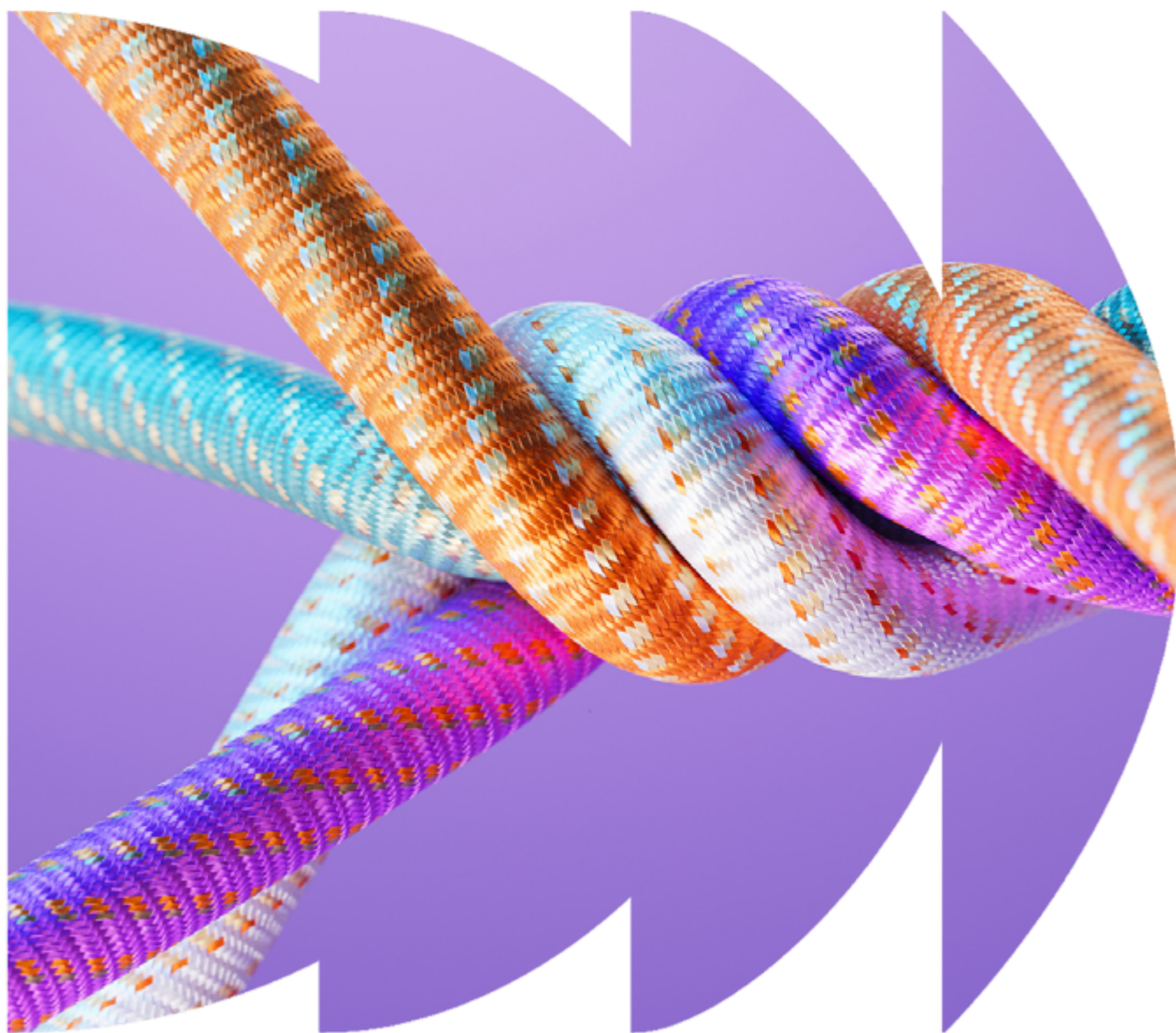


RÉUSSIR LA TRANSITION DANS L'INCERTITUDE : LA MÉTHODE SHIFT EN 20 CHANTIERS

Synthèse - Avril 2026

DANS LE CADRE DE NOTRE
PLAN ROBUSTE POUR L'ÉCONOMIE FRANÇAISE



Résumé exécutif



Proposer un plan pour une décarbonation française robuste aux aléas futurs

Dans un contexte de crises énergétiques et climatiques de plus en plus fréquentes, il est crucial d'intensifier les efforts pour décarboner la France. Le pays reste dépendant à plus de 60 % des énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon) pour sa consommation d'énergie finale, et à plus de 70 % dans son exposition énergétique (incluant l'énergie contenue dans les biens et services qu'elle importe). La planification nationale a un grand rôle

à jouer pour aligner, coordonner et accompagner les acteurs économiques, territoriaux et les ménages. The Shift Project, quatre ans après la publication de son Plan de transformation de l'économie française, souhaite à nouveau contribuer à la réflexion. En se basant sur les flux physiques, et en intégrant pleinement le fait que les prochaines décennies risquent d'être jalonnées de crises et d'imprévus.

Un travail consultatif en deux volets

Pour proposer un plan qui réussirait dans l'incertitude, le Shift Project a développé deux analyses :

1 L'analyse des dynamiques et freins de **20 chantiers incontournables et emblématiques de la décarbonation**. Cette analyse s'est appuyée sur une large revue de littérature et des centaines d'entretiens d'experts et

de professionnels des secteurs étudiés, afin de proposer un ensemble de préconisations pour tenir les bons rythmes de déploiement. Dans le rapport, chaque chantier fait l'objet d'un zoom d'une dizaine de pages.



Dans les transports : déploiement du vélo, extension des transports en commun, généralisation de la voiture électrique sobre, massification du train, décarbonation de l'aérien (SAF et baisse du trafic), relance du fret ferroviaire, déploiement des camions électriques.



Dans le logement : rénovation des habitations, déploiement des pompes à chaleur (PAC).



Dans le numérique : maîtrise du déploiement des centres de données.



Dans l'industrie : production d'acier bas-carbone, production d'hydrogène bas-carbone, captage et séquestration de carbone (CCS).



Dans l'agriculture : transformation des systèmes d'élevage (baisse sélective des cheptels bovins), transformation de la gestion de l'azote (légumineuses), maintien et développement des puits de carbone naturels, agricoles et forestiers.



Dans l'industrie de l'énergie : prolongation du nucléaire historique et lancement du nouveau nucléaire (EPR2), déploiement des énergies renouvelables (photovoltaïque, éolien terrestre, éolien en mer), déploiement soutenable des bioénergies.

2 Une **analyse de robustesse** imaginant des trajectoires dégradées de décarbonation, pour mieux les éviter. Ces trajectoires chiffrées ont été construites à partir de variantes supposant des issues plus ou moins optimistes pour chaque chantier. Le simulateur de trajectoires utilisé évalue les émissions

de gaz à effet de serre, les consommations d'énergies, les besoins en emploi et l'empreinte cuivre, entre 2025 et 2050. Le présent rapport expose les résultats de ces analyses, et en tire de grandes lignes d'action pour une décarbonation française réussie dans un contexte incertain.

Les enseignements clés de nos travaux

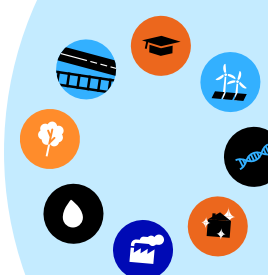
La France peut réussir sa décarbonation et s'affranchir des énergies fossiles d'ici 2050, à condition d'accélérer sur l'ensemble des chantiers. Même dans un contexte incertain, où les imprévus seront inévitables, la transition peut aboutir. En revanche, tout affaiblissement de l'ambition ou tout retard dans sa mise en œuvre accroîtrait les tensions autour des ressources énergétiques, dans un monde déjà marqué par l'instabilité et les aléas. L'urgence est d'accélérer, sans compromis.



La France a pris trop de retard pour faire l'impasse sur les chantiers majeurs, qu'il va falloir mener de front : production d'énergies bas carbone française, électrification massive des équipements, maîtrise de la consommation d'énergie, réduction des émissions de carbone hors combustion, préservation des puits de carbone naturels. Si la France parvient à accélérer sur l'ensemble des chantiers, elle regagnera une marge de manœuvre sur sa trajectoire au cours de la décennie 2040.



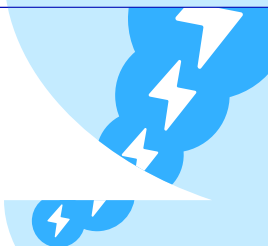
Le succès de chaque chantier de décarbonation dépend de conditions clés, dont la réalisation reste incertaine et dont la maîtrise totale ne peut être garantie — c'est autant de défis à relever pour réussir la décarbonation : rythme de déploiement industriel ou infrastructurel, développement de technologies aujourd'hui peu matures, évolution des usages et des comportements, rythme de recrutement et de formation, bonnes conditions agronomiques ou sylvicoles. Il faut tout faire pour maîtriser au mieux ces prérequis par leur planification rigoureuse, mais sans être trop optimiste sur leur réalisation future, tributaire de conditions extérieures favorables.



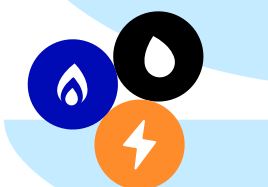
L'électrification massive des équipements est incontournable pour une décarbonation poussée de l'économie française, et pour mettre à l'abri les ménages français des prochaines crises sur les énergies fossiles : petites voitures électriques abordables, pompes à chaleur, procédés industriels électriques, flottes de camions électriques.



La production électrique bas-carbone française doit fortement augmenter pour permettre l'électrification. À ce titre, renoncer au nucléaire ou ralentir le rythme de déploiement des énergies renouvelables, c'est risquer de manquer d'électricité bas-carbone et souveraine dès la décennie 2030.



Maîtriser la consommation des différentes énergies (carburants liquides, gaz, électricité) est indispensable pour sécuriser la décarbonation française. À ce titre, il faut démultiplier l'usage du vélo, déployer les transports en commun et le train, réduire le trafic aérien, rénover massivement les logements, continuer à améliorer l'efficacité des équipements, maîtriser le déploiement des centres de données.



Contexte et objectif



L'Europe est vulnérable face aux aléas énergétiques et météorologiques de plus en plus fréquents

Les crises les plus récentes ont démontré de manière éclatante la dépendance étroite entre les activités humaines, économiques ou non, et l'énergie.

La crise COVID de 2020 a mis à l'arrêt une partie de la production économique et a fortement contraint les déplacements. Elle a induit une réduction sensible de la consommation d'énergie française et a entraîné une baisse de 5 % de ses émissions de gaz à effet de serre territoriales en 2020. C'est également vrai à l'échelle du globe.

La sortie de crise s'est accompagnée d'une crise énergétique : initialement, en 2021, elle s'explique par la relative lenteur de la reprise des fournitures pétrolières et gazières mondiales, empêchant une reprise économique rapide. La situation s'est nettement aggravée avec la guerre en Ukraine (2022) et la détérioration des relations avec la Russie. L'Europe a effectué une réduction graduelle de sa dépendance à l'approvisionnement gazier russe. Cet approvisionnement a été partiellement compensé par de nouvelles importations de gaz naturel liquéfié (GNL) depuis les Etats-Unis, et par des réductions de consommation (des baisses de chauffage dans les bâtiments et de la consommation dans l'industrie).

Depuis, deux nouvelles tensions géopolitiques mettant à risque les approvisionnements fossiles pour la France et l'Europe se sont ajoutées : la dépendance accrue à des USA dont les comportements à l'égard de l'Europe sont plus ouvertement inamicaux, et la guerre en Iran qui limite l'approvisionnement du marché mondial, accentuant la compétition globale pour l'accès au pétrole, au gaz et aux ressources liées (engrais, hélium...).

La France, et l'Europe, sont particulièrement exposées aux crises sur les énergies fossiles. Leur économie, et les activités quotidiennes y sont encore très dépendantes. De plus, ces énergies sont majoritairement importées. Cette dépendance aux importations est structurelle : la production locale (en particulier les exploitations en mer du Nord) décline depuis les années 2000.

Les tensions géopolitiques mondiales en lien avec les ressources fossiles risquent d'augmenter à mesure que les gisements mondiaux s'épuisent, alors que les nouvelles découvertes ne suffisent plus à compenser leur déclin et que les économies restent fortement dépendantes de ces énergies.

De plus, la France sera exposée de manière croissante aux aléas météorologiques extrêmes, de manière différenciée sur ses territoires : vagues de chaleur, sécheresses, fortes précipitations, cyclones tropicaux, érosion du littoral, favorisant notamment feux de végétation et retrait-gonflement des argiles. Ce sont les effets attendus du réchauffement climatique. Des efforts d'adaptation sont planifiés par l'Etat, dans son 3^e Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC), pour limiter les conséquences prévisibles de ces aléas.



Du Plan de transformation de l'économie française (PTEF) au Plan robuste pour l'économie française (PREF)

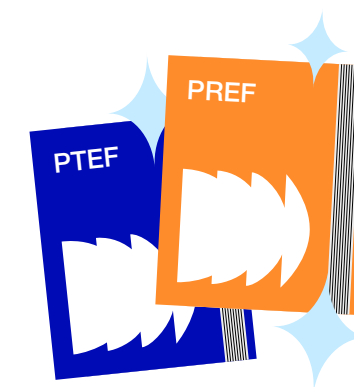
Dans un monde qui se fragmente et soumis à des chocs, les systèmes se grippent, les prévisions se faussent et les plans ne se déroulent pas comme prévu.

Fin 2021 et début 2022, le Shift Project publiait son plan de transformation de l'économie française (PTEF), composé d'une quinzaine de rapports thématiques et d'un livre de synthèse. Le PTEF mettait sur la table un ensemble de propositions concrètes pour la France, visant à réduire fortement ses émissions de gaz à effet de serre et ses consommations d'énergie fossile, de 5 %/an, dès 2022 et jusqu'à 2050. Une modélisation quantitative assurait la cohérence du PTEF du point de vue des flux physiques et des besoins en emploi, à l'échelle du territoire français.

L'objectif du PTEF était de convaincre un maximum de décideurs politiques et économiques de planifier la transition, avec des propositions concrètes et chiffrées et avec le soutien d'un maximum de professionnels, d'acteurs économiques et de la société civile qui seraient embarqués avec nous dans cette direction. L'impératif de planification est toujours d'actualité : de nombreux chantiers de décarbonation doivent être menés de front. Certains doivent accélérer quand d'autres débutent à peine. Tous nécessitent une vision et un accompagnement stable sur le temps long ; certains requièrent des coordinations nouvelles entre acteurs, des reconversions, et parfois des évolutions d'habitude dans le quotidien.

Même s'il contribuait à réduire la sensibilité de l'économie française aux crises énergétiques, le PTEF, comme beaucoup de travaux sur la décarbonation d'alors, supposait implicitement un monde relativement stable dans les décennies à venir : chaque décision y portait entièrement ses fruits, supposant une organisation sans accroc, et une maîtrise complète des trajectoires.

Dans le cadre du Plan robuste pour l'économie française (PREF), le Shift Project souhaite explorer la transition en tenant compte du fait que le monde sera incertain, et que les acteurs français ne pourront pas tout maîtriser au cours des 25 prochaines années. La présente étude Réussir la transition dans l'incertitude est la brique technique du PREF qui apporte de nouveaux enseignements en réinterrogeant le PTEF sous l'angle des incertitudes, pour le rendre plus robuste.

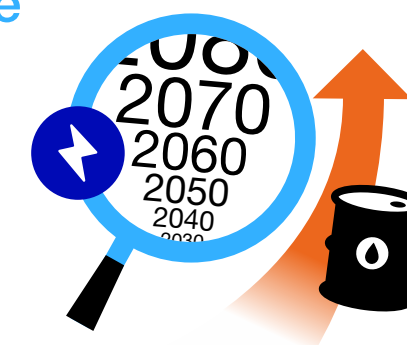


Explorer l'avenir pour mieux sécuriser la décarbonation française face aux incertitudes

Par la présente étude, le Shift Project vise à apporter des enseignements et propositions utiles pour sécuriser la transformation de l'économie française, vers sa décarbonation et sa sortie des énergies fossiles.

Le Shift souhaite faire émerger des enseignements nouveaux, pour rendre la décarbonation française robuste aux aléas des 20 prochaines années, dans la lignée des premiers travaux de RTE *Futurs énergétiques 2050* ou du projet de SNBC 3. Ce rapport présente à la fois la méthode d'analyse d'incertitude que nous avons

mise en œuvre à partir du PTEF et les enseignements que nous en avons tirés. Les propositions faites dans le PTEF nous semblent toujours d'actualité ; l'analyse d'incertitude vient à la fois renforcer certaines propositions, et en ajouter d'autres.



Dans ce contexte contraint, la réussite de tout projet économique pour la France est conditionnée au succès de la décarbonation : celle-ci redonne de la liberté d'action. Il est urgent de l'accélérer et de la sécuriser face aux crises à venir. La décarbonation réduit l'exposition des activités françaises aux crises sur les énergies fossiles, à condition de ne pas reposer massivement sur des énergies bas-carbone importées. Il est plus que jamais urgent d'accélérer les efforts. **Décarboner la France et l'Europe, c'est gagner en souveraineté et retrouver une maîtrise de notre destin face aux incertitudes sur l'avenir.** Aussi la stratégie doit maintenant viser à sécuriser les efforts de décarbonation, et à accélérer.



20 chantiers incontournables pour réussir la transition

■■■■■

Objectifs et méthode

Décarboner l'économie française passe concrètement par le déploiement d'un certain nombre de chantiers. Cette étude a retenu une vingtaine de chantiers que nous considérons comme incontournables, et emblématiques de la décarbonation.

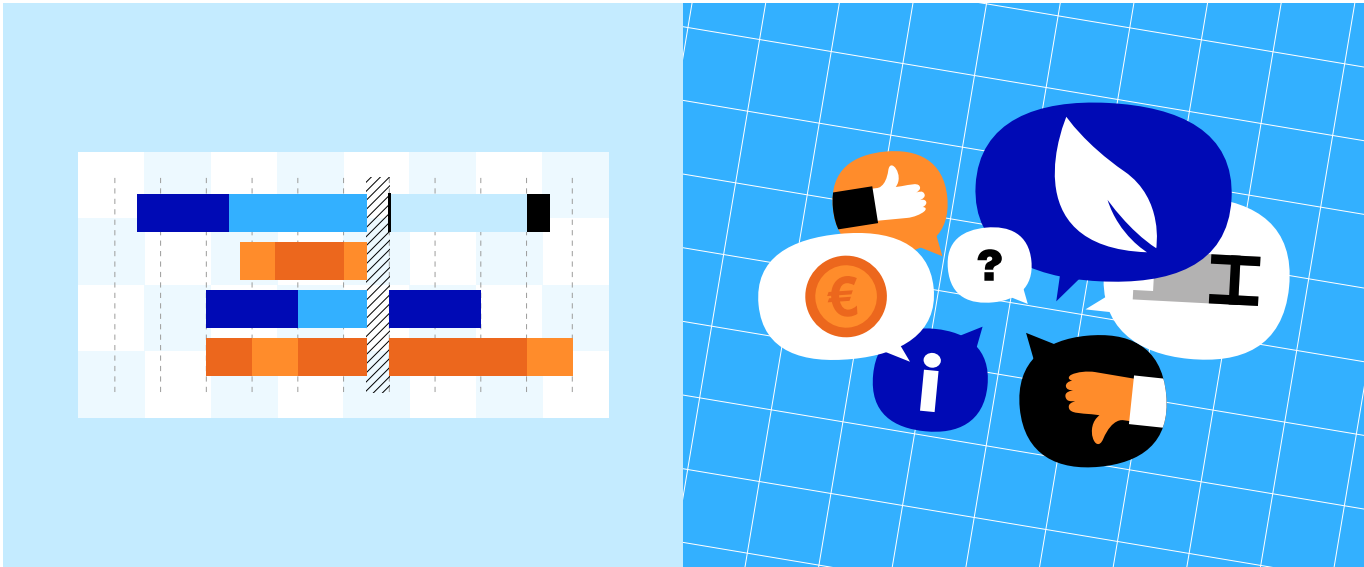
La liste des chantiers retenus ne saurait prétendre à l'exhaustivité. Ils couvrent cependant une large partie des enjeux de décarbonation et illustrent l'ensemble des familles d'actions que la France doit mener et accélérer : maîtrise de la consommation d'énergie, électrification, déploiement de la production électrique bas carbone, déploiement des bioénergies, évolution des pratiques agricoles et stockage du carbone atmosphérique.

Chacun de ces chantiers a fait l'objet d'une analyse détaillée pour :

- **Faire le point sur l'avancement du chantier à date.** Un état des lieux de chaque chantier, en termes de développements concrets, de pratiques, de structuration de filière a été établi.
- **Identifier ses conditions de réussite**, en détectant les freins ou points de blocage actuels et à venir, par exemple en termes de visibilité économique pour les filières, d'organisation interne, ou d'emploi et de formation.

L'analyse a principalement reposé sur une large étude bibliographique et sur plusieurs centaines d'entretiens avec les acteurs, experts et professionnels des secteurs concernés. Dans ces entretiens, nous avons mis l'accent sur la réussite des chantiers à la bonne échelle et à temps, et sur les défis que cela pose pour leur secteur. Nous avons exploré les actions concrètes à mettre en œuvre (infrastructures, industries, développement de technologies, recrutements, formations, évolutions des usages et des comportements), et identifié les enjeux d'accélération, et les freins, ou risques qui pèsent sur elles.

Tout au long des recherches, la grille d'analyse du Shift Project a été utilisée, principalement centrée sur les flux physiques, sur les enjeux techniques, sur les questions d'énergie et de matière, d'emplois et de compétences, sur les problématiques organisationnelles concrètes, et sur les usages.



TRANSPORTS



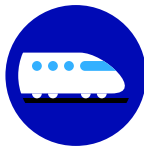
Déployer massivement le vélo



Étendre les transports en commun



Généraliser la voiture électrique sobre



Massifier le train passagers



Décarboner le secteur aérien



Relancer le fret ferroviaire

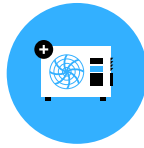


Electrifier les poids-lourds

LOGEMENT

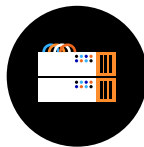


Rénover les logements



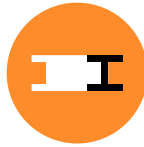
Déployer les pompes à chaleur

NUMÉRIQUE



Maîtriser le déploiement des centres de données

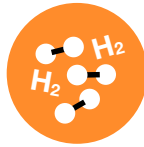
INDUSTRIE



Produire de l'acier bas-carbone en France



Capter, stocker et valoriser le CO₂



Massifier la production d'hydrogène bas-carbone

AGRICULTURE



Transformer la gestion de l'azote



Transformer les systèmes d'élevage



Préserver les puits de carbone

ÉNERGIE



Prolonger et relancer le nucléaire



Déployer l'éolien et le photovoltaïque



Mettre en œuvre un déploiement soutenable des bioénergies

Réussir la transition dans les transports

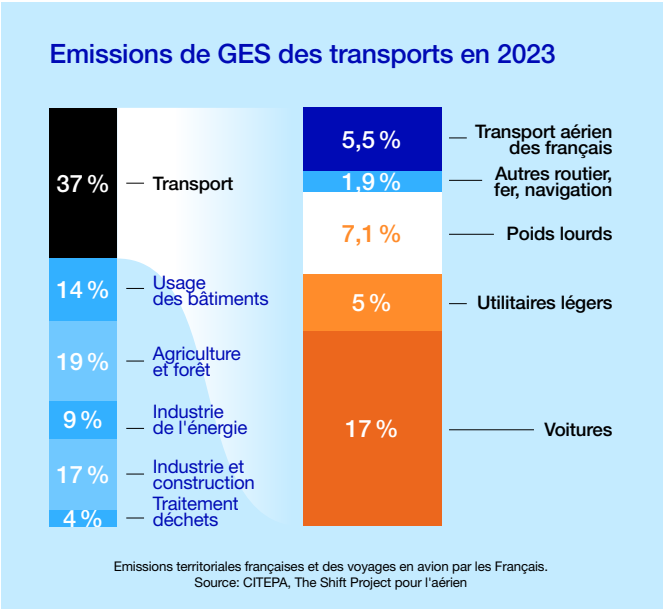


Les transports: un poste d'émissions majeur en France, à la forte dépendance aux énergies fossiles

Les transports pèsent pour environ un tiers des émissions totales françaises, dont une moitié pour les voitures et un tiers pour les utilitaires et les poids-lourds. Les véhicules circulant actuellement en France fonctionnent très majoritairement aux carburants fossiles (à plus de 90 %) : essence, diesel, kérosène.

Nous avons analysé 7 chantiers incontournables ou emblématiques pour décarboner les transports.

Ces chantiers Transport ne sont pas les seuls : les travaux du Shift, dont le PTEF, en mentionnent de nombreux autres : limitation des distances à parcourir, par l'urbanisme, le télétravail et les visioconférences ; réduction du trafic aérien pour les voyages, par une offre abondante et diversifiée de train en Europe, et par des vacances lointaines plus longues mais moins fréquentes ; réduction des consommations des voitures par une meilleure aérodynamique, l'écoconduite et la réduction des vitesses, etc.



Déployer massivement le vélo

Atteindre 25 % des distances parcourues en 2050 pour les déplacements du quotidien à vélo est possible :

- Accélérer la construction des infrastructures
- Pistes cyclables continues et sécurisées,
- Lieux de stationnements abondants et sûrs.

Développer une industrie française de vélos

- Large gamme de vélos de qualité et accessibles,
- Montée en puissance d'une filière de production et de réparation.

Favoriser le vélo face à la voiture

- État : cadre financier pérenne pour les pistes cyclables,
- Collectivités locales : réduction des vitesses automobiles, aménagements cyclables et plans de circulation favorables au vélo

Renforcer et étendre les transports en commun (TC)

Multiplier par 2 l'usage quotidien des TC d'ici à 2050 est possible :

- Pérenniser et accélérer le déploiement des TC, notamment via des projets de métropole : Grand Paris Express et Services Express Régionaux Métropolitains (SERM), connectés aux territoires voisins.
- Assurer une vision nationale des projets et de leur contribution à la décarbonation
- Donner de la visibilité, notamment financière, aux acteurs, pour préparer les recrutements, achats de matériel roulant, etc.
- Faciliter l'utilisation des Transports Collectifs : rendre le service accessible, confortable, simple et fiable, augmenter les fréquences dans les zones denses
- Communiquer sur l'existence et les avantages du service (prix, gain de temps, fiabilité, environnement)

Généraliser la voiture électrique sobre

Un parc automobile entièrement décarboné à l'usage d'ici 2050 est possible :

Maintenir la trajectoire CO₂ réglementaire pour la vente de voitures électriques (VE) neuves.

Poursuivre le déploiement des infrastructures de recharge, notamment en zones peu denses.

Anticiper la formation dans la filière aval (distributeurs, réparateurs, auto-écoles...).

Soutenir l'industrie locale (FR & UE) des VE

- Production de batteries en France et en Europe
- Vente de voitures intégrant un minimum de contenu local

Déployer les voitures électriques sobres

- Vente de petites voitures électriques neuves abordables
- Développement du marché de l'occasion pour le VE
- Informers les consommateurs sur la bonne autonomie des VE
- Dispositifs ciblés de remplacement des voitures thermiques les plus émettrices

Massifier le train passagers

Tripler les distances parcourues en train à l'horizon 2050 est possible :

- Investir fortement dans le réseau, aujourd'hui vieillissant : rénovation, modernisation et extension.
- Produire du matériel roulant (rames de TGV et trains régionaux) au bon rythme. Cela requiert une planification claire et stable, pour que les constructeurs ferroviaires (Alstom, CAF) et leurs sous-traitants aient la visibilité suffisante, et une accélération des procédures pour qu'ils puissent produire rapidement ces nouveaux matériels.
- Réaliser un effort massif de recrutement et formation, aujourd'hui insuffisamment anticipé : personnels roulants, exploitants des gares et du réseau, agents de maintenance des matériels et infrastructures.
- Proposer une offre de trains abondante, fiable et abordable, pour consolider et stimuler la demande.

Décarboner le secteur aérien

Décarboner le secteur aérien est possible :

- Améliorer l'efficacité énergétique des appareils. Progrès possibles mais insuffisants pour contrebalancer la hausse tendancielle du trafic.
- Déployer les carburants durables (dits « SAF ») en structurant une filière de production industrielle française. Ils sont bas carbone et utilisables dans les avions existants.
- Réduire le trafic aérien : report modal vers le ferroviaire, fiscalité, quotas, fermetures de lignes, etc. Le volume de SAF sera limité par la ressource en biomasse durable et en électricité bas-carbone : réduire le trafic évitera les conflits d'usage.
- Poursuivre la R&D sur l'avion à hydrogène, même s'il ne jouera pas un rôle significatif avant 2050.

Relancer le fret ferroviaire

Couvrir 30 % du transport de marchandises par train en 2050 (pour 9 % en 2025) est possible :

Déployer et améliorer le service

- Moderniser et étendre le réseau, en augmentant son intermodalité
- Assurer la qualité du service, en termes de ponctualité et de traçabilité
- Anticiper les recrutements dans le secteur

Stimuler la demande

- Accompagner & conseiller les entreprises pour faciliter l'accès au transport ferroviaire
- Obligation progressive de recours au rail pour les chargeurs, afin de sécuriser une demande à la hauteur des enjeux
- Faire en sorte que les prix de l'électricité ne soient pas un obstacle à la relance du fret ferroviaire

Etablir une planification d'ensemble, orchestrée par les pouvoirs publics en collaboration avec la filière, et pensée territorialement

Electrifier les poids-lourds

Atteindre 100 % de poids lourds électriques (PLE) à la vente en 2050 est possible :

- Déployer la production. La réglementation européenne VECTO, qui revient à donner des objectifs de production de PLE aux constructeurs (-90 % d'émissions des PL neufs à 2040), doit être maintenue et respectée, voire renforcée.

Planifier le déploiement adéquat des bornes de recharge de forte puissance.

Stimuler la demande

- Instaurer des obligations de part de transport routier effectuée en PLE pour les chargeurs et commissionnaires
- Exigence de mise en place d'une trajectoire de décarbonation active par ces acteurs
- Rendre le coût total de possession aussi avantageux que possible pour le camion électrique et faciliter son acquisition, par exemple par des aides suffisantes ou des solutions de financements adéquates
- Faire en sorte que le prix de recharge en itinérance ne soit pas un obstacle

Accompagner le secteur

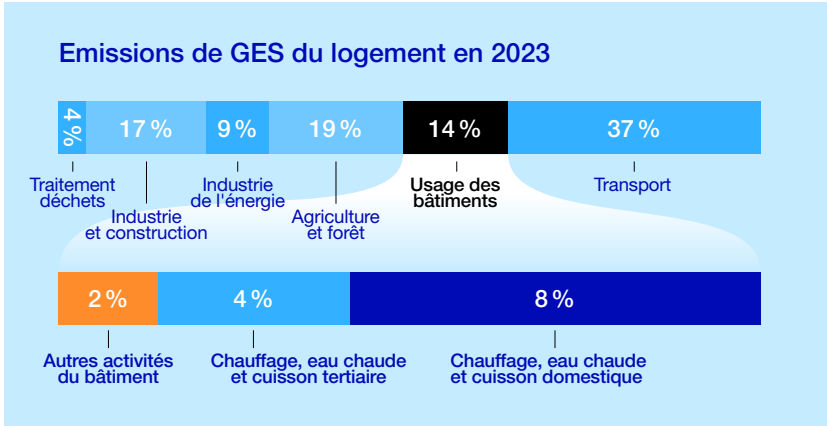
- Fournir une information claire sur les options & priorités de décarbonation
- Accompagner le changement des acteurs

Réussir la transition dans le logement



L'usage des bâtiments pèse pour environ 15 % des émissions totales françaises. Plus de la moitié provient du chauffage, de l'eau chaude et de la cuisson dans les logements. Encore 45 % des logements sont dépendants du gaz ou du fioul.

Nous avons analysé 2 chantiers incontournables pour décarboner les logements.



Rénover les habitations

Massifier la rénovation des logements en France est possible :

- Garantir une demande de rénovation élevée et pérenne, typiquement en assurant des aides conditionnées stables, en renforçant la valeur verte (tenir un calendrier ferme d'interdictions de location des passoires thermiques, renforcer la contribution au fond travaux selon des critères énergétiques) et en maintenant les dispositifs spécifiques qui fonctionnent dans le logement social.
- Fournir un accompagnement des ménages par un tiers de confiance public, pour rassurer sur la qualité des travaux et aider dans leur organisation, la rénovation étant complexe et technique.
- Le secteur du bâtiment doit fournir un effort majeur de recrutements et de formation, pour répondre à la demande lorsqu'elle viendra à s'accroître sous l'effet des leviers précédents.

Déployer les pompes à chaleur

Déployer massivement les pompes à chaleur en France est possible :

- Accélérer le passage à la PAC des logements anciens (gaz et fioul), typiquement par la garantie de prix de l'électricité bas et stable (par rapport au gaz), des aides lisibles, pérennes et calibrées, et enfin des offres intégrées de financement du reste à charge pour faciliter le passage à l'acte.
- Faire monter en puissance la filière industrielle, aujourd'hui déjà solide en France et en Europe
- Assurer des débouchés stables et une protection vis-à-vis de la concurrence internationale
 - Recruter et former de nombreux installateurs et mainteneurs. Garantir une installation correcte des PAC est un prérequis à leur bon fonctionnement et est essentiel pour une confiance favorisant la diffusion.

Réussir la transition dans le numérique



La filière des centres de données connaît une expansion rapide en France, due à un fort soutien politique et un usage croissant de l'IA générative. Cela a des conséquences physiques et techniques : consommation d'électricité en hausse rapide, saturation de la file d'attente des demandes de raccordement au réseau, etc.

Si rien n'est fait, cela peut porter atteinte à la décarbonation des autres secteurs :

- Conflit d'usages pour l'électricité bas-carbone avec les autres secteurs (transport, logement, industrie),
- Augmentation des délais de raccordement au réseau des sites industriels souhaitant électrifier leurs procédés.

Maîtriser le déploiement des centres de données

Réguler cette dynamique de déploiement est possible :

- Prendre des arbitrages politiques forts, afin que les centres de données ne puissent pas préempter l'électricité bas-carbone et les capacités de raccordement,
- Créer un observatoire de l'évolution des capacités installées et des consommations,
- Permettre un débat éclairé sur l'usage pertinent de l'IA et sur ses différents impacts.

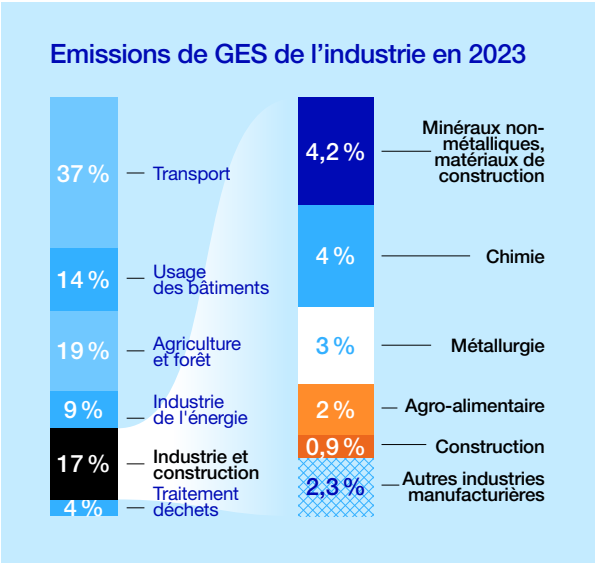
Réussir la transition dans l'industrie



L'industrie : une diversité de filières, des émissions de GES relativement concentrées

L'industrie représente environ 17 % des émissions totales, principalement réparties entre la métallurgie (notamment l'acier), la chimie (notamment les engrais), et les minéraux (notamment le ciment). La production d'acier est fortement consommatrice de charbon. La production d'engrais est actuellement réalisée à partir de gaz fossile. La production de ciment repose sur une réaction chimique libérant du CO₂, (émissions dites de procédés). Nous avons analysé 3 chantiers incontournables pour la décarbonation de l'industrie.

Ces chantiers Industrie ne sont pas les seuls : les travaux du Shift, dont le PTEF, en mentionnent de nombreux autres : décarbonation de la filière plastiques, par le recyclage, la substitution par des bioplastiques ou des matériaux alternatifs durables ; massification de l'électrification dans l'industrie, par les pompes à chaleur, la compression mécanique de vapeur ou les différents types de fours électriques ; décarbonation de l'industrie verrière par l'électrification et cas particuliers de besoins en hautes températures, etc.



Produire de l'acier bas-carbone en France

Il est possible de décarboner la production d'acier française :

- Développer le four à arc électrique (EAF), technologie mature et décarbonée de recyclage des aciers, en améliorant le tri des ferrailles et la réduction de leur exportation.
- Développer la réduction directe du minerai de fer par hydrogène et four à arc électrique (DRI-H2-EAF), en substitution des hauts fourneaux fonctionnant au charbon. C'est un défi industriel à la temporalité longue, à lancer rapidement, et reposant sur l'émergence d'une filière française d'hydrogène décarboné.
- Privilégier la production d'acier bas carbone au détriment de l'acier carboné, par exemple via un prix de l'électricité incitatif et un coût du CO₂ dissuasif dans la durée, ou via des obligations/interdictions appliquées aux producteurs
- Sécuriser les débouchés de la filière
- Imposer des taux d'incorporation d'acier bas carbone aux secteurs consommateurs (bâtiment, automobile, infrastructures)
 - Assurer une protection vis-à-vis de la concurrence internationale, notamment quand elle est plus carbonée.

Massifier la production d'hydrogène bas-carbone

Assurer une production d'hydrogène décarbonée à l'échelle industrielle est possible :

- Déployer la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau
- Structuration rapide de l'appareil productif, pour de premières mises en service à horizon 2030-35
 - Réalisation des recrutements adéquats
 - Sécurisation des débouchés aval (acier, engrais décarbonés)
 - Privilégier la production d'hydrogène bas carbone au détriment de l'hydrogène carboné, par exemple via un prix de l'électricité incitatif et un coût du CO₂ dissuasif dans la durée, ou via des obligations/interdictions appliquées aux producteurs
 - Organisation à moyen et long terme des capacités de transport et de stockage d'hydrogène pour tirer profit d'un équilibre énergétique et économique entre offre et demande géographiquement distantes.
- Maîtriser les usages de l'hydrogène pour limiter la consommation d'électricité
- Arbitrer en faveur des usages où l'hydrogène est le plus pertinent : acier, engrais, e-fuel
 - Maîtriser la consommation des e-fuels par une baisse du trafic aérien.

Capter, stocker et valoriser les émissions résiduelles de CO₂ industriel

Il est possible de développer le captage et la séquestration de carbone :

- Aligner les acteurs sur le transport du CO₂, notamment sur le niveau d'impuretés acceptable
- Identifier et sécuriser des sites de stockage suffisamment vite, notamment en France

Eclairer les débats sur ces projets, par des études d'impacts sur leur cycle de vie complet

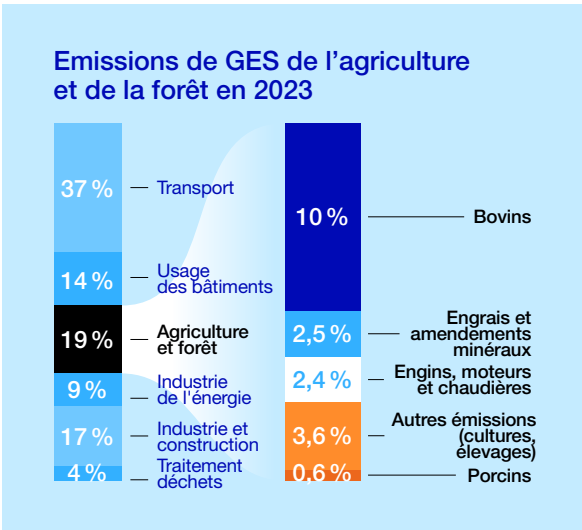
- Favoriser l'installation de CCS, par exemple via un prix de l'électricité incitatif et un coût du CO₂ dissuasif dans la durée, ou via des obligations d'installations appliquées aux sites pertinents
- Assurer plus de transparence sur les différents postes de coûts des projets européens

Réussir la transition dans l'agriculture et la forêt



L'agriculture et la sylviculture comptent pour environ 20 % des émissions totales françaises. Celles-ci comprennent notamment les émissions de méthane des élevages bovins, les émissions de protoxyde d'azote liées à l'épandage des engrais azotés de synthèse ou encore le déstockage de carbone liée à la perte de surfaces en prairies. Les écosystèmes agricoles et forestiers peuvent jouer un rôle de puits de carbone naturel : ils compensent aujourd'hui 10 % du total des émissions annuelles de carbone. **Nous avons analysé 3 chantiers incontournables pour la décarbonation de l'agriculture et la gestion des puits de carbone naturels.**

Ces chantiers agriculture ne sont pas les seuls : les récents travaux du Shift sur l'agriculture en mentionnent de nombreux autres : recours à des cultures sobres en eau, optimisation de la fertilisation phosphatée, etc.

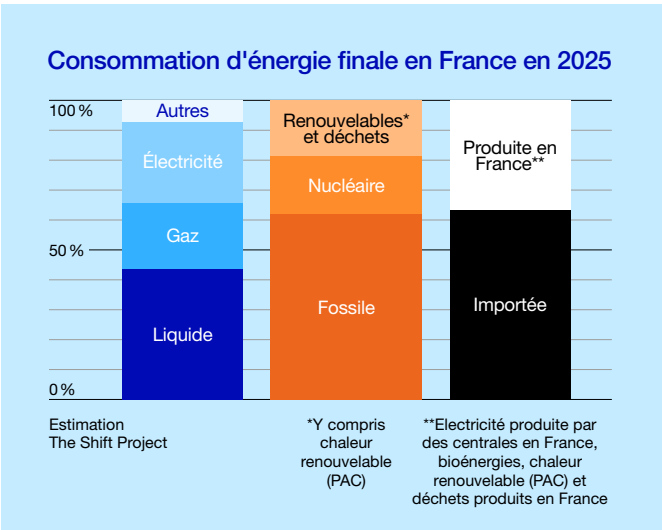


Réussir la transition dans l'énergie



L'industrie de l'énergie fait face à des enjeux majeurs. En 2025, l'énergie consommée en France est à plus de 60 % fossile et importée. Cela concerne tout particulièrement les carburants liquides et le gaz. La production d'énergies bas carbone, si possible en France, doit se déployer massivement et de manière soutenable. Les énergies liquides et gazeuses, produites à partir de matières organiques (bioénergies) ou d'électricité (e-fuels), deviendront plus rares ; l'électricité, d'origine renouvelable ou nucléaire, prendra une place plus grande pour compenser. **Nous avons analysé 3 chantiers incontournables pour que l'industrie de l'énergie contribue à la décarbonation de l'économie.**

Ces chantiers Energie ne sont pas les seuls : nous aurions pu étudier la production de chaleur renouvelable, la production de chaleur nucléaire, d'autres types d'énergies renouvelables électrique (hydroliennes) ou encore d'autres enjeux relatifs au nucléaire (SMR, cycle du combustible), etc.



Transformer la gestion agricole de l'azote

Il est possible de réduire la consommation d'engrais azotés de synthèse en transformant la gestion agricole de l'azote :

- Relancer à grande échelle les cultures de légumineuses, principale source d'azote naturelle, à l'échelle nationale
- Adapter le parc de silos au stockage des légumineuses
- Mener le déploiement territorial en tenant compte des contextes pédoclimatiques locaux
- Former des agriculteurs aux spécificités de ces cultures
- Accélérer la sélection génétique pour adapter les semences aux aléas climatiques et biotiques
- Sécuriser les débouchés, en particulier dans la restauration collective.

Déployer d'autres pratiques de gestion de l'azote

- Produire des engrais bas carbone (hydrogène, CCS) et optimiser leur usage
- Généraliser le recours aux couverts végétaux
- Recycler l'azote contenu dans les effluents d'élevage, boues de station d'épuration, etc.

Mettre en place une véritable planification, tant à l'échelle des territoires que des filières.

Généraliser les élevages bovins résilients et bas carbone

Permettre le maintien ou la transition vers des systèmes d'élevage bovin résilients et bas carbone est possible :

- Réduire de manière planifiée et progressive les cheptels bovins, pour réduire leurs émissions de méthane. L'élevage en prairies doit être préservé, notamment car les prairies sont des stocks de carbone importants.
- Relocaliser l'alimentation bovine, en remplaçant notamment les tourteaux de soja, importés et sources de déforestation, par de l'herbe et des légumineuses de prairies.
- Reconnecter territorialement les productions animales et végétales, pour fertiliser directement les cultures par les effluents d'élevage local et réduire la consommation d'engrais de synthèse.
- Améliorer la génétique et la santé animale, pour réduire l'empreinte carbone sans nuire au bien-être animal, et obtenir une meilleure résilience des troupeaux aux stress climatiques (fortes chaleurs) et aux maladies.
- Proposer un soutien économique et réglementaire plus fort pour sécuriser la situation des éleveurs. Le secteur doit redevenir attractif, en garantissant des revenus dignes et des conditions de travail décentes.

Préserver les puits de carbone naturels

Les puits de carbone agricoles et forestiers s'érodent rapidement. Il faut agir pour les préserver, mais leur évolution dépendra des impacts du changement climatique. Voici nos pistes :

Sanctuariser les stocks existants en préservant des prairies permanentes

Reconstituer les puits de carbone dans les territoires de grandes cultures, par une transformation des pratiques agricoles : couverts végétaux, haies, agroforesterie, prairies temporaires, etc.

Déployer d'urgence une stratégie d'adaptation des forêts françaises pour enrayer la mortalité croissante des arbres et le ralentissement de leur croissance

- Déployer des bouquets d'essences adaptés aux spécificités locales et au changement climatique,
- Déployer des protections contre les incendies,
- Renouveler les forêts sinistrées et valoriser le bois de crise,

- Laisser suffisamment de bois mort & résidus de coupe pour favoriser santé et contenu carbone des sols,
- Adopter des techniques de coupes plus durables,
- Prévenir les conflits d'usages sur la ressource en bois via une planification adéquate,
- Eviter la prolifération excessive de grand gibier, qui mange les jeunes pousses.

Prolonger et relancer le nucléaire

Prolonger le parc nucléaire historique paraît possible. La prolongation à 50 ans du parc existant est déjà en cours et celle à 60 ans semble très probable. Il n'y pas de certitude à date sur une potentielle prolongation au-delà de 60 ans, même si rien ne semble l'interdire dans le principe.

Connecter de nouveaux réacteurs nucléaires de type EPR2 (6 à 14 réacteurs d'ici à 2050) est possible. Pour ce faire la filière doit :

- Réaliser un effort massif d'investissement, de recrutement et de formation,
- Intégrer le retour d'expérience de l'EPR de Flamanville, afin de maîtriser les délais et les coûts.

Pour cela la filière doit disposer d'un horizon de long-terme, clair et stable.

Il faut également qu'Etat, filière et commission européenne convergent sur un schéma de financement.

Déployer l'éolien et le photovoltaïque

Déployer à un rythme élevé l'éolien et le photovoltaïque (PV) est possible :

- Déployer sous contrainte d'espace. Le foncier concrètement accessible aux projets EnR est contraint et se raréfie rapidement. Il faut réserver du foncier aux énergies renouvelables (EnR), augmenter la puissance moyenne des éoliennes installées, et déployer les solutions PV qui ne consomment pas de foncier dédié (toitures, agrivoltaïsme...).
- Accélérer les installations, par un effort important de recrutement et de formation, au sein des services administratifs et instances judiciaires qui traitent les dossiers des projets EnR, et chez les gestionnaires de réseau électrique pour accélérer les raccordements des projets.
- Produire en France et en Europe. Pour notre souveraineté, il faut pérenniser (dans l'éolien) et relocaliser (dans le PV) des capacités de production industrielles françaises et européennes. Pour cela les filières doivent bénéficier d'un horizon clair, de débouchés stables et d'un pilotage d'ensemble.

Déployer les bioénergies soutenables

Les bioénergies (biogaz, biocarburants et bois-énergie) sont produites à partir de biomasse. Elles contribueront notamment à la décarbonation des usages difficilement électrifiables (procédés industriels haute température, aérien, maritime...). Les déployer de manière limitée et soutenable est possible :

Déployer la filière biométhane de manière soutenable

- Assurer une planification pour répartir les méthaniseurs sur le territoire, faciliter le suivi des intrants, et garantir que les usages alimentaires et agronomiques (retour au sol, stockage de carbone) de la biomasse restent prioritaires,
- Former du personnel qualifié dans la construction et la maintenance de méthaniseurs,
- Intégrer les compétences de méthanisation dans le socle de formation des agriculteurs,
- Garantir une visibilité financière sur l'activité de méthanisation,

- Favoriser les méthanisations agroécologiques, évitant par exemple la fertilisation intensive des intrants.

Stabiliser la production des biocarburants routiers (bioessence et biogazole) : une forte croissance ferait concurrence à la production alimentaire. Ils joueront le rôle de carburants de transition pour décarboner le parc thermique résiduel.

Encadrer l'exploitation du bois-énergie, qui continuera néanmoins à jouer un rôle majeur dans la fourniture de chaleur bas carbone pour le logement et l'industrie :

- Donner la priorité aux usages de long terme du bois, tels que le bois d'œuvre et le bois industrie.
- Limiter les prélèvements de bois afin de préserver les stocks et puits forestiers de carbone.

Les conditions de réussite des chantiers



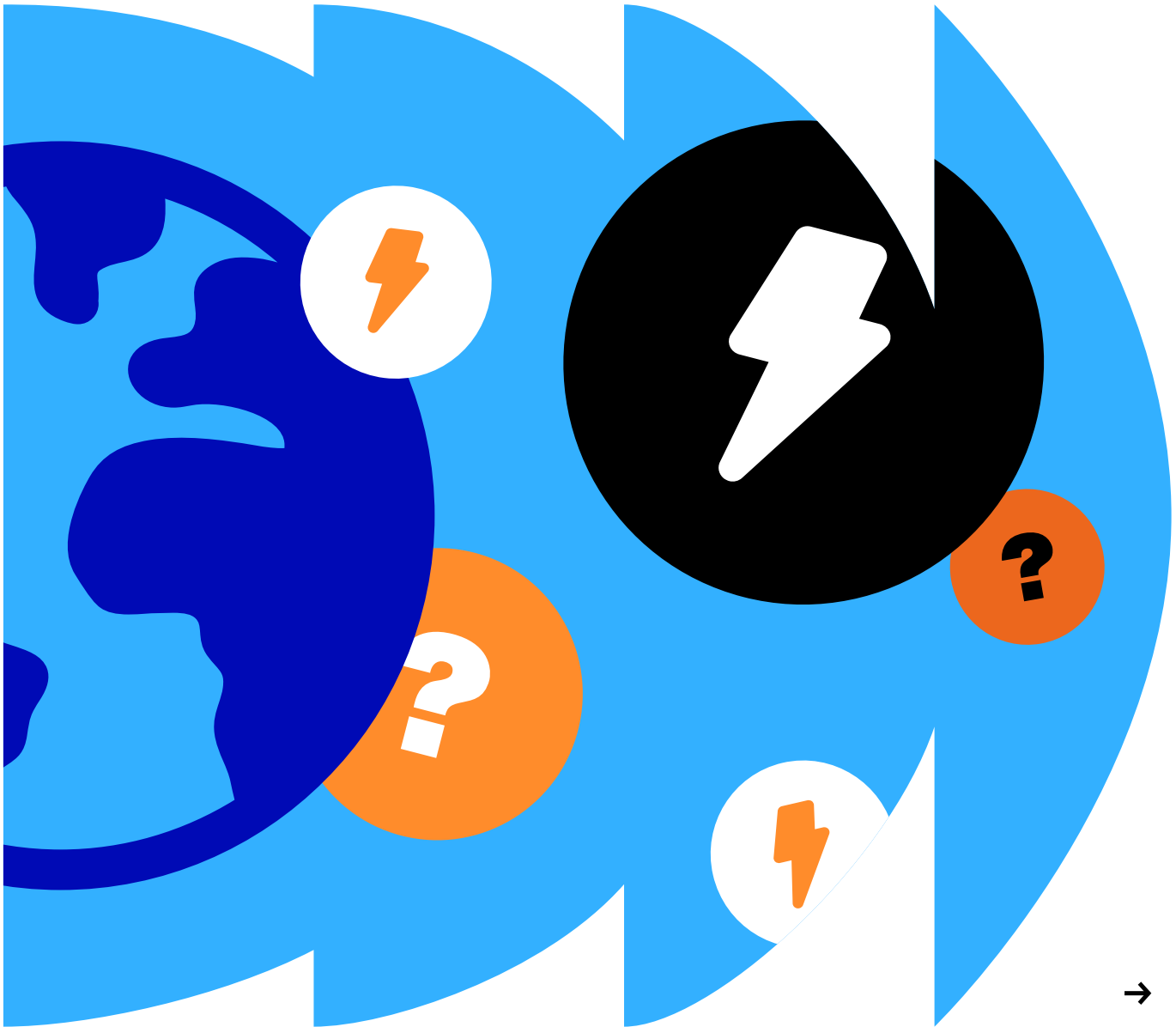
Le succès de chaque chantier de décarbonation dépend de conditions clés, dont la réalisation reste incertaine et dont la maîtrise totale ne peut être garantie — c'est autant de défis à relever pour réussir la décarbonation : rythme de déploiement industriel ou infrastructurel, développement de technologies aujourd’hui peu matures,

évolution des usages et des comportements, rythme de recrutement et de formation, bonnes conditions agronomiques ou sylvicoles. Il faut tout faire pour maîtriser au mieux ces prérequis par leur planification rigoureuse, mais sans être trop optimiste sur leur réalisation future, tributaire de conditions extérieures favorables.

Le bon déploiement d’infrastructures est crucial pour la massification du train voyageur et du fret ferroviaire, le transport de CO₂ ou d’hydrogène, ou encore le raccordement des énergies renouvelables électriques.	
La structuration et la montée en puissance de filières industrielles en France et en Europe, ou l’évolution de certains procédés industriels est une condition de réussite pour les chantiers de déploiement des pompes à chaleur, des véhicules électriques, des trains, pour la production d’acier et d’hydrogène bas carbone, pour la production de carburants d’aviation durable, pour la construction de nouvelles centrales nucléaires, pour le déploiement des méthaniseurs, ou encore pour la captation et le stockage de carbone.	
Le déploiement de technologies aujourd’hui peu matures est un prérequis pour la production d’acier bas carbone et pour le déploiement de la captation et du stockage de carbone. La prolongation des réacteurs nucléaires au-delà de 60 ans est une autre forme de pari technologique.	
La disponibilité en main d’œuvre au bon moment et aux bons endroits est une condition de réussite pour la massification du train, pour la rénovation thermique des logements, et pour le déploiement des moyens de production électrique bas carbone.	
L’évolutions de certains usages, choix et comportements des individus est un prérequis pour la massification de l’usage des transports en commun, du vélo, du train, la généralisation de la voiture électrique et de la pompe à chaleur, les rénovations thermiques des logements.	
Des conditions agronomiques (rendements agricoles) et sylvicoles (mortalité des arbres) favorables sont des conditions de réussite pour la production des bioénergies, et pour la préservation des puits de carbone naturels.	

Ces prérequis sont incertains : les acteurs ne pourront pas les maîtriser entièrement au cours des prochaines décennies, étant donné **le contexte géopolitique et climatique de plus en plus propice aux mauvaises surprises**. Il faut tout faire pour maîtriser au mieux ces prérequis, par une planification rigoureuse, mais sans être trop optimiste sur leur réalisation future.

Nos enseignements clés pour réussir dans l'incertitude



Nos enseignements clés pour réussir dans l'incertitude



Une analyse de robustesse pour penser la décarbonation à l'ère des crises

Cette étude vise à fournir des clés pour penser la décarbonation française à l'ère des crises et de l'incertitude. Notre méthode s'apparente à ce qu'on pourrait appeler une analyse de robustesse.

En ingénierie, un système robuste est un système dont la performance se maintient malgré des variations importantes des conditions extérieures. Un tel système est capable d'encaisser certaines perturbations tout en continuant à remplir les fonctions d'ensemble pour lesquelles il a été conçu. Par analogie, une transition robuste vise à atteindre ses objectifs de décarbonation, même quand tout ne se passe pas comme prévu. Elle ne doit pas dérailler au premier retard industriel ou à la première fluctuation géopolitique.

Elle ne doit pas reposer trop exclusivement sur un petit nombre de technologies ou de filières industrielles, dont l'échec individuel signifierait alors l'échec de l'ensemble. Le succès d'une transition robuste ne doit pas dépendre de quelques paris risqués.



Notre analyse de robustesse consiste à simuler des trajectoires de transformation de l'économie française, intégrant des hypothèses de réalisation plus ou moins dégradées sur tout ou partie des chantiers étudiés précédemment, à en estimer les conséquences, et à comparer ces trajectoires ou groupes de trajectoires pour faire émerger des enseignements clés.

Notre méthode de calcul

Cette analyse de robustesse s'appuie sur un outil de simulation développé par The Shift Project. Celui-ci permet de mettre en chiffre les évolutions imaginées pour les chantiers retenus, ainsi que pour d'autres évolutions « hors-chantiers », généralement reprises du PTEF. Il évalue la trajectoire nationale qui en résulte, en termes de consommation d'énergie, d'émissions de GES, de consommation de cuivre et de besoins en emplois.

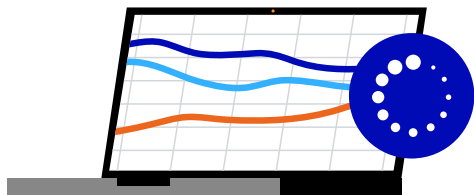
Nous définissons trois variantes pour chaque chantier :

- une variante haute, dans laquelle le chantier se déroule complètement dans le temps imparti,
- une variante intermédiaire, dans laquelle il ne se déroule que partiellement et/ou en retard,
- une variante basse, dans laquelle il ne se déroule pas du tout ou ne fait que poursuivre les tendances observées.

Par exemple, le chantier de relance du fret ferroviaire fait l'objet d'une variante haute dans laquelle le train couvre 30 % du transport de marchandises en 2050, d'une variante intermédiaire où il en couvre 20 %

et d'une variante basse où il en couvre 10 % (contre 9 % aujourd'hui). Les évolutions « hors-chantiers » sont modélisées mais ne font pas l'objet de variantes.

L'outil de simulation permet de sélectionner la variante de son choix pour chaque chantier, pour définir une combinaison de variantes couvrant l'ensemble des chantiers. Il simule alors les effets de la trajectoire nationale qui en résulte (consommation énergétique et cuivre, émissions de GES, besoins en emplois). C'est en comparant les trajectoires entre elles qu'on peut faire émerger des enseignements clés sur la robustesse de la décarbonation française, selon les différents prismes d'analyse retenus : énergie-climat, cuivre et emploi-formation.

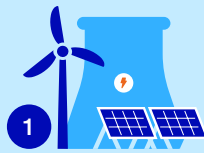


Rappel des enseignements structurants du PTEF de 2022

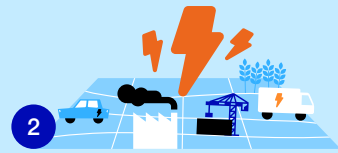


Le plan de transformation de l'économie française (PTEF) du Shift Project, publié en 2022 et sur lequel s'appuie ce travail, a fait émerger plusieurs enseignements structurants pour la décarbonation de l'économie française. Ces enseignements restent valables et sont un point de départ du présent travail.

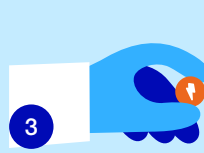
Enseignement PTEF Sécuriser la décarbonation demande de déployer simultanément :



1 la production d'énergies bas carbone française



2 l'électrification massive de l'économie



3 la maîtrise de la consommation d'énergie

...sans faire l'impasse sur aucun de ces leviers

Le déploiement des énergies bas carbone, de manière soutenable et si possible en France, est nécessaire à la décarbonation. Ces énergies couvrent actuellement moins de 40 % de la consommation française. Il faudra en produire suffisamment pour sortir des énergies fossiles et importées.

L'électrification est nécessaire. L'analyse des potentiels de déploiement des énergies bas carbone françaises à 2050 montre une raréfaction des carburants liquides et du gaz (qu'ils soient fossiles ou non), et un potentiel de croissance de l'énergie

électrique. Un transfert doit s'opérer de l'utilisation des premières vers la seconde.

Il est nécessaire de maîtriser les consommations d'énergies d'ici 2050, pour assurer que les productions d'énergies bas carbone suffisent au bon fonctionnement de l'économie. Sans cela, la France resterait dépendante aux énergies fossiles importées plus longtemps.

Cet enseignement est issu du PTEF. La présente étude en confirme, et en affine, les différents aspects.

Enseignement PTEF

Maîtriser le volume de certains usages (aérien, numérique, distances parcourues, construction de logements, consommation de biens) est indispensable pour maîtriser la consommation d'énergie. Cela sécurise la décarbonation de la France en évitant les conflits d'usage sur les énergies décarbonées et en réduisant les besoins d'importation d'énergies.

Les niveaux de consommation de carburants liquides, de gaz, et d'électricité doivent être maîtrisés d'ici à 2050 pour pouvoir les produire en quantité suffisante de manière bas carbone en France. Dans ce contexte, sécuriser la décarbonation demande de maîtriser le volume

de certains usages : réduire la fréquence de certains voyages à longues distance (aujourd'hui faits en avion), maîtriser nos usages numériques, maîtriser les distances que nous parcourons pour nos différentes activités, ou encore asservir le volume de construction de logements neufs au besoin démographique.

Cet enseignement est tiré du PTEF. Les chantiers de réduction du trafic aérien, de maîtrise des distances parcourues ou encore de maîtrise du volume de construction de logements neufs n'ont pas fait l'objet d'analyse dans la présente étude. Ces chantiers sont en revanche intégrés dans son cadre : l'étude suppose que ces volumes sont maîtrisés tout au long des différentes trajectoires.

Nos enseignements clés

énergie-climat

Enseignement n°1

Décarboner la France est encore possible. Si elle s'en fixe l'ambition et s'en donne les moyens dès le prochain quinquennat, la France peut réussir sa décarbonation, y compris si tout ne se passe pas comme prévu. En revanche, plus l'ambition et/ou les moyens seront revus à la baisse ou retardés, plus le risque de rater les objectifs climatiques et de rester dépendant des hydrocarbures importés sera élevé, dans un monde imprévisible où de mauvaises surprises sont probables.

Si elle se fixe une forte ambition pour l'ensemble des chantiers de décarbonation, qu'elle mobilise dès le prochain quinquennat les moyens de les réussir, et que les conditions externes ne sont pas trop défavorables, la France peut atteindre la neutralité carbone, respecter l'Accord de Paris, et sortir totalement des énergies fossiles à 2050. À ambition forte et moyens alloués adéquats, plus la réussite des chantiers sera grande, et plus ils seront démarrés tôt, plus la décarbonation et l'indépendance vis à vis des énergies fossiles seront atteintes rapidement.

Se fixer les objectifs les plus ambitieux pour l'ensemble des chantiers et se donner les moyens de les atteindre à temps sécurise la décarbonation : même l'échec partiel, ou le retard, de tous les chantiers (atteinte du niveau intermédiaire) mène à une France certes encore émettrice en 2050, mais dans laquelle il est encore possible de respecter l'Accord de Paris après 2050. Sa dépendance aux énergies fossiles importées persiste à 2050 mais elle est limitée.

Les risques de l'inaction sont critiques. Echouer, ou retarder, un nombre trop important de chantiers, que ce soit par manque d'ambition, de moyens, ou à cause de conditions extérieures trop adverses, mène à conserver d'importantes émissions de GES en 2050, et rend pratiquement impossible la tenue de l'Accord de Paris. L'inaction maintient une forte dépendance aux énergies fossiles importées dans les transports, le chauffage et l'industrie, laissant la France vulnérable aux crises énergétiques qui surviendraient en cours de trajectoire.

Nous avons testé trois trajectoires contrastées : la première mettant en scène une réussite complète des différents chantiers de transformation (courbe bleu foncée), la seconde une réussite partielle de ces chantiers (courbe bleu clair) et la troisième leur échec (ou de manière équivalente un retard trop conséquent, courbe orange).

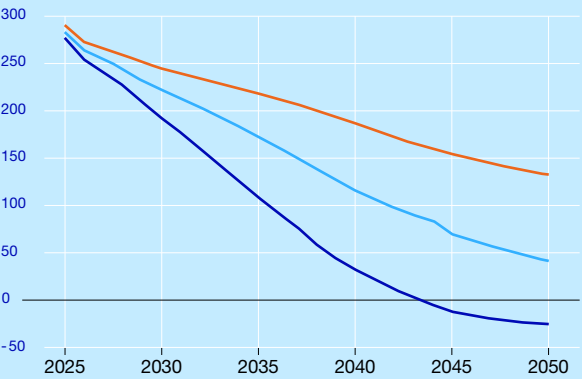
● **La première** permet l'atteinte de la neutralité carbone, le respect du budget carbone français et une sortie presque complète des énergies fossiles.

● **La seconde** permet une forte décarbonation, mais ne garantit pas le respect du budget carbone sur le temps long – des efforts post 2050 seront requis.

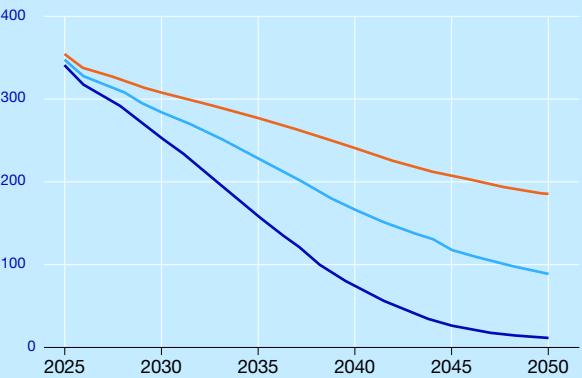
● **La troisième** rate les objectifs climatiques et laisse certaines activités fortement dépendantes aux énergies fossiles : 40 % de l'énergie des camions serait encore fossile en 2050, 55 % pour les véhicules légers, et 25 % pour le chauffage des logements. Le pays importerait encore 100 TWh de carburants liquides fossiles et 200 TWh de gaz fossile à l'horizon 2050.



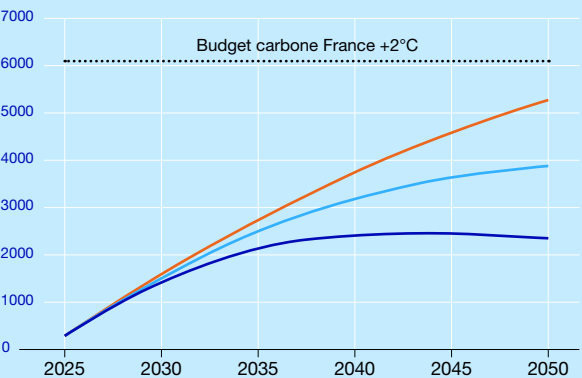
Emissions nettes de CO₂ en MtCO₂



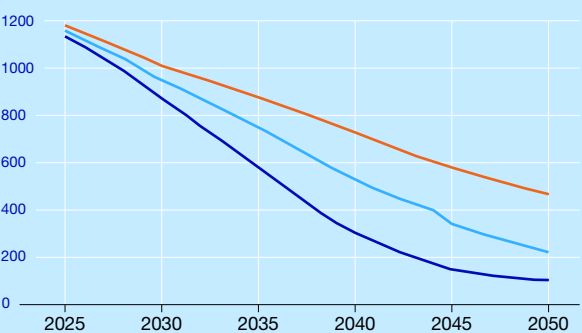
Emissions tous GES nettes en MtCO_{2e}



Cumul émissions CO₂ nettes en MtCO₂



Consommation française d'énergies fossiles en TWh



— Réussite basse de tous les chantiers
— Réussite intermédiaire de tous les chantiers
— Réussite haute de tous les chantiers

Enseignement n°2



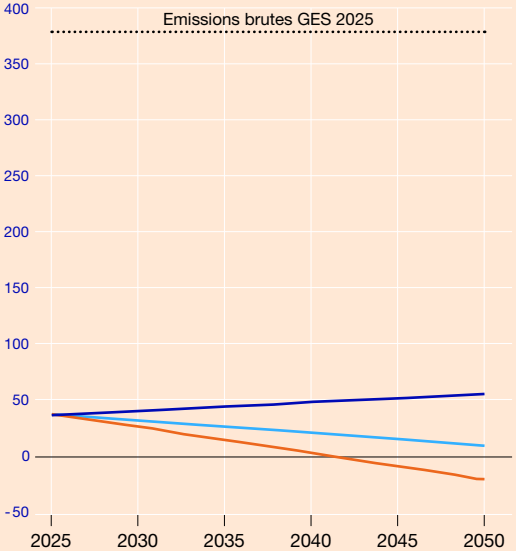
La préservation des puits de carbone naturels, agricoles et forestiers doit être visée pour sécuriser la décarbonation. Nous ne contrôlons pas entièrement cette préservation, à cause des incertitudes liées au changement climatique. La réduction drastique des émissions brutes reste absolument indispensable.

La préservation des puits de carbone naturels, agricoles et forestiers, jouera un rôle majeur pour tendre vers la neutralité carbone. Ils pourront contribuer à capter environ 45 MtCO₂/an en cas de pleine réussite des chantiers de préservation, mais devenir émetteurs de 30 MtCO₂/an en cas d'échec total.

Le changement climatique rend malheureusement leur évolution largement incertaine (incendies, maladies, sécheresses et inondations). Il faut mener ces chantiers de préservation sans compter sur leur pleine réussite future, et donc agir en parallèle sur la réduction massive et rapide des émissions brutes pour sécuriser la transition.



Capacité des puits comparée aux émissions brutes actuelles en MtCO_{2e} par niveau de réussite de leur préservation



— Réussite basse — Réussite intermédiaire — Réussite haute

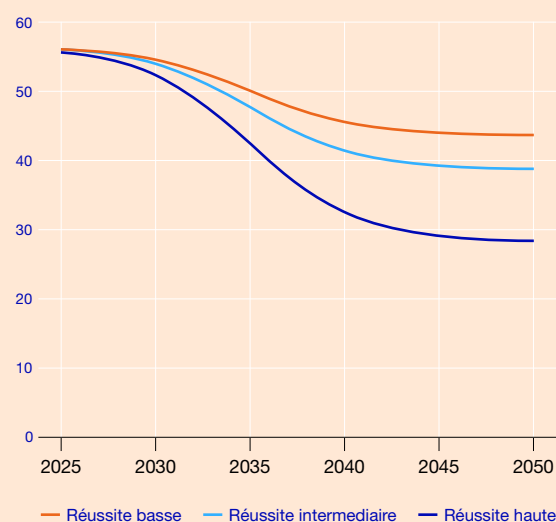


Il est nécessaire de réduire significativement les émissions de GES non-énergétiques pour atteindre la neutralité carbone. Cela nécessite une transformation importante de certaines pratiques agricoles et de certains procédés industriels. La réussite partielle, ou l'échec de ces transformations laisserait un talon important d'émissions à long terme, qui ne pourraient être compensées que par des puits incertains.

Les émissions de GES non-énergétiques englobent principalement les émissions de méthane (élevage bovin) et de protoxyde d'azote (épandage d'engrais) de l'agriculture et les émissions de procédés de l'industrie (réactions chimiques pour produire de l'acier ou du ciment, par exemple).

La réduction du cheptel bovin – sélective, pour favoriser l'élevage en prairies, et la réduction de l'usage des engrais azotés – notamment permise par le déploiement des légumineuses, sont cruciales pour baisser les émissions de méthane et de protoxyde d'azote. La réduction forte du cheptel bovin mise en scène dans la trajectoire de réussite haute a pour contrepartie une évolution vers un régime alimentaire sensiblement moins carné.

Emissions de méthane (CH₄) et de protoxyde d'azote (N₂O) françaises (MtCO₂e) selon le niveau de réussite des chantiers élevage et azote

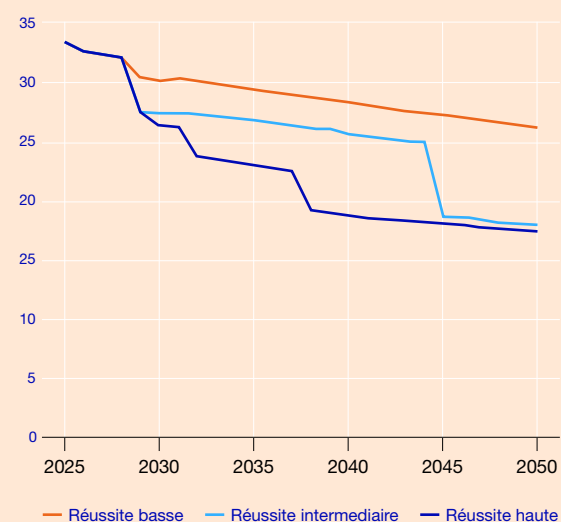


Dans la réduction des émissions de procédés de l'industrie (essentiellement dans les secteurs de l'acier, du ciment, de la chimie), le succès du chantier de production d'acier bas carbone est crucial. Au global, les émissions peuvent être divisées par 2, en tenant compte de la maîtrise des volumes de produits avuls (construction neuve de logements, production de véhicules, engrais...) et des efforts d'efficacité matière (moins de ciment dans le béton par exemple).

Par ailleurs, le succès du déploiement de la capture et séquestration de carbone sur les sites industriels dont les procédés carbonés n'ont pas d'alternative (production de ciment par exemple) permettrait une réduction des émissions de 3 MtCO₂/an à l'horizon 2050.

Les émissions non énergétiques résiduelles qui ne peuvent ni être réduites par des évolutions de pratiques agricoles ou par un changement de procédé industriel, ni être captées par du CCS, sont difficilement compressibles. Elles ne peuvent être compensées que par les puits de carbone naturels et (dans une moindre mesure) technologiques. Or le niveau de ces puits à 2050 est incertain.

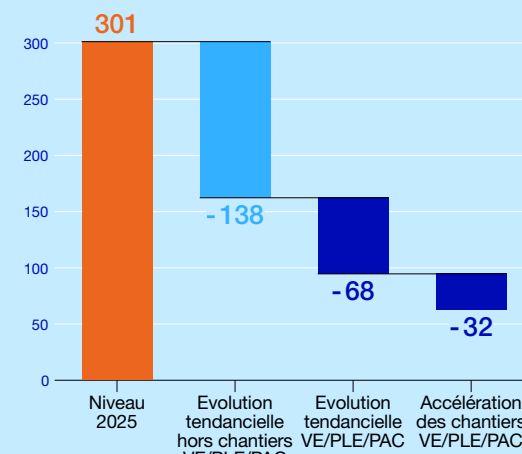
Emissions de procédés industrielles (MtCO₂e) incluant émissions énergétiques hauts-fourneaux selon le niveau de réussite du chantier acier



L'électrification massive des usages (transports, bâtiments, industrie) est incontournable pour une décarbonation poussée de l'économie française. Elle est conditionnée à une transformation rapide des équipements (véhicules, chauffages, procédés industriels).

La décarbonation de l'économie se jouera au premier ordre sur l'électrification large et rapide des équipements : véhicules routiers électriques, pompes à chaleur, procédés industriels à l'électricité ou à l'hydrogène lui-même produit à partir d'électricité. La trajectoire de baisse des émissions sera directement fonction du niveau de réussite atteint sur l'électrification des équipements.

Réduction des émissions de CO₂ énergétiques (MtCO₂) entre 2025 et 2050, due à 3 chantiers d'électrification majeurs : voitures électriques (VE), poids lourds électriques (PLE), pompes à chaleur (PAC)



La seule électrification des voitures, des camions et des systèmes de chauffage (par la pompe à chaleur) permet de réduire d'un tiers les émissions de CO₂ dues à la combustion d'énergies fossiles, d'ici 2050. Elle permet également de réduire drastiquement la dépendance des transports et du logement à ces énergies.

Mais l'électrification inclut aussi le recours à l'hydrogène électrolytique, comme pour la production de carburants de synthèse (e-fuels) ou pour la production d'ammoniac et d'engrais bas carbone. Elle inclut également un ensemble de leviers « hors-chantier » : électrification des bus et autocars, des motos, etc. Nous n'avons pas évalué l'effet de ces leviers séparément.



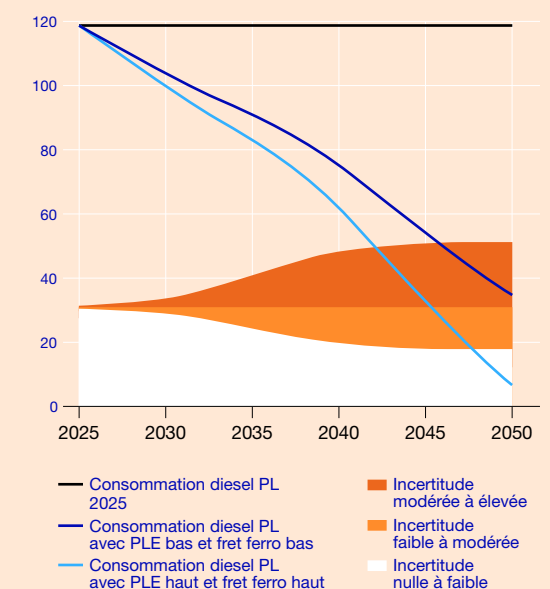
Pour sécuriser la décarbonation, il faut : réduire très fortement la consommation totale de gaz et de carburants liquides, via les chantiers d'électrification et de maîtrise de la consommation ; développer les bioénergies, mais de manière limitée pour en éviter les contreparties agroécologiques et agronomiques ; développer les e-fuels, mais de manière très limitée pour sécuriser l'électrification.

Une forte réduction de la consommation totale de gaz et de carburant liquide est nécessaire. Les consommations actuelles de gaz et de diesel sont 3 à 4 fois supérieures à ce qui pourrait être produit à partir de biomasse (biogaz, biodiesel) en France.

De fortes réductions de consommation, par l'électrification et la maîtrise de la consommation, sont possibles. Pour le gaz, la réduction ne serait pas tout à fait suffisante pour que le déploiement maximal du biogaz couvre la consommation. Pour le diesel, la réduction serait largement suffisante (voir figure), sauf à rater l'électrification des camions et la relance du fret ferroviaire. Quant au biokérosène (bioSAF), associé au e-kérosène (eSAF), ils permettent de couvrir la consommation seulement si le trafic aérien est réduit d'ici 2050.

Les filières bioénergies doivent être déployées de manière limitée. Le fort déploiement des filières de production des bioénergies impose de fortes contreparties agroécologiques (surexploitation des sols, occupation de surfaces agricoles dédiées à l'alimentation).

Production biogazole espérée (TWh) par niveau d'incertitude





L'électrification des équipements va nécessiter une forte hausse de la production électrique bas-carbone française. Sécuriser cette électrification demande de réaliser simultanément les chantiers du nucléaire et des énergies renouvelables, et de maîtriser la consommation d'électricité.

L'électrification des équipements va induire une forte hausse de la consommation d'électricité. Cette hausse peut toutefois être limitée par une maîtrise de la consommation d'énergie. Elle nécessitera dans tous les cas une hausse de la production d'électricité.

La réussite des différents chantiers de maîtrise de la consommation retenus dans cette étude (dont la base de travail contient déjà des hypothèses de maîtrise de la consommation) permet d'éviter 130 TWh de consommation électrique à l'horizon 2050, ce qui réduira d'autant les potentielles tensions sur l'approvisionnement électrique à moyen et long terme. Cette maîtrise limite le risque de devoir arbitrer entre les usages traditionnels de l'électricité (éclairage, électroménager, chauffage...), les usages futurs issus de l'électrification (véhicules, PAC, procédés industriels), ou d'autres usages futurs (par exemple, numériques).

Mener simultanément les chantiers du nucléaire et les chantiers des EnR sécurise l'adéquation production-consommation électrique.

- Renoncer aux chantiers du nucléaire, c'est risquer de manquer d'électricité française bas-carbone dans la décennie 2040 et au-delà, même si le déploiement des EnR réussit fortement.
- Renoncer aux chantiers des EnR c'est risquer de manquer d'électricité française bas-carbone dès la décennie 2030, même si le chantier nucléaire réussit pleinement le maintien du parc historique et le lancement des EPR2.
- Maîtriser notre consommation d'électricité sécurise l'électrification face aux aléas sur les filières de production électrique. Elle limite les risques de conflit d'usage de l'électricité, en particulier les risques de devoir arbitrer entre l'électrification et d'autres usages.

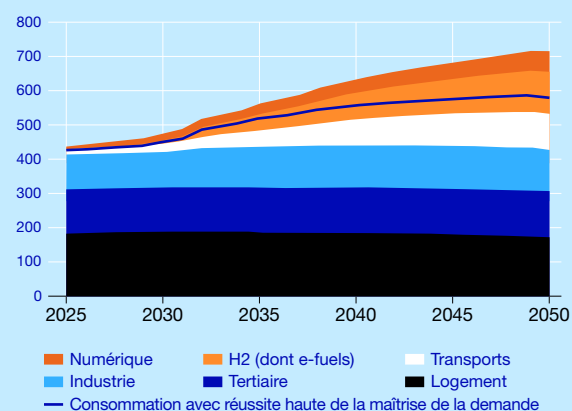
Nous avons simulé trois trajectoires de production électrique.

Elles mettent en scène un cas où la France décide dès aujourd'hui de miser sur les chantiers nucléaires et EnR, un cas où elle déciderait de ne miser que sur le nucléaire, et un cas où elle déciderait de ne miser que sur les EnR.

Nous avons croisés ces trajectoires avec celles de la consommation d'électricité (réussite des chantiers d'électrification avec ou sans maîtrise de la consommation).

L'électrification induit une hausse de la consommation électrique. La production française actuelle, bien qu'excédentaire, ne suffira plus à couvrir l'électrification d'ici 10 ans. Au-delà, le niveau de production doit augmenter pour permettre l'électrification. Cette hausse devrait être plus importante encore dans une optique de forte réindustrialisation et/ou en intégrant d'autres secteurs non-étudiés ici tel que le maritime – qui pourrait

Consommation électrique (TWh) avec réussite haute des chantiers d'électrification et réussite basse des chantiers de maîtrise de la consommation



aussi avoir besoin de carburants de synthèse. Pour rehausser le niveau de production, il faut à la fois compenser la fin de vie des centrales existantes au cours de la trajectoire, et ajouter des moyens de production supplémentaires.

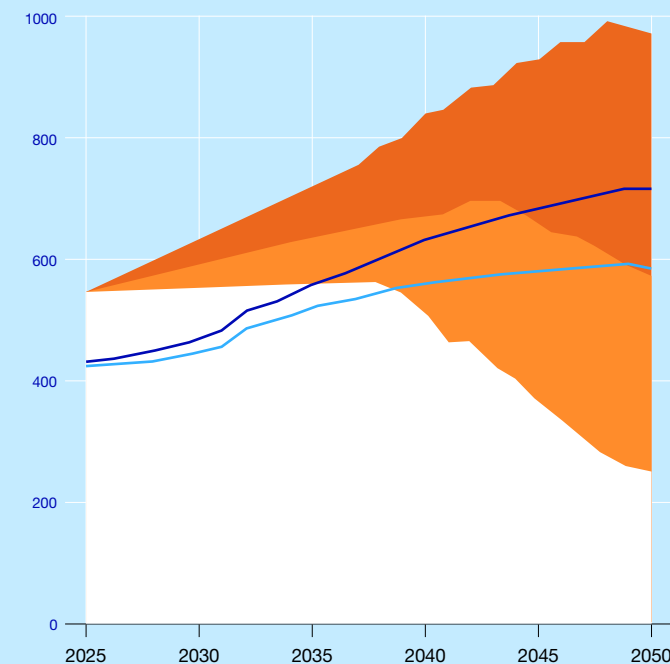
Soutenir l'ensemble des chantiers de production électrique (figure du haut) sécurise autant que possible la production (c'est sur la figure du haut que la production a le plus de chances d'être élevée). Mais ce soutien à toutes les filières ne garantit pas entièrement que la production sera suffisante en 2050 : les chantiers ne délivreront peut-être pas au rythme espéré (à visualiser comme une baisse au sein de la zone orange foncé, voire passage dans la zone orange clair, etc., dans la figure du haut).

Le renoncement au nucléaire (pas de prolongation au-delà de 60 ans, et pas d'EPR2, figure du milieu) fait décliner la production nucléaire française d'environ 280 TWh d'ici 2050. Cela mène à un manque d'électricité française bas-carbone dans la décennie 2040 et au-delà, même si les EnR réussissent fortement leur déploiement (soit 350 TWh d'EnR en 2050 dans notre exercice). Le volume manquant augmente si les chantiers EnR ne délivrent pas au rythme escompté. Il diminue si la consommation d'électricité est davantage maîtrisée.

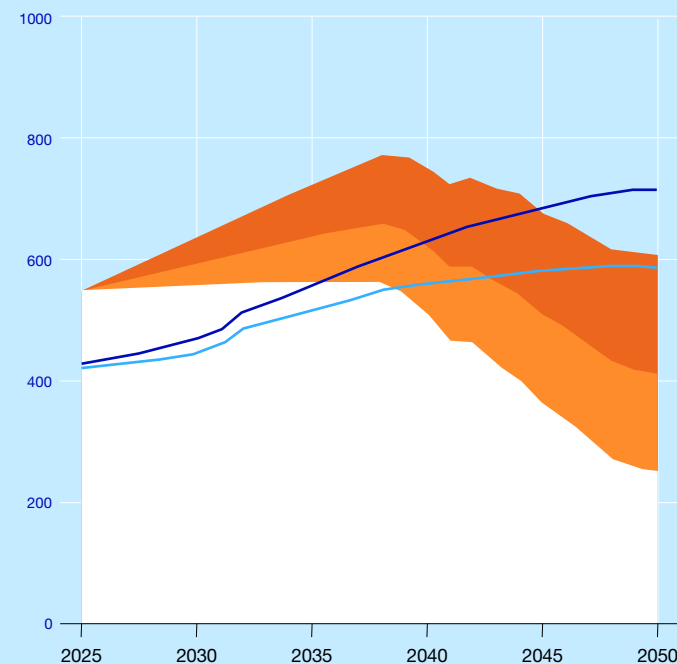
Le renoncement aux EnR fait porter toute la charge sur le nucléaire (figure du bas). Or, une réussite complète des chantiers nucléaires n'augmente la production que de 100 TWh en 2050, par rapport à aujourd'hui, production qui amorce un déclin après 2050. Elle ne permet pas de couvrir l'électrification escomptée des équipements. Renoncer au déploiement des EnR c'est risquer de manquer d'électricité française bas-carbone, dans la décennie 2030. Le risque, et le volume manquant associé, augmentent au cours de la décennie 2040, et est fonction de la réussite des chantiers nucléaires. Le risque diminue si la consommation d'électricité est davantage maîtrisée.

Note : le prolongement du nucléaire existant réduit significativement le risque de manque et donne plus de temps aux EnR pour se déployer, mais fait fortement reposer la réussite de l'électrification sur ce prolongement et sur un déploiement sans faille des EnR.

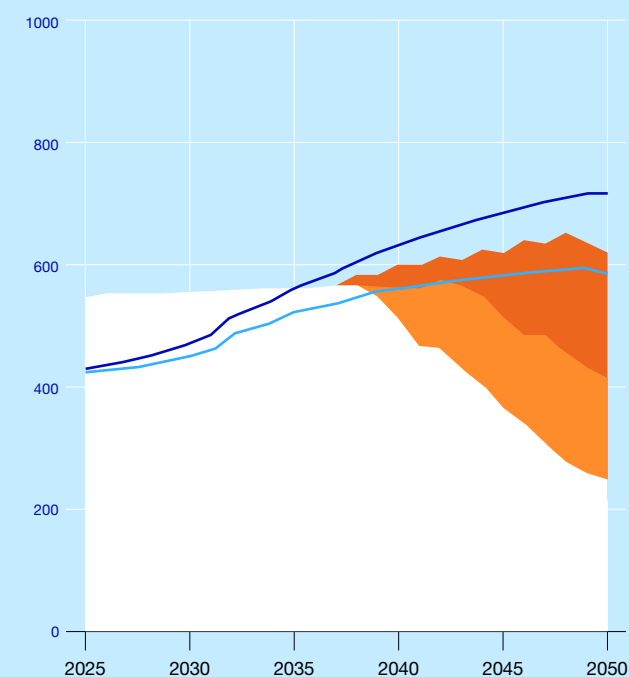
Production espérée (TWh) par niveau d'incertitude si la France vise le plein déploiement des chantiers nucléaire et EnR



Production électrique espérée par niveau d'incertitude (TWh) si la France renonce au nucléaire et vise le plein déploiement des EnR



Production électrique espérée par niveau d'incertitude (TWh) si la France renonce aux EnR et vise le plein déploiement du nucléaire



Ces figures représentent la production électrique espérée par niveau d'incertitude, en supposant que la France décide aujourd'hui soit de mener tous les chantiers EnR et nucléaire (figure du haut), soit seuls les chantiers EnR (milieu), soit seuls les chantiers nucléaire (bas). Les niveaux d'incertitude sont indicatifs et correspondent à la réussite totale de tous les chantiers lancés pour le haut de la zone orange foncé, la réussite partielle de tous les chantiers lancés pour le haut de la zone orange, et l'échec total des chantiers pour le haut de la zone blanche. Par exemple, on peut lire sur la figure du haut que, si la France décide de mener dès aujourd'hui l'ensemble des chantiers EnR et nucléaires, produire 600 TWh d'électricité en 2050 est modérément incertain. On peut également lire que réussir tous les chantiers simultanément mène à une production de presque 1000 TWh, mais que cela est hautement incertain. Des rythmes de déploiement inférieurs à ceux espérés mèneraient à des courbes plus bas dans la zone orange foncé, voire dans la zone orange etc.

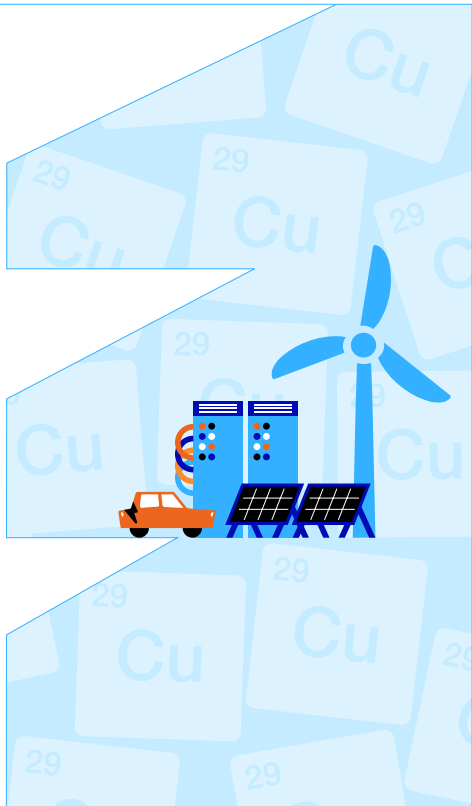
Incertitude modérée à élevée
 Incertitude faible à modérée
 Incertitude nulle à faible
 Consommation avec réussite haute + réussite basse maîtrise consommation
 Consommation avec réussite haute + réussite haute maîtrise consommation

Nos enseignements clés sur la consommation de cuivre

■■■■■

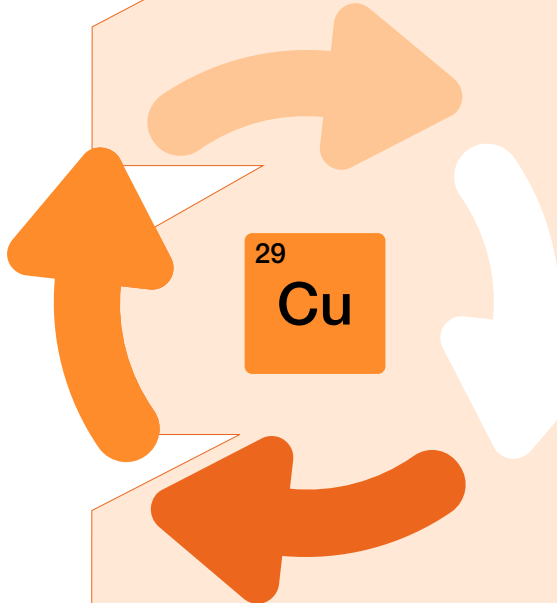
L'électrification des véhicules routiers et, dans une moindre mesure, l'augmentation de la capacité de production électrique et le déploiement des centres de données, sont les plus gros contributeurs à la consommation de cuivre au cours de la décarbonation.

Certains équipements clés de l'électrification (véhicules électriques et leurs batteries, infrastructures de production électrique renouvelable), contiennent du cuivre. Leur déploiement rapide et massif, qui aura lieu au cours de la prochaine décennie en cas d'accélération de l'électrification, contribue à augmenter significativement la consommation de cuivre de la France. Sur la même période, un déploiement raisonné des centres de données sur le territoire français (pour y accueillir les usages français) ou leur déploiement non maîtrisé, contribuera aussi à l'augmentation significative de la consommation de cuivre.



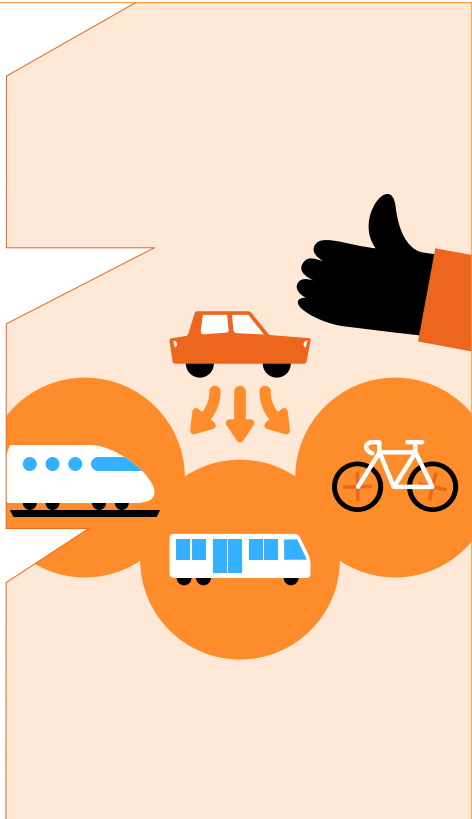
La quantité de cuivre recyclable est structurellement limitée à court terme et dépend du rythme de la transition. Les capacités industrielles de recyclage au niveau européen devront suivre ce rythme.

Le recyclage du cuivre contenu dans les produits en fin de vie ne peut couvrir qu'une part limitée des besoins en cuivre à court terme, en raison de l'inertie des parcs d'équipements en contenant. Une électrification rapide entraîne un besoin accru de cuivre primaire sur la période 2025-2035 pour l'incorporer dans des équipements qui resteront sur le territoire français, avant de générer des volumes recyclables significatifs à partir du milieu des années 2040, lorsque ces équipements arriveront en fin de vie.

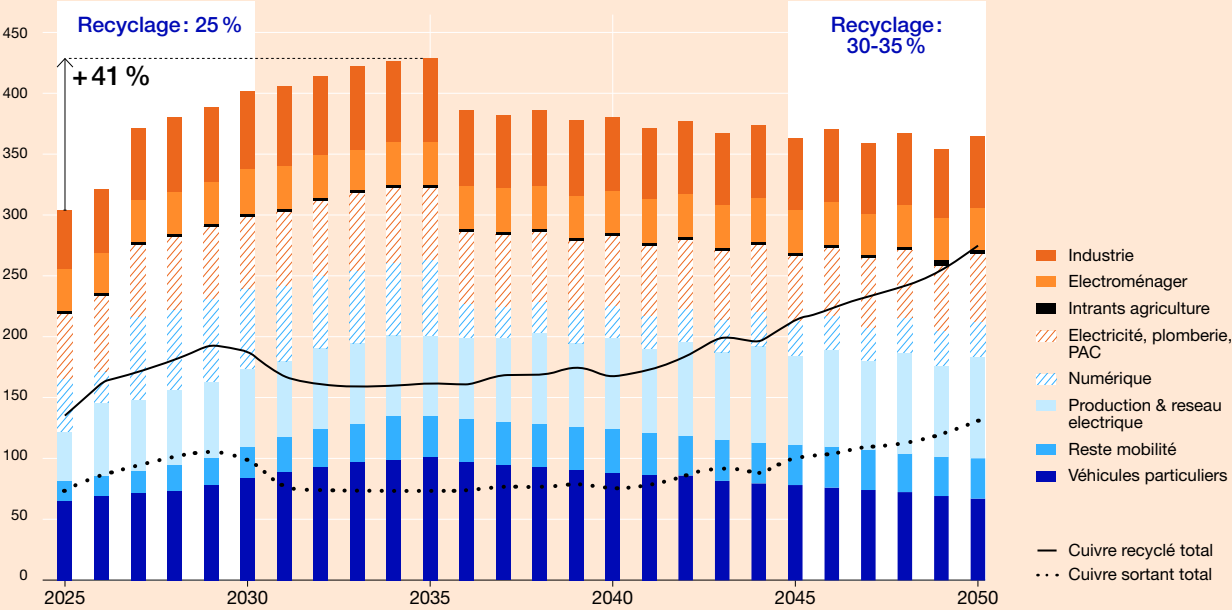


Limitier la consommation de cuivre, par exemple par les reports modaux de la voiture vers le train, les transports en commun et le vélo, par une maîtrise de la taille des voitures et par la maîtrise du développement des centres de données, contribue à sécuriser la nécessaire électrification des équipements.

La période 2025-2035 est la plus critique pour la consommation de cuivre en cas de réussite des chantiers d'électrification et de déploiement des EnR électriques. Ainsi, une contrainte d'approvisionnement en cuivre sur cette période – annoncée par l'AIE, risquerait de ralentir ces chantiers. Pour sécuriser l'électrification, il est nécessaire de maîtriser la consommation de cuivre, ce que permettent les chantiers de maîtrise de la consommation électrique : reports modaux de la voiture vers le vélo, les transports en commun et le train, maîtrise de la taille des voitures électriques.



Consommation annuelle de cuivre (en kt) dans la trajectoire de réussite complète des chantiers retenus



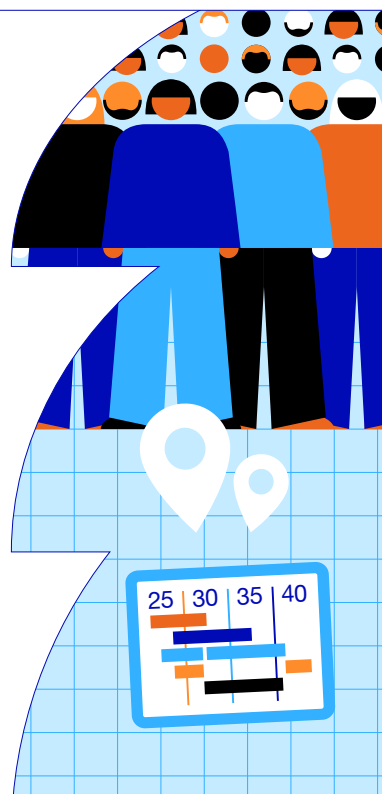
Nos enseignements clés sur les besoins en emploi et formation

■■■■■

1

La décarbonation ne se fera pas sans formation

- L'ensemble des métiers est concerné à des degrés variables : pour certains comme les mécaniciens automobiles, c'est une forte transformation des activités qui nécessite l'apprentissage de nouvelles techniques. Mais pour les 30 millions d'actifs, et les centaines de milliers de jeunes qui entrent dans la vie professionnelle chaque année, la formation permet de s'approprier les enjeux de la transition dans leur domaine, et de faire évoluer leur métier en adoptant de nouvelles manières de concevoir des produits, de s'approvisionner, de gérer des risques...
- Pour sécuriser les besoins de recrutement de demain, les formations déployées doivent être adaptées aux besoins de chaque territoire.
- Cela demande d'agir dès à présent : il faut au moins 2 ans pour créer des formations continues et jusqu'à 10 ans pour faire évoluer les diplômes et orienter les collégiens vers ces filières, dont certaines souffrent de taux d'abandons élevés : dans le bâtiment par exemple, 7 jeunes formés sur 10 ne s'insèrent pas dans le domaine après leur formation.



3

La décarbonation entraîne aussi des suppressions d'emploi dans certains secteurs

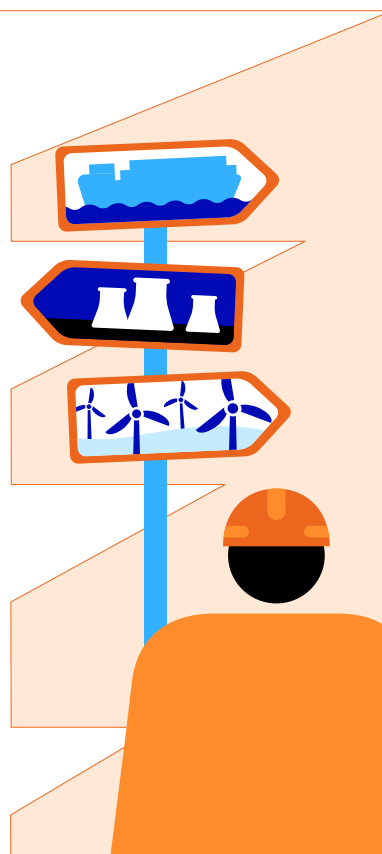
- Ceci nécessite d'ouvrir le dialogue sans tabou entre représentants des salariés et des employeurs, pour projeter les évolutions d'activité et leur conséquence sur les emplois au niveau de chaque entreprise et de chaque filière. Par exemple, la réduction du transport aérien, nécessaire pour sa décarbonation, représente une baisse de 54 % de l'emploi d'ici 25 ans.
- Anticiper suffisamment ces évolutions permet de réduire les licenciements, comme c'est le cas pour les chauffeurs poids-lourds dont plus d'un quart partiront en retraite dans la prochaine décennie, ce qui permet d'amortir la baisse des effectifs liée à celle des volumes transportés.
- L'Etat et les services locaux de l'emploi et les réseaux de formation sont en appui pour impulser et accompagner des reconversions réussies vers des secteurs plus durables en croissance.



2

La décarbonation nécessite des centaines de milliers d'emplois supplémentaires dans des secteurs clés tels que la rénovation des bâtiments, le ferroviaire, la production d'électricité

- Les profils à recruter sont principalement dans les catégories d'ouvriers et de techniciens, dont l'attractivité est souvent insuffisante. Il faut donc améliorer la qualité de ces emplois en tension en proposant de meilleures conditions pour attirer et fidéliser les professionnels.
- Différents secteurs sont en concurrence pour une partie de ces profils en pénurie : électriciens, soudeurs, personnels de chantiers... Des arbitrages sont nécessaires pour assurer que les secteurs de la décarbonation puissent recruter : sécuriser les débouchés économiques et donc la création d'emplois de qualité, sécuriser les investissements en formation, et limiter la concurrence des secteurs carbonés, pour faire en sorte qu'être soudeur pour un parc éolien soit plus accessible et désirable qu'être soudeur pour construire des bateaux de croisière.
- Nombre de ces emplois offrent aussi un fort potentiel de reconversion et d'insertion pour des personnes éloignées de l'emploi, sous réserve d'un accompagnement formateur.



Ces 3 enjeux nécessitent de planifier dès maintenant les évolutions nécessaires de la formation pour répondre aux besoins pressants de recrutement de demain, en considérant le temps long et en coopérant dans les filières et sur les territoires.



The Shift Project est un groupe de réflexion qui vise à éclairer et influencer le débat sur les défis climat-énergie.

Nous sommes une association d'intérêt général. Nos membres financeurs sont pour la plupart des entreprises. Guidé par l'exigence de rigueur scientifique et technique, notre regard sur l'économie est avant tout physique et systémique.

www.theshiftproject.org

Graphisme

Jérémy Garcia Zubialde

Contacts

Clément Caudron

Chef de projet Transition Robuste
clement.caudron@theshiftproject.org

Nicolas Raillard

Coordinateur Transition Robuste
nicolas.raillard@theshiftproject.org

