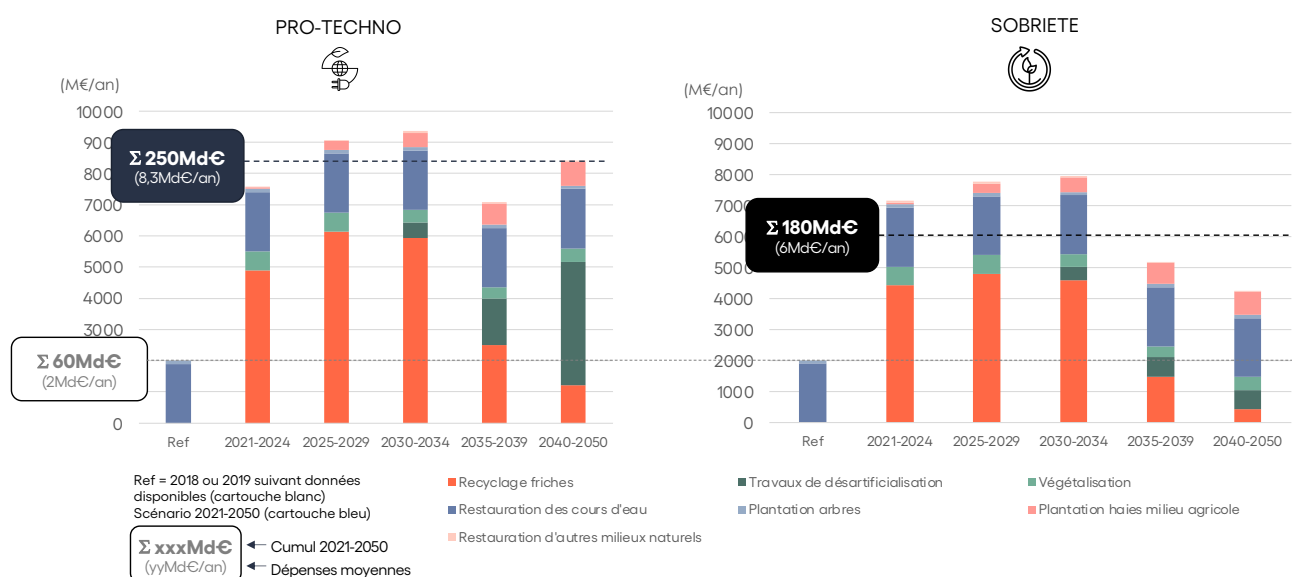
⁶¹ DataLab du service de l'observation et des statistiques (2016), Les infrastructures linéaires de transport : évolutions depuis 25 ans

⁶² ASFA, Chiffres Clés 2021

⁶³ ASFA, Chiffres Clés 2021

- Établir un objectif à l'échelle nationale pour des projets qui sont par nature locaux et qui nécessitent des études écologiques spécifiques, au cas par cas⁶⁴, n'a pas de sens sans une connaissance rassemblée et intégrée (aujourd'hui inexistante) de ces études locales.

Bilan Restauration



Au vu de la diversité du volet et du peu de sources bibliographiques adaptées et robustes pour couvrir ce volet, il a été difficile d'avoir une démarche chiffrée contrastée entre les deux scénarios Pro-Techno et Sobriété pour toutes les activités de renaturation identifiées.

Ce sont donc principalement les objectifs nationaux (objectif Zéro Artificialisation Nette en 2050 de la loi Climat et résilience, objectifs d'augmentation des surfaces de forêts et d'arbres sur les surfaces agricoles issus de la SNBC, objectifs de restauration des cours d'eau du Plan Biodiversité, etc.) qui ont servi de socle aux modélisations des besoins de travaux.



Les activités de Travaux Publics traditionnellement dédiées à des actes de construction et de maintenance des ouvrages et infrastructures peuvent s'enrichir d'actes de réparation (y compris les réalisations de génie écologique constituant la compensation environnementale pour de nouveaux projets d'infrastructure), d'aménagements environnementaux ou de moindre dégradation des espaces naturels et écosystèmes, et de renaturation d'autres milieux (comme la végétalisation des villes, et la restauration des cours d'eau).

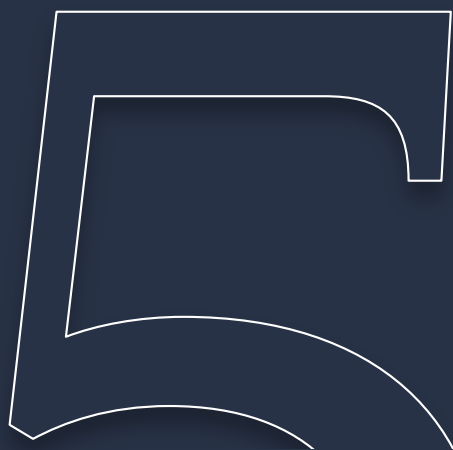
⁶⁴ L'étude par un écologue des impacts d'une route sur la faune locale, par exemple

Pour les actions qui ont pu être chiffrées sur ce périmètre, les dépenses annuelles moyennes sur 2021-2050 sont estimées à **2,4Md/an** dans les deux scénarios.

Pour répondre à l'objectif de Zéro Artificialisation nette, les travaux de réduction de l'artificialisation par le recyclage de friches, de réduction de l'impact des sols artificialisés, et de désartificialisation s'élèveraient en moyenne sur 2021-2050 à **5,3Md€/an** pour Pro-Techno et **3Md€/an** pour Sobriété du fait d'une moindre artificialisation.

Le montant de carbone séquestré par la plantation d'arbres en milieu agricole et forestier est estimé à 15tCO₂eq/an en 2050. Les dépenses associées à la plantation de haie et à la reforestation ont été estimées à 635M€/an dans les deux scénarios.

	 Pro-Techno	 Sobriété
Rappel des narratifs	Miser sur des innovations technologiques qui alimentent la croissance du PIB et de la consommation tout en diminuant significativement les impacts environnementaux	Miser sur des évolutions sociales et sociétales , accompagnées d'une diminution pilotée de la consommation
Artificialisation	Plus grande quantité de friches à recycler et de travaux de désartificialisation car plus grande quantité de constructions nouvelles.	Intensification de l'usage des surfaces construites, peu d'artificialisation brute, donc peu de besoin de désartificialiser.
Renaturation des milieux	Augmentation de la surface de haies à replanter pour permettre la séquestration de 3MtCO ₂ e/an à l'horizon 2050. Augmentation des surfaces à reforester et aforester pour 12 MtCO ₂ e/an séquestrées à l'horizon 2050.	
	Végétalisation des villes à hauteur de 430 ha / an d'ici 2050, pour une surface végétalisée de 22m ² /hab en 2050.	
	Restauration des cours d'eau, à hauteur de 5000 km / an pour restaurer la continuité aquatique.	
	Plus de 100 kha de milieux naturels à restaurer en compensation des nouvelles infrastructures bas-carbone (réseau ferroviaire / pistes cyclables / parc éolien terrestre).	

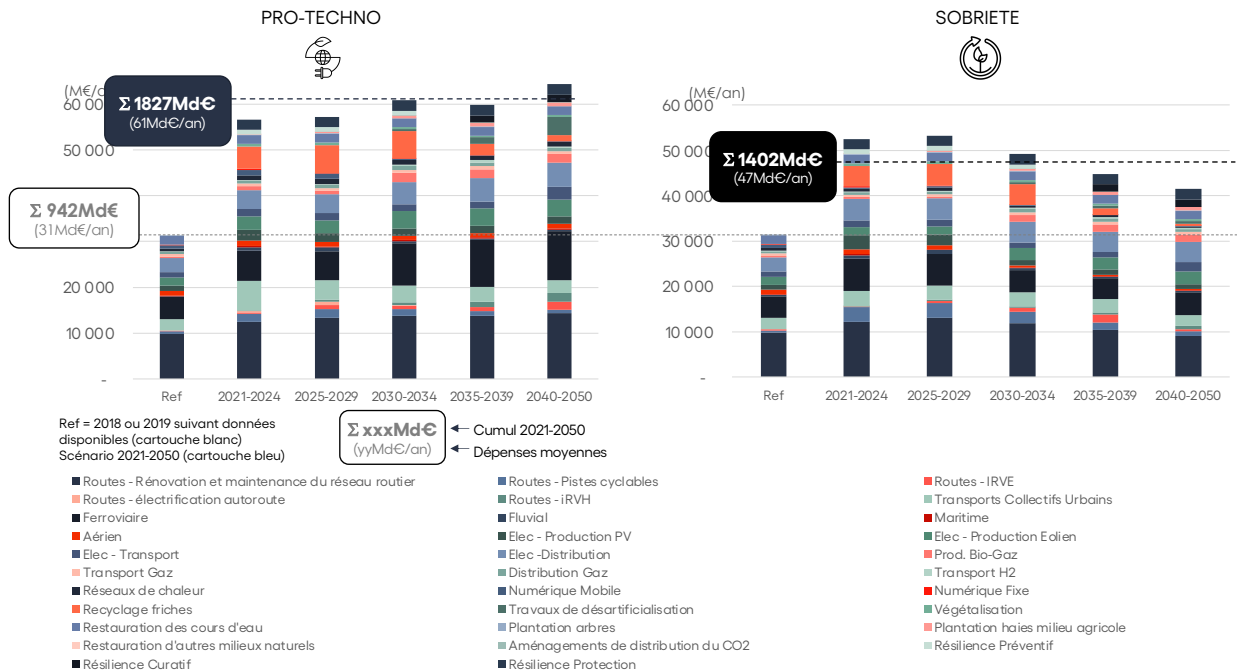


**Récapitulatif des
investissements pour les
infrastructures selon les 3R**

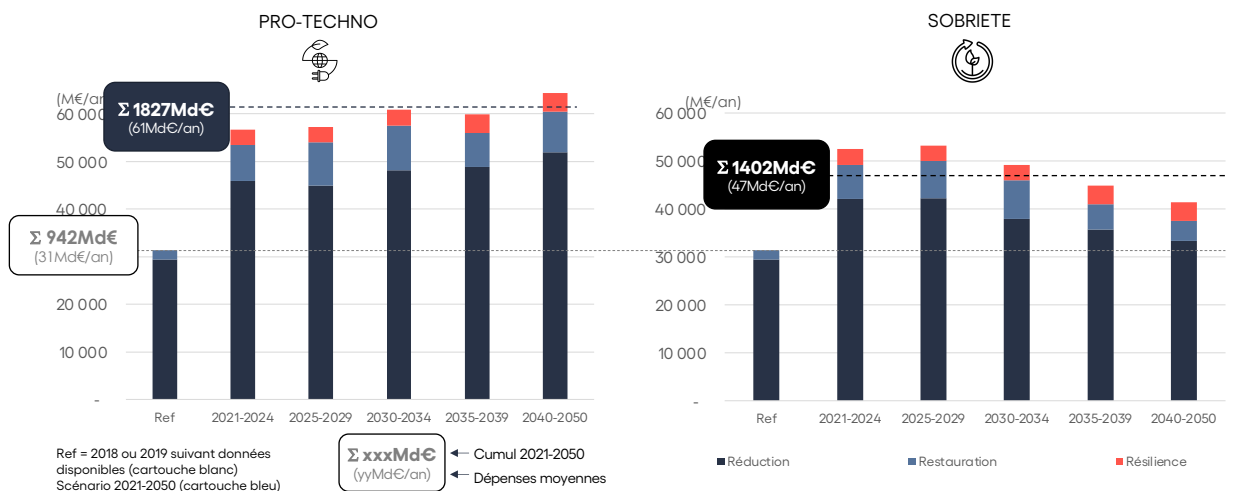


V - Récapitulatif des investissements pour les infrastructures selon les 3R

Dans le graphe ci-dessous, les niveaux d'investissements monétaires présentés sont ventilés par type d'infrastructures :



Et les mêmes investissements sont résumés ci-dessous selon leur contribution à Réduction, à la Restauration, et à la Résilience :





**Synthèse
et conclusions**

VI - Synthèse et conclusions

Une inertie importante pour transformer le parc d'infrastructures français, car ces objets obéissent à des logiques de temps long.

- ✓ Les infrastructures existantes resteront encore longtemps dans le paysage, leur durée de vie se comptant en dizaines d'années. Pour atteindre les objectifs climat de la France et accroître sa résilience au changement climatique, il faut choisir maintenant la vision des services rendus par ces infrastructures, des nouveaux usages auxquels elles doivent répondre et déterminer ainsi le programme de travaux à effectuer pour les adapter et les rendre résilientes. Les premiers effets de ces transformations pourraient être constatés d'ici à 2030.

Les efforts d'investissement sont majoritairement portés par la réduction des émissions.

- ✓ Sans surprise les **efforts et enjeux** sont évidemment à mettre en priorité sur la **réduction des émissions** liées à l'usage des infrastructures.
- ✓ Le choix d'investir différemment dans les infrastructures est à faire maintenant, en cohérence avec un projet de transformation des usages, et pourrait contribuer à **réduire effectivement de 38% les émissions de la France d'ici 2030⁶⁵**, en particulier au travers de la décarbonation de la mobilité, du gaz et de ses usages. La différenciation en termes d'usages et donc de paysage d'infrastructures va s'accroître entre les deux scénarios après 2030.
- ✓ Certains choix de transformation du paysage d'infrastructure doivent être faits maintenant car différenciants (ferroviaire, production électrique, mobilités douces, ...). La SNBC 3 doit être l'occasion d'orienter la stratégie d'évolution des usages en la couplant à un programme d'évolution des infrastructures de la France.
- ✓ Pour que cette réduction d'émissions de GES soit effective, il faudra piloter et accompagner la baisse des usages de certaines **infrastructures** et donc accepter leur contraction⁶⁶ (aéroports, réseaux de gaz, ...).
- ✓ Les deux scénarios envisagés sont compatibles avec la baisse d'émission visée par la SNBC ; **Sobriété** a l'avantage d'être en capacité de **mieux absorber** que Pro-Techno des **contraintes et tensions probables** sur **les flux physiques** et **l'accès à certaines matières premières**. Il nécessite en revanche des **évolutions fortes des comportements et organisations** qui requièrent des actions dédiées pour accompagner ces transformations et assurer leur **acceptabilité sociale**. **Pro-Techno**, repose au contraire sur des **paris technologiques** et une **poursuite de la croissance des consommations**. **Dans les deux cas, il est nécessaire** d'envisager des **ruptures fortes dans les dynamiques existantes** pour les infrastructures. Suivant le type d'infrastructures, les nécessaires dépenses de maintenance d'une part et les investissements pour en décarboner leurs usages d'autre part n'ont pas du tout le même poids. Ainsi **la nécessaire maintenance et remise à niveau du réseau routier fait que la route reste très importante** dans les deux scénarios en termes de dépenses, notamment par rapport à l'ensemble des investissements sur le volet mobilité.

⁶⁵ "Synthèse scénario de référence SNBC-PPE" émissions territoriales 2030 de 270MtCO₂e/an contre 436MtCO₂e/an en 2019

⁶⁶ D'un moindre recours à l'infrastructure jusqu'à la réduction de l'infrastructure

- ✓ Pour autant, sur un certain nombre d'infrastructures (comme les réseaux électriques, les réseaux ferroviaires, ou le réseau routier), il faut penser les transformations en intégrant les enjeux liés à leur résilience et à leur contribution à la renaturation.
- ✓ Pour préparer le parc actuel aux aléas physiques du changement climatique, il ne suffira pas de le maintenir et de le rénover. Des investissements préventifs ciblés et exigeants sont nécessaires dès maintenant. Ce sont des travaux importants qui doivent être réalisés en parallèle de ceux permettant de décarboner l'usage des infrastructures.
- ✓ Les programmes d'investissement dans les infrastructures pour la transition bas-carbone doivent se construire dans une approche systémique et intersectorielle permettant d'assurer la cohérence entre les évolutions d'infrastructures et d'usages mais aussi entre les infrastructures (par exemple : infrastructures énergétiques, numérique et mobilités).

Les efforts sur la réduction des émissions ne doivent pas effacer la **préparation à un climat qui change**, et la nécessité de travaux de **restauration des milieux et écosystèmes**.

- ✓ Le coût des investissements préventifs permettant l'adaptation des territoires via leurs infrastructures, ou le coût des dépenses curatives sur les infrastructures (chiffré aussi dans cette étude) sont limités. Ils ne tiennent pas compte des autres conséquences économiques, politiques, financières, sociales et sanitaires, qui n'ont pas été chiffrées dans cette étude mais dont les exemples récents illustrent les impacts potentiels (inondations en Allemagne, ...). Cette **logique assurantielle** encourage donc à limiter les risques liés au dérèglement climatique par la mise en œuvre d'actions préventives.
- ✓ Il existe un lien **indirect mais certain entre la résilience et la restauration**, car les bénéfices de la restauration des services écosystémiques ont des effets d'amortissement de la vulnérabilité au changement climatique des territoires et de leurs infrastructures (augmentation de la stabilité des sols par exemple).
- ✓ Le volet de la **renaturation** met en évidence des enjeux d'importance, mais reconnaissons que c'est encore un **domaine naissant**, avec des problématiques et modes d'action nouveaux, qui ne sont pas tous dans le champ d'action du secteur des Travaux Publics (comme l'ingénierie forestière ou agro écologique).
- ✓ La restauration n'est pas (et ne doit pas être) considérée seulement comme une « compensation » annulant des dégradations des écosystèmes par les activités humaines au sens large. Il faut l'envisager comme une **amélioration de l'état actuel des milieux, dans une perspective d'amélioration de la résilience des milieux naturels**. Dans le cadre des projets qui impactent les écosystèmes, il est important de garder en tête que **le levier principal, prioritaire, et nécessaire, c'est d'éviter ou limiter les dégradations en premier lieu**⁶⁷, car il existe une asymétrie entre dégradation d'un milieu et restauration de celui-ci, du fait des temporalités des phénomènes naturels⁶⁸.

⁶⁷ ERC : 1/ Éviter, 2/ Réduire, 3/ Compenser

⁶⁸ L'idée de « restauration » peut laisser supposer une réparation possible des dégradations, il est crucial de ne pas adopter une approche de « compensation » contre-productive vis-à-vis de l'environnement. Une compensation réelle de nos impacts est souvent illusoire

Investir : oui, mais avec discernement, exigence et cohérence.

- ✓ **Approcher le besoin en investissement dans les infrastructures par les euros a un effet trompeur : entre nos deux scénarios, pour deux montants identiques, la nature des transformations des infrastructures est totalement différente. Ainsi pour investir en cohérence d'un projet de transition bas-carbone et accompagner la décarbonation des usages,** il faut allouer de manière privilégiée des investissements **aux infrastructures par nature décarbonées et décarbonantes** (capacités de production de bio-gaz / pistes cyclables / stations de recharges électriques pour véhicules particuliers / transport marchandise ferré / EnR / ...).
- ✓ Dans les dépenses d'investissement appréhendées dans l'étude, toutes ne sont pas des **investissements induits par la décarbonation. Nous avons** aussi considéré l'ensemble des budgets « Maintenance » qui correspondent à des investissements nécessaires **au parc actuel d'infrastructures**, pour lequel nous avons pris le parti d'assurer la pérennité et la continuité d'usage. Une réflexion plus précise, à partir de scénarios territoriaux d'aménagement du territoire serait à mener, incluant les bénéfices d'une maintenance "bas-carbone".
- ✓ Dans les deux scénarios, un effort d'investissement supérieur au niveau actuel est à consentir pour décarboner la France, associé à des évolutions différentes du paysage d'infrastructure. Dans Pro-Techno, c'est un effort croissant alors que dans Sobriété, c'est un effort plus transitoire (durant la décennie 2020 avec un pic autour de 2030). La chronique temporelle des investissements liés à chacun des 3 volets dans les deux scénarios est différente : dans Sobriété, cette recherche de modération amène même à une **diminution des investissements** dans les infrastructures à partir de 2030, qui permet à partir de cette date de **réduire notamment l'impact sur la dépense publique, tout en restant supérieur au scénario de référence**⁶⁹.
- ✓ **Les investissements présentés dans les différents volets ne sont pas exclusifs ou substituables les uns aux autres. La priorité ne peut pas être donnée par exemple à des travaux liés à la réduction n'intégrant pas les besoins nécessaires à l'adaptation. Ceci demande une rupture forte des politiques publiques et des comportements.** La cohérence globale de ces politiques est nécessaire pour produire les résultats visés.

Cette transition s'accompagnera de profonds changements dans les usages et les comportements : les investissements sont à envisager au sein d'un projet de société (intégrant les dimensions usages, comportements et infrastructures).

- ✓ Les infrastructures doivent se transformer en cohérence avec l'évolution des modes de vie, des usages et des comportements, dont il ne faut pas sous-estimer l'importance. En effet, la seule transformation des infrastructures, bien que nécessaire, ne suffira pas sans les autres transformations systémiques, pour réaliser la transition bas-carbone et respecter les objectifs de la SNBC.
- ✓ Les transformations des infrastructures associées aux deux scénarios vont impacter de manière importante les différentes activités du secteur des Travaux Publics et ouvrent la question des **transformations associées des métiers des Travaux Publics (par exemple au travers du volet Restauration)** : c'est un nouveau

⁶⁹ Des recettes complémentaires ou externalités positives sont aussi associés à ces investissements

terrain de jeu à explorer pour de **nouvelles activités** qui ont des **co-bénéfices plus larges que le carbone** (même s'ils sont encore difficilement quantifiables aujourd'hui), sur la **biodiversité ou le cycle de l'eau par exemple**.

- ✓ Suivant le scénario retenu, les changements diffèrent, soulignant la nécessité d'un projet global explicite et cohérent combinant infrastructures & usages, accompagné par les politiques publiques ad hoc.

Cette étude nous conduit à formuler **quatre recommandations** aux **pouvoirs publics** et aux **parties prenantes des infrastructures** :

- ✓ La réalisation de cette transformation des infrastructures face aux enjeux climat implique aussi la transformation des modes d'évaluation et de décision des projets. Le déploiement d'un tel programme d'investissements nécessite de développer un schéma de pensée à déployer à la maille unitaire de l'infrastructure.
 - Conduire cette transformation des infrastructures, c'est passer du global au local, du général au particulier, et décider d'engager une multitude de projets dont les performances climat et écologiques doivent être rigoureusement évaluées, en intégrant leur impact sur les usages.
 - La mise en œuvre de ces évaluations passe par la constitution d'un cadre d'évaluation adapté et permettant de déployer et piloter un projet global (usages et infrastructures) en cohérence avec la SNBC.
 - La réflexion globale sur les 3R (Réduction / Résilience / Restauration) doit ainsi être introduite à la **maille de chaque infrastructure ou objet technique**, car ces considérations globales peuvent masquer des réalités locales très contrastées. Passer du niveau global au niveau local implique de se poser des questions similaires sur chaque projet d'infrastructure, en vérifiant par exemple avec le calcul de l'empreinte carbone globale du projet (sur tout son cycle de vie) qu'il est non seulement capable de récupérer sa dette carbone mais bien de contribuer à l'atteinte des objectifs de la SNBC.
- ✓ Développer un cadre d'évaluation (ex-ante et ex-post) exigeant, opposable et adapté aux enjeux permet d'assurer que les décisions d'investissement sont bien cohérentes avec le chemin de transition bas-carbone retenu (c'est particulièrement important pour les grands projets d'infrastructure à lourde empreinte carbone de construction pour lesquelles le retour sur "dépenses Carbone" doit être robuste et la contribution à la SNBC garantie).
- ✓ Faire à l'occasion de la SNBC3 un vrai travail de fond sur le volet des infrastructures, support de tous les secteurs économiques.
- ✓ Intégrer dans ces évaluations et dans cette révision de la SNBC une approche sur les 3 piliers d'un référentiel carbone exhaustif (émissions induites, émissions évitées, émissions séquestrées) pour mesurer le réel bénéfice des différents travaux de transformation pour répondre à différents usages.



Carbone 4 est le premier cabinet de conseil indépendant spécialisé dans la stratégie bas-carbone et l'adaptation au changement climatique.

En permanence à l'écoute des signaux faibles, nous déployons une vision systémique de la contrainte énergie-climat, et mettons toute notre rigueur et notre créativité en œuvre pour transformer nos clients en leaders du défi climatique.

Contact : contact@carbone4.com