

DÉCARBONATION, SÉCURITÉ ÉNERGÉTIQUE ET SOBRIÉTÉ : COMMENT LA FRANCE PEUT-ELLE ATTEINDRE SES OBJECTIFS D'ICI À 2030 ?

Les mesures clés à prendre pour le déploiement à grande
échelle de 16 technologies stratégiques

Une étude de Capgemini Invent, avec le soutien de Breakthrough Energy et
la participation de Cleantech for France, à destination des décideurs français

EXECUTIVE SUMMARY

Alors que l'urgence climatique n'a jamais été aussi forte, la crise ukrainienne et la mise sous tension de la filière nucléaire française (problèmes de corrosion et opérations de maintenance) ont de fortes répercussions sur les marchés de l'énergie et l'économie, provoquant la flambée des prix du gaz et de l'électricité sur les marchés de gros depuis le début de l'année.

Si un plan de sobriété national est en train d'être déployé par le ministère de la Transition énergétique pour faire face à la crise à court terme, notamment en matière d'économies d'énergies des entreprises, il est nécessaire de préparer la suite pour répondre aux défis économiques, sociaux et climatiques de plus long terme. Des décisions stratégiques et ciblées doivent être actées à court terme, lors de l'examen à l'automne 2022 du projet de loi relatif à l'accélération des énergies renouvelables, et de manière générale lors de la décennie actuelle pour atteindre la neutralité carbone d'ici à 2050, en s'appuyant sur les instruments et investissements du plan France 2030 (54 milliards d'euros, dont 34 milliards d'euros de nouveaux crédits, à mobiliser sur 5 ans).

Au-delà de ce soutien financier public conséquent, des mesures clés sont à prendre dès aujourd'hui pour encourager à davantage investir dans les nouvelles technologies ayant un fort potentiel de réduction des émissions de gaz à effet de serre (*cleantechs*) et permettre leur passage à l'échelle. En particulier, si l'investissement en capital-risque (de l'amorçage à la croissance) dans les *cleantechs* a été multiplié par 4 sur les cinq dernières années en France, atteignant 1,9 milliards d'euros en 2021, seul 1% était destiné à l'innovation dans des secteurs de l'industrie lourde que sont les matériaux et la chimie.

Dès lors, pour **contribuer au double objectif d'innovation et d'industrialisation de France 2030**, ce document de synthèse, ainsi que les fiches détaillées qui lui sont associées, font **l'état des lieux des forces et faiblesses de la France aujourd'hui sur 16 technologies sélectionnées**. L'étude formule également des **recommandations sur les actions stratégiques à engager pour favoriser le déploiement de ces technologies d'ici à 2030**.

Ces technologies ont été sélectionnées en raison de leur fort **potentiel de décarbonation à 2030** mais également, en majorité, pour leur contribution directe à l'accroissement de la sécurité énergétique de la France – *via* notamment une substitution aux combustibles fossiles, une réduction de la consommation énergétique et la réindustrialisation des territoires.

Le déploiement à grande échelle de ces technologies permettrait d'éviter par an 15 % des émissions de CO2 et 16 % de gaz consommé en 2030.

Au même titre que le choc pétrolier de 1973 a amorcé l'investissement dans les renouvelables, la crise actuelle doit servir de point d'inflexion dans le rythme de déploiement des mesures et le passage à l'échelle d'une industrie française renouvelée, articulée autour des objectifs de neutralité carbone et d'autonomie stratégique.

Plus récemment, les principes de l'initiative *Operation Warp Speed* pour le développement des vaccins contre la Covid-19 peuvent servir d'inspiration face à l'ampleur du défi : des moyens à la hauteur de résultats précis et attendus, un développement agile, des partenariats public-privés, un alignement des intérêts et une diversification des solutions explorées.

Il en va de l'indépendance stratégique française et européenne et de l'avenir de notre planète.

PRÉSENTATION DES PRINCIPAUX RÉSULTATS DE L'ÉTUDE

TECHNOLOGIE	ATOUTS DE LA FRANCE	PRINCIPALES BARRIÈRES ACTUELLES	MESURES À PRENDRE DÈS AUJOURD'HUI	EMISSIONS DE CO2EQ ÉVITÉES D'ICI 2030 (Millions de tonnes)
ELECTRIFICATION STABLE ET BAS CARBONE				
Solaire nouvelle génération (technologie hétérojonction et tandem)	<ul style="list-style-type: none"> Clusters et programmes de recherche phares (IPVF, INES-CEA) Technologies hétérojonction et tandem déjà développées en France 	<ul style="list-style-type: none"> Manque de partenaires industriels pour passer à l'échelle les projets de R&D Faible protection face à une concurrence internationale agressive 	<ul style="list-style-type: none"> Mobilisation d'un écosystème qui couvre l'ensemble de la chaîne de valeur Accroissement des capacités de production pour soutenir le passage à l'échelle 	1,4 Mt pour la filière solaire française dont 0,07 Mt par les technologies solaires nouvelle génération
Éolien flottant	<ul style="list-style-type: none"> 2ème gisement européen pour l'éolien en mer Chaîne de valeur déjà structurée et les acteurs français y occupent une place prépondérante 	<ul style="list-style-type: none"> Manque de compétitivité (LCOE élevé vs. solaire et éolien terrestre) Régime d'autorisations fastidieux 	<ul style="list-style-type: none"> Planification précise des appels d'offres des futurs parcs Simplification des procédures de permis (permitting) Renforcement des capacités industrielles et portuaires 	0,2 Mt
Réseaux électriques	<ul style="list-style-type: none"> Filière française en avance sur ses voisins européens et mondiaux avec des acteurs présents à l'international Ecosystème développé de sous-traitants, qui se structure 	<ul style="list-style-type: none"> Soutien public insuffisant par rapport aux investissements nécessaires Interconnexions congestionnées Existence et prévision de métiers en tension 	<ul style="list-style-type: none"> Instauration de nouveaux mécanismes tarifaires Mise en œuvre d'une refonte organisationnelle 	Technologies de support à la décarbonation du mix
Stockage d'électricité stationnaire de longue durée	<ul style="list-style-type: none"> Acteurs français innovants qui se positionnent Opportunité pour les zones non interconnectées (ZNI), notamment les territoires ultramarins (17 % de la surface terrestre française) 	<ul style="list-style-type: none"> Engagement gouvernemental modéré Modèle économique peu sécurisant Financements dilués 	<ul style="list-style-type: none"> Définition d'un cadre législatif et réglementaire clair Mise en place des conditions économiques et financières favorables 	Technologies de support à la décarbonation du mix

TECHNOLOGIE	ATOUTS DE LA FRANCE	PRINCIPALES BARRIÈRES ACTUELLES	MESURES À PRENDRE DÈS AUJOURD'HUI	EMISSIONS DE CO2EQ ÉVITÉES D'ICI 2030 (Millions de tonnes)
SÉCURISATION DES APPROVISIONNEMENTS STRATÉGIQUES				
Carburants durables (biocarburants avancés et e-fuels)	<ul style="list-style-type: none"> • Avance technologique sur les biocarburants avancés et écosystème de production développé • Ressources locales disponibles en France pour développer les biocarburants avancés 	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilité des intrants (hydrogène décarboné, gisement de CO2 capté) • Insuffisance des financements publics par rapport aux investissements nécessaires • Manque de compétitivité à l'international 	<ul style="list-style-type: none"> • Mise en place de contrats carbone pour différence (CCfD) • Renforcement des aides financières • Adaptation du système européen d'échange de quotas d'émissions 	7 Mt
Électrolyseurs (focus alcalin et proton exchange membrane)	<ul style="list-style-type: none"> • Mix électrique décarboné à 93% actuellement pour produire de façon maîtrisée et économique • Tissu industriel solide pour le développement de la filière 	<ul style="list-style-type: none"> • Risque de disponibilité insuffisante d'électricité décarbonée d'ici à 2030 au regard de l'électrification croissante des usages • Manque de compétitivité (prix de l'hydrogène lié au prix de l'électricité) 	<ul style="list-style-type: none"> • Sécurisation des approvisionnements en électricité bas carbone • Adaptation de la réglementation au développement de la filière • Stimulation de la demande 	6 Mt
Batteries Li-ion (ou équivalent compétitif pour les véhicules électriques)	<ul style="list-style-type: none"> • Le mix électrique français limite l'impact carbone des batteries • Forte activité de recherche appliquée pour développer le recyclage des batteries (taux de recyclage aujourd'hui de 50%) pour sécuriser les approvisionnements en ressources critiques 	<ul style="list-style-type: none"> • Pénurie de compétences en électrochimie • Fragilités sur l'approvisionnement en ressources et outillages 	<ul style="list-style-type: none"> • Massification des programmes de formation • Définition d'une stratégie d'attractivité territoriale • Développement de technologies de recyclage du lithium 	2,5 Mt
Fertilisants organiques et biostimulants	<ul style="list-style-type: none"> • Expertise forte de la France, 1er producteur européen de biostimulants (29% de la production en valeur en Europe en 2020) 	<ul style="list-style-type: none"> • Temps de mise sur le marché des nouveaux produits long • Manque de compétences chez les distributeurs • Gisements de biomasse insuffisants 	<ul style="list-style-type: none"> • Renforcement des compétences des distributeurs • Facilitation des Autorisations de AMM (Autorisations de Mise sur le Marché) • Sécurisation des intrants 	1,3 Mt

TECHNOLOGIE	ATOUS DE LA FRANCE	PRINCIPALES BARRIÈRES ACTUELLES	MESURES À PRENDRE DÈS AUJOURD'HUI	ÉMISSIONS DE CO2EQ ÉVITÉES D'ICI 2030 (Millions de tonnes)
EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE ET SOBRIÉTÉ				
Pompes à chaleur (PAC) aérothermiques, hybrides, géothermiques de surface	<ul style="list-style-type: none"> Filière des PAC dynamique et alignée aux objectifs fixés (demande en croissance, technologie maîtrisée en France, production de PAC air/eau et géothermique majoritairement française / européenne) Leader (2ème position) sur le marché européen des PAC aérothermiques en opération 	<ul style="list-style-type: none"> Faible structuration de la filière Manque de compétences sur certains métiers en tension 	<ul style="list-style-type: none"> Mise en place d'un programme de formation attractif Structuration des acteurs avec un positionnement sur les nouveaux marchés Elargissement des mécanismes de soutien public 	12,1 à 19,4 Mt
Réseaux de chaleur et de froid	<ul style="list-style-type: none"> Savoir-faire technologique français maîtrisé sur l'ensemble de la chaîne de valeur Potential de développement considérable sur tout le territoire 	<ul style="list-style-type: none"> Coûts d'investissement importants Manque de financement Absence de visibilité sur les gains procurés 	<ul style="list-style-type: none"> Campagne d'information pour communiquer sur les atouts socio-économiques et environnementaux des réseaux de chaleur et de froid Renforcement des financements (augmentation de la dotation annuelle du Fonds Chaleur) Facilitation de la procédure de classement des réseaux et réalisation et actualisation des schémas directeurs tous les 10 ans 	7,7 Mt
Rénovation profonde des bâtiments tertiaires	<ul style="list-style-type: none"> Potential de réduction des GES considérable, et encore davantage si combinée avec d'autres technologies (PAC) Nombreux dispositifs de financement et d'accompagnement 	<ul style="list-style-type: none"> Infrastructure inadaptée à la standardisation : filières des matériaux bas carbone se structurent difficilement. Manque d'usines de panneaux modulaires) Pénurie de main d'œuvre qualifiée et certifiée Reconnu Garant de l'Environnement (RGE) 	<ul style="list-style-type: none"> Mise en place d'un guichet unique d'aides publiques Recours massif aux CPE (Contrats de Performance Énergétique) Standardisation de la rénovation profonde 	7,4 Mt
Recyclage chimique des plastiques	<ul style="list-style-type: none"> Activité de recherche dynamique : 2ème place européenne en matière de recherche sur les plastiques Forte attractivité de la France (Choose France 2022) 	<ul style="list-style-type: none"> Difficulté d'accès au gisement de matières à recycler Manque de reconnaissance du recyclage chimique 	<ul style="list-style-type: none"> Développement de nouvelles filières de tri et de collecte Modernisation des centres de recyclage Adaptation réglementaire 	1,8 Mt

TECHNOLOGIE	ATOUTS DE LA FRANCE	PRINCIPALES BARRIÈRES ACTUELLES	MESURES À PRENDRE DÈS AUJOURD'HUI	EMISSIONS DE CO2EQ ÉVITÉES D'ICI 2030 (Millions de tonnes)
DÉCARBONATION DES PRINCIPAUX ÉMETTEURS DE L'INDUSTRIE				
Acier décarboné	<ul style="list-style-type: none"> Fort engagement de l'état avec des financements adéquats Deux projets d'envergure annoncés pour faire de la France un leader européen du DRI – hydrogène 	<ul style="list-style-type: none"> Insuffisance de mesures réglementaires incitatives Forte dépendance vis-à-vis des capacités d'hydrogène bas carbone disponibles 	<ul style="list-style-type: none"> Attribution de contrats carbone pour différence (CCFD) Instauration d'un taux minimum d'acier décarboné dans les produits finis Adaptation du réseau électrique 	9,0 Mt
Combustibles alternatifs : biomasse solide et CSR (Combustibles Solides de Récupération)	<ul style="list-style-type: none"> Nombreux acteurs français répartis sur l'ensemble du territoire Soutien financier étatique important ciblé sur la production de chaleur 	<ul style="list-style-type: none"> Cadre réglementaire strict sur l'origine et la qualité des intrants Compétition d'usages au niveau des ressources 	<ul style="list-style-type: none"> Structuration des réseaux locaux Etablissement de partenariats entre fournisseurs et industriels 	3,5 Mt
Alternatives au clinker et CCUS (Carbon Capture Utilisation & Storage) pour le ciment	<ul style="list-style-type: none"> Savoir-faire historique (invention du ciment historique en 1817 par Louis Vicat) Plusieurs entreprises françaises proposent des alternatives au clinker avec des performances techniques et environnementales élevée 	<ul style="list-style-type: none"> Nature des subventions inadéquate Cadre normatif conservateur et lent à faire évoluer, bloquant le déploiement d'alternatives Viabilité économique du CCUS à démontrer 	<ul style="list-style-type: none"> Adaptation des financements pour soutenir les premiers projets commerciaux Adaptation et accélération de l'évolution des normes Encouragement des initiatives de taxation du carbone 	2,9 Mt
Bétons biosourcés	<ul style="list-style-type: none"> Matières premières utilisées variées et présentes en grand nombre sur le territoire français grâce à l'importance de son gisement agricole : position privilégiée pour le déploiement des bétons biosourcés 	<ul style="list-style-type: none"> Complexité du cadre normatif Subventions sporadiques et diluées Faible accompagnement opérationnel 	<ul style="list-style-type: none"> Intégration aux techniques courantes Projections des volumes et subventions requis Accompagnement à l'évolution des compétences Développement de l'accès aux matières premières Révision du cadre normatif 	0,3 Mt

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	4
Un contexte évolutif en France et en Europe	4
Les atouts de la France	5
16 technologies clés pour les ambitions climatiques de la France	6
CONCILIER POUR LA FRANCE OBJECTIFS CLIMATIQUES, SÉCURITÉ ÉNERGÉTIQUE ET SOBRIÉTÉ D'ICI À 2030	10
Les technologies au service d'une électrification stable et bas carbone	11
Les technologies au service d'une sécurisation des approvisionnements stratégiques	12
Les technologies au service de l'efficacité énergétique, de la sobriété	12
Les technologies au service de la décarbonation des principaux émetteurs de l'industrie	13
LES MESURES CLÉS À METTRE EN PLACE D'ICI À 2030	14
L'approvisionnement en matériaux et technologies	15
La consolidation des chaînes de valeur	16
L'enjeu des compétences	17
L'enjeu économique et financier	18
La stabilité et l'adaptation des cadres législatif et réglementaire	19
PERSONNALITÉS INTERROGÉES	20
MÉTHODOLOGIE	21
UN RAPPORT RÉALISÉ PAR CAPGEMINI INVENT, AVEC LE SOUTIEN DE BREAKTHROUGH ENERGY ET LA PARTICIPATION DE CLEANTECH FOR FRANCE	22
AUTEURS ET REMERCIEMENTS	23
ANNEXES	24
Annexe 1 : Synthèse des estimations d'émissions de CO2 évitées grâce aux 16 technologies étudiées	25
Annexe 2 : Synthèse des estimations de la part de gaz économisée grâce aux 16 technologies étudiées	29
Annexe 3 : Synthèse de l'évaluation des barrières au déploiement des 16 technologies sélectionnées	30
Annexe 4 : 55 technologies présentées dans le rapport Fit for net-zero publié en 2020	31

INTRODUCTION

UN CONTEXTE ÉVOLUTIF EN FRANCE ET EN EUROPE

En 2020, la Commission européenne a publié un paquet de 12 propositions législatives, appelé « Fit for 55 », afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre au minimum de 55 % d'ici 2030 par rapport à 1990 et d'atteindre la neutralité carbone en 2050. Au-delà de ces objectifs de décarbonation, il est indispensable que les actions mises en œuvre pour les atteindre répondent également aux enjeux de sécurité énergétique.

Le déclenchement de la guerre en Ukraine a en effet révélé notre dépendance aux énergies fossiles et ses conséquences, entraînant le risque de ne plus prioriser à court terme la lutte contre le réchauffement climatique. Afin d'assurer nos besoins en énergie pour l'hiver prochain, la mise en œuvre d'une nouvelle géopolitique de l'énergie est au centre des préoccupations avec l'urgence de sécuriser l'approvisionnement en gaz et en électricité. Inflation, volatilité des prix de l'énergie (prix du gaz triplé et décuplé de l'électricité en un an sur les marchés de gros), risque de pénurie d'énergie et de faillites d'entreprises fortement dépendantes de l'énergie constituent des sujets prioritaires, devant le climat, comme l'illustre la réactivation de centrales à charbon en Europe, en particulier en Allemagne.

L'après COVID et la guerre en Ukraine appellent donc au développement d'une souveraineté européenne pour mieux faire face aux crises économiques et géopolitiques qui menacent la sécurité énergétique du continent et risqueraient de ralentir le rythme de la transition énergétique et écologique ainsi que la réindustrialisation des territoires. Ces enjeux apparaissent d'autant plus prioritaires qu'en parallèle, le système énergétique se trouve en tension compte tenu de la maintenance du parc nucléaire et des problèmes de corrosion.

Alors qu'il est impératif d'agir dès maintenant pour atteindre nos objectifs climatiques, le nouveau contexte amène à repenser les actions à mettre en place. Dans ce cadre, Capgemini Invent, avec le soutien de Breakthrough Energy, qui avait publié en octobre 2020 [le rapport Fit for net-zero](#) présentant un plan d'action destiné aux décideurs publics et aux investisseurs pour accélérer la transition énergétique européenne, ont décidé de collaborer à nouveau sur une étude avec un périmètre français. Considérant les 55 technologies évaluées dans le rapport de 2020, cette étude se concentre sur 16 technologies, déployables d'ici 2030, permettant de répondre à la fois aux enjeux de décarbonation de l'économie et de sécurité énergétique.

LES ATOUTS DE LA FRANCE

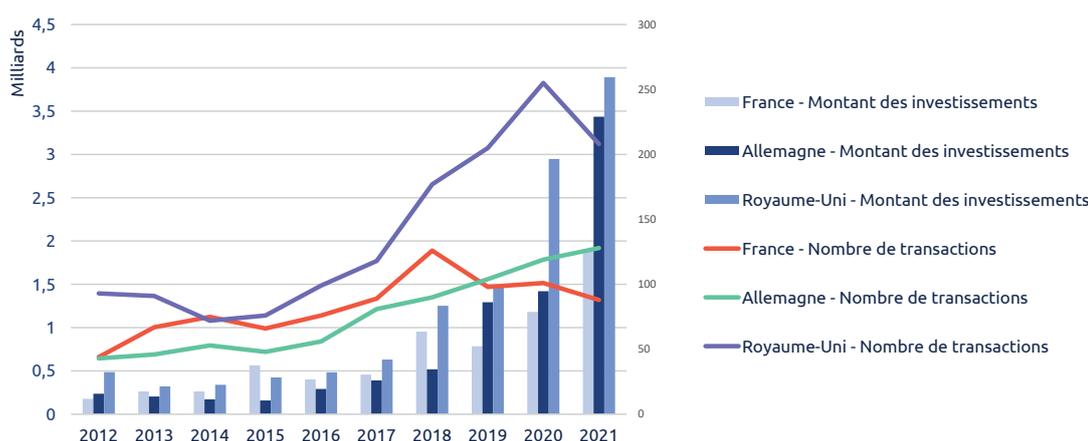
La France constitue un pays moteur dans la réussite des objectifs climatiques européens. Dans le cadre de sa présidence de l'Union européenne de janvier à juin 2022, la France a joué un rôle majeur dans la négociation du paquet de propositions « Fit for 55 ».

Elle a également renouvelé son engagement et son ambition à travers le plan d'investissement France 2030, annoncé en octobre 2021 et doté de 54 milliards d'euros sur cinq ans, qui vise à répondre aux défis à venir en faisant émerger des champions technologiques et en accompagnant les transitions des secteurs économiques français d'excellence : énergie, automobile, aéronautique, ou encore aérospatial.

La France possède des atouts à valoriser, comme son mix électrique décarboné à 93 %, le 2ème espace maritime au niveau mondial après les Etats-Unis, sa forte concentration en bassins industriels à haut potentiel de décarbonation et son activité de recherche publique et privée.

En outre, la France se positionne comme leader dans le domaine des *cleantechs*, ces nouvelles technologies ayant un impact significatif sur l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre. Elle est le 4ème écosystème *cleantech* en Europe, après la Suède, l'Allemagne et le Royaume-Uni, avec plus de 1800 entreprises en 2022.

Investissements cleantech - France, Allemagne et Royaume-Uni 2012-2021
(en milliards d'euros)



Source : Cleantech for France ©, Cleantech Group

Par ailleurs, le contexte politique post-électoral présente l'opportunité de construire une coalition d'actions pour le climat pour accélérer la mise en œuvre de politiques environnementale, énergétique et industrielle ambitieuses. Des choix décisifs sont à prendre dans les prochains mois, avec l'examen au Parlement du projet de loi relatif à l'accélération des énergies renouvelables et la préparation du projet de loi de la programmation quinquennale sur l'énergie et le climat (LPEC) qui fixeront le cadre de la politique énergétique et climatique pour les prochaines années. La Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE), la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC), qui constituent le plan national intégré en matière d'énergie et de climat de la France, seront adoptés en 2024.

Les représentants publics (parlementaires, ministres) auront à prendre au cours des prochains mois des décisions critiques dans la conduite de la politique énergie climat de la France. Cette étude vise donc à la fois à les informer dès le début de leur mandat, sur les technologies clés pour la transition énergétique dans le contexte de crise actuel, mais également à proposer des mesures pour accélérer leur déploiement et accroître le leadership des entreprises françaises dans les secteurs clés de l'économie (mobilité, agriculture, bâtiment, industrie, énergie).

16 TECHNOLOGIES CLÉS POUR LES AMBITIONS CLIMATIQUES DE LA FRANCE

Comme l'évoque le dernier rapport du GIEC, plusieurs solutions de lutte contre le réchauffement climatique existent, avec des potentiels de déploiement et d'accélération différents. Certaines solutions sont déjà fortement mises en valeur dans le débat public, en particulier le nucléaire, le biogaz et l'éolien terrestre, et ne font donc pas l'objet de cette étude. Elles pourront faire l'objet d'un rapport ad hoc ultérieurement.

16 technologies clés, avec un fort potentiel de décarbonation, d'autonomie stratégique et une vitesse de déploiement en mesure de les rendre opérationnelles d'ici 2030, sont mises en avant dans cette étude et présentées ci-après. L'étude évalue l'état des lieux de chacune de ces technologies en France et propose des recommandations sur les actions à engager pour les déployer à grande échelle.

TECHNOLOGIE	ENJEUX
Solaire nouvelle génération (technologie hétérojonction et tandem)	Développer des gigafactories de technologies solaires de nouvelle génération
Éolien flottant	Développer l'éolien en mer flottant à grande échelle
Électrolyseurs (focus alcalin et Proton Exchange Membrane)	Produire de l'hydrogène bas carbone à grande échelle
Stockage d'électricité stationnaire de longue durée	Établir un leadership concurrentiel dans le stockage d'électricité à usage stationnaire
Réseaux électriques	Renforcer et rendre intelligents les réseaux électriques pour soutenir l'électrification avec un mix plus renouvelable et décentralisé
Réseaux de chaleur et de froid	Déployer massivement les réseaux de chaleur et de froid
Bétons biosourcés	Réduire le besoin en béton traditionnel grâce à des bétons alternatifs pour des usages équivalents
Alternatives au clinker et CCUS (Carbon Capture Utilisation & Storage) pour le ciment	Développer des alternatives au clinker portland et industrialiser le captage, l'usage et le stockage du carbone pour une production de ciment bas carbone
Acier décarboné	Utiliser l'hydrogène décarboné pour la réduction du minerai de fer dans les hauts fourneaux
Combustibles alternatifs : biomasse solide et CSR (Combustibles Solides de Récupération)	Passer aux combustibles à faible teneur en CO2 pour les procédés de l'industrie thermique haute température
Recyclage chimique des plastiques	Développer des solutions technologiques chimiques (bio-chimique, électro-chimique, thermo-chimique) pour contribuer à l'économie circulaire des plastiques
Rénovation profonde des bâtiments tertiaires	Développer des équipements de nouvelle génération pour augmenter les performances de la rénovation en profondeur du tertiaire privé
Pompes à chaleur aérothermiques, hybrides, géothermiques de surface	Électrifier massivement la chaleur avec des pompes à chaleur à faible coût
Carburants durables avancés	Améliorer la production de e-carburants et biocarburants avancés combinant hydrogène et CO2
Batteries Li-ion (ou équivalent compétitif) pour les véhicules électriques	Créer des gigafactories de batteries automobiles Lithium-ion et développer l'économie circulaire associée
Fertilisants organiques et biostimulants	Renforcer la résilience des cultures en utilisant des engrais et des intrants à moindre intensité d'émissions et à moindre impact sur la biodiversité

CONCILIER POUR LA FRANCE OBJECTIFS CLIMATIQUES, SÉCURITÉ ÉNERGÉTIQUE ET SOBRIÉTÉ D'ICI À 2030



LES TECHNOLOGIES AU SERVICE D'UNE ÉLECTRIFICATION STABLE ET BAS CARBONE

Le déploiement des énergies renouvelables étant une priorité pour atteindre nos engagements climatiques, la France se fixe des objectifs ambitieux sur la mise en service de parcs solaires et éoliens tout en préparant un projet de loi visant à accélérer la production énergétique renouvelable française, examiné à l'autonomie 2022 au Parlement.

Le Président de la République a annoncé en mars 2022 la volonté de doter la France d'une capacité de 100 GW de solaire et de 40 GW d'éolien en mer, soit une cinquantaine de parcs éoliens en mer. Pour le développement photovoltaïque, le positionnement sur les **technologies de nouvelle génération** (cellules hétérojonction et tandem avec notamment l'usage du pérovskite) est le moyen de gagner en souveraineté sur la filière, très affaiblie sur les technologies matures (silicium cristallin et couche mince) face à une compétition asiatique écrasante. La France, qui développe ces technologies nouvelle génération grâce à des clusters et programmes de recherche de pointe (IPVF, INES-CEA), doit désormais assurer leur passage à l'échelle d'ici à 2030. **L'éolien en mer flottant** (140 GW de potentiel technique théorique selon France Énergie Éolienne) apparaît comme une technologie prometteuse et mature. Moins confronté à des problématiques d'acceptabilité, plus efficient que l'éolien en mer posé, et encouragé par un gisement maritime important, le passage à l'échelle de l'éolien en mer flottant constitue un levier de premier plan pour atteindre les objectifs de renouvelables et réduire les coûts de déploiement et d'utilisation. L'aménagement des territoires, et dans ce cas précis des ports, ainsi que l'accélération des phases de débat public et d'autorisations administratives s'avèrent impératifs pour encourager cette dynamique.

Le développement des capacités renouvelables doit être accompagné d'infrastructures supportant leur déploiement. Les **réseaux électriques doivent être modernisés, développés, exploités et maintenus** pour répondre aux besoins de flexibilité et de décentralisation grandissants, à la fois au niveau de la production et de la consommation. La modernisation des réseaux est indispensable pour le développement de solutions combinant décarbonation et sécurité énergétique, à savoir l'électrification massive des usages couplée à une production d'électricité renouvelable s'accroissant. Plus spécifiquement, le raccordement des moyens de production renouvelables et des bornes de recharges électriques publiques et privées impliquent des changements structurels dans la gestion des investissements, la planification et le développement des réseaux électriques.

Dans cette même perspective, le **stockage d'électricité stationnaire de longue durée**, actuellement assuré en France par le gaz (130 TWh), les stations de transfert d'énergie par pompage et les barrages hydrauliques (60,8 TWh), va devoir s'appuyer sur d'autres technologies (mécaniques, électrochimiques, thermiques et chimiques) pour assurer la stabilité de l'équilibre entre production et consommation.

LES TECHNOLOGIES AU SERVICE DE LA SÉCURISATION DES APPROVISIONNEMENTS STRATÉGIQUES

Au-delà de la nécessité d'assurer notre indépendance vis-à-vis des énergies fossiles et notamment du gaz russe, la souveraineté énergétique et industrielle de la France doit être renforcée.

L'industrialisation des territoires est un enjeu majeur pour renforcer la résilience de l'économie. Le développement des gigafactories, capables de produire en masse et à un coût maîtrisé des solutions de décarbonation, peut y contribuer. Deux technologies apparaissent particulièrement prometteuses. Tout d'abord la **production d'électrolyseurs, permettant de produire de l'hydrogène bas carbone à grande échelle et à faible coût**, s'inscrit dans l'objectif du plan France 2030 et dans une perspective européenne, avec l'annonce en mai 2022 de l'alliance européenne de l'électrolyse. Elle donnera les moyens à la France de devenir le leader de l'hydrogène bas carbone, en partenariat avec les autres pays européens, en capitalisant sur son mix électrique décarboné à 93 %. Ensuite, le développement de **gigafactories européennes de batteries Li-ion** apparaît déterminant pour alimenter le marché croissant des véhicules électriques et s'affranchir des fournisseurs asiatiques. Alors que les premières gigafactories européennes voient le jour, cette dynamique de production doit s'amplifier dans une logique d'économie circulaire, en créant de nouvelles filières de collecte et le recyclage systématiques des batteries.

Dans le secteur de la mobilité, le remplacement des carburants fossiles par des **biocarburants avancés et des e-carburants** constitue un levier fondamental pour s'affranchir de notre dépendance aux énergies fossiles, en particulier dans le transport aérien et maritime. Les biocarburants avancés et e-carburants permettent de répondre à cet enjeu en offrant de surcroît une réduction importante des émissions de GES (jusqu'à 70% pour le maritime et 90% pour l'aérien) et en s'adaptant relativement simplement aux technologies aujourd'hui en place.

Enfin dans le secteur de l'agriculture, le **développement de fertilisants organiques et de biostimulants** est clé pour diminuer et optimiser l'usage des engrais minéraux (azotés, phosphatés ou potassiques), indispensables au maintien de la productivité de la filière agricole française, dans un contexte de forte dépendance de la France (la France importe plus de 60% des engrais minéraux consommés, avec une part marginale (<5%) provenant de la Russie¹).

LES TECHNOLOGIES AU SERVICE DE L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE ET DE LA SOBRIÉTÉ

Pour réagir rapidement à la rupture d'approvisionnement en gaz russe, le Gouvernement a annoncé en juin 2022 un plan de sobriété énergétique visant à réduire de 10% la consommation d'énergie sur les deux prochaines années par rapport à 2019, et de 40% à l'horizon 2050. Même si une grande partie des actions de sobriété sont liées à la baisse et l'adaptation de la demande, de nombreuses technologies bas carbone permettent également une production plus efficace.

Priorité nationale concrétisée par le Plan de rénovation énergétique des bâtiments de 2021 et financée par France Relance, la **rénovation en profondeur des bâtiments** représente un axe clé pour réduire massivement et à court terme nos consommations d'énergie. Plus spécifiquement, la **rénovation en profondeur du tertiaire privé**, accélérée par les obligations de résultats à 2030-2040-2050 du décret tertiaire, vient compléter la rénovation des bâtiments résidentiels, bénéficiant de nombreuses mesures et mécanismes de soutien.

Les actions de sobriété du secteur du bâtiment, doivent être accompagnées d'une décarbonation majeure de la production de chaleur. L'**installation massive des pompes à chaleur** (entre 12,07 et 19,42 MtCO₂eq d'émissions évitées en 2030 selon l'Association Française des Pompes à Chaleur), notamment en substitution au gaz, et le **déploiement à grande échelle des réseaux de chaleur et de froid** (7,7 MtCO₂eq d'émissions évitées en 2030 selon nos estimations), s'imposent comme deux solutions indispensables.

L'économie circulaire constitue enfin un modèle de développement en faveur de l'efficacité énergétique et de la sobriété, en favorisant la réduction de l'usage des ressources, le réemploi et le recyclage. A ce titre, le **recyclage chimique des plastiques**, complémentaire au recyclage mécanique ne pouvant pas traiter tous les déchets plastiques (notamment les mélanges), permet de traiter la problématique du gaspillage des emballages et de réduire les besoins en pétrole et gaz naturel. Avec un taux de recyclage des plastiques de seulement 29% en 2021, la France est loin de son objectif de 100% d'emballages recyclés d'ici 2025 et affiche un des taux de recyclage les plus faibles d'Europe. La France se plaçant à la deuxième place des pays européens, après l'Allemagne, en matière de recherche sur les plastiques, les efforts de R&D doivent désormais se concrétiser à un stade industriel.

¹ En 2021, la Russie était le premier exportateur d'engrais azotés et le deuxième fournisseur d'engrais potassiques et phosphorés (FAO). 25 % de l'approvisionnement européen en azote, potasse et phosphate provenaient de Russie en 2021. Les autres sources proviennent notamment du Maroc, de la Chine, de l'Algérie ou du Brésil.

LES TECHNOLOGIES AU SERVICE DE LA DÉCARBONATION DES PRINCIPAUX ÉMETTEURS DE L'INDUSTRIE

L'industrie, responsable de 19% des émissions de GES françaises, est un secteur clé de décarbonation, dont les solutions manquent parfois de visibilité dans le débat public. Plusieurs leviers permettent de décarboner ce secteur. Ils se regroupent en deux axes principaux : l'évolution des procédés industriels d'une part et d'autre part, la décarbonation des besoins en énergie, principalement de chaleur industrielle.

Concernant la production de chaleur industrielle, un levier essentiel est **le passage à des combustibles solides (biomasse et Combustibles Solides de Récupération (CSR))** en remplacement des intrants fossiles, notamment pour les **industries thermiques à haute température** (températures dépassant les 300°C, nécessaires pour la chimie, représentant 26% des émissions de l'industrie, la métallurgie des métaux ferreux, 20%, et les minéraux non-métalliques, matériaux de construction, 24%).

Concernant l'évolution des procédés industriels, les exemples de la filière cimentière et de l'industrie sidérurgique française sont des illustrations parfaites de la transformation nécessaire des industries les plus émettrices. La production de ciment représente selon l'ADEME 12,5% des émissions de GES de l'Industrie et 2% des émissions totales en France. La filière a identifié plusieurs moyens d'abaisser significativement son impact environnemental, dont certains prêts à être déployés à l'échelle. Elle devra notamment s'appuyer sur deux technologies principales : les **alternatives au clinker portland et le CCUS**, qui permettraient d'éviter entre 1,5 et 2,9 Mt CO₂ en 2030. Autre émettrice majeure, l'industrie sidérurgique pourra profiter de l'hydrogène bas carbone disponible, en l'utilisant pour la **réduction du minerai de fer** à la place du charbon, économisant ainsi 9 millions de tonnes de CO₂éq. L'hydrogène pourrait également se substituer au gaz, ce qui viendrait renforcer la dépendance énergétique française.

Un autre axe de décarbonation consiste au recours à des matériaux alternatifs, plus économes en matières premières et avec un impact environnemental plus faible. La substitution des matériaux biosourcés ou recyclés à des matériaux classiques permet par exemple de réduire la consommation en béton traditionnel, en le remplaçant notamment par des **bétons à base de biomasse**. Ces matériaux alternatifs s'inscrivent dans une logique d'économie circulaire, en s'appuyant sur des déchets de la sylviculture et sur des cultures agricoles abondantes.



LES MESURES CLÉS À METTRE EN PLACE D'ICI À 2030

La France dispose de nombreux atouts propices au déploiement rapide des technologies clés identifiées, que ce soit au niveau de son mix énergétique décarboné à 93%, de ses programmes de recherche d'excellence (solaire, recyclage chimique des plastiques), de ses ressources (2ème gisement européen pour l'éolien en mer, gisement agricole), des filières où elle présente une avance au niveau européen voire international (réseaux électriques, pompes à chaleur aérothermiques, biocarburants avancés, biostimulants) ou encore grâce aux nombreuses start-ups qui se positionnent sur ces filières stratégiques.

Des mesures, présentées ci-après, sont à mettre en place pour capitaliser sur ces atouts et assurer le développement des 16 technologies présentées.

L'APPROVISIONNEMENT EN MATÉRIAUX ET TECHNOLOGIES

L'approvisionnement en ressources (matériaux et technologies) représente un enjeu majeur pour permettre le déploiement des technologies de décarbonation. Plusieurs faiblesses structurantes ont été identifiées :

- La **dépendance vis-à-vis d'un pays dominant pour les ressources ou les matières premières**, à l'instar d'une grande majorité des métaux critiques nécessaires à un nombre important des technologies de décarbonation : le cobalt utilisé dans les batteries est extrait à 70% par la République Démocratique du Congo et la première transformation est contrôlée à 63% par la Chine. Les terres rares, utilisées entre autres pour la production d'électrolyseurs et d'acier décarboné, sont extraites à 62% par la Chine qui contrôle également 82% de la transformation primaire. C'est également le cas de technologies clés comme les machines utilisées dans la fabrication de cellules pour les batteries Li-ion, provenant majoritairement de Chine, ou les semi-conducteurs, produits essentiellement en Asie ;
- La **concurrence des usages des matières premières**, c'est notamment le cas de la biomasse qui a de multiples applications et suscite des tensions en termes d'approvisionnement. L'utilisation de bois énergie comme combustible alternatif pour l'industrie haute température est par exemple en concurrence avec les usages alimentaires, biofertilisants, matériaux, carburants liquides et gaz ;
- La **dépendance à un processus sous licence d'une entreprise extra-européenne**, comme c'est le cas dans la sidérurgie pour le procédé de DRI-hydrogène.

Pour faire face ces faiblesses, nous préconisons :

- **De favoriser le développement, la sécurisation et la diversification de filières industrielles d'approvisionnement** et leur alternative au niveau européen voire français, en lien avec le plan européen pour sécuriser l'approvisionnement en matière première critique
- **De développer des circuits de collecte et de tri efficaces** et de **mettre en place des techniques de recyclage performantes** pour revaloriser les matières premières
- **De continuer à soutenir la recherche et le développement** pour l'alternative aux métaux et technologies critiques et la réduction de leur usage

Approvisionnement (matériaux et technologie)																
Technologie	Solaire nouvelle génération	Eolien flottant	Electrolyseurs	Stockage d'électricité stationnaire	Réseaux électriques	Réseaux de chaleur et de froid	Bétons biosourcés	Clinkers alternatifs et CCUS pour le ciment	Acier décarboné	Combustibles alternatifs (biomasse solide et CSR)	Recyclage chimique des plastiques	Rénovation en profondeur des bâtiments tertiaires privés	Pompes à chaleur	Carburants durables avancés	Batteries Li-ion pour les véhicules électriques	Fertilisants organiques et biostimulants
Barrière au déploiement (faible 0 ; forte 5)	3	2	2	1	3	2	2	1	4	3	3	3	2	3	5	4

Table : évaluation des freins concernant l'approvisionnement en matériaux et technologie

LA CONSOLIDATION DES CHAINES DE VALEUR

Certaines chaînes de valeur des technologies identifiées sont fragilisées, ce qui limite leurs capacités de déploiement. Il est nécessaire de **consolider la présence d'acteurs forts tout au long de cette chaîne de valeur** (mise en place de partenariats avec des acteurs d'autres filières et/ou européens pour faire face au manque de ressources des acteurs existants). Il est également primordial de **développer et renforcer les infrastructures** pour soutenir le déploiement de ces technologies clés.

Par exemple, **la chaîne de valeur de la production des panneaux photovoltaïques** est fragilisée sur la partie amont, avec peu d'entreprises françaises leader sur la fabrication de panneaux et peu de producteurs de cellules elles-mêmes. Les fabricants français seuls n'ont pas les capacités suffisantes (financières, compétences etc.) pour mettre en place des projets d'industrialisation à grande échelle. Il s'avère donc nécessaire **d'établir des partenariats entre ces acteurs et des acteurs industriels (énergéticiens par exemple) pour le passage à l'échelle des solutions.**

Concernant les infrastructures, **les réseaux électriques constituent une infrastructure essentielle de la transition énergétique.** Ils doivent être **renforcés pour s'adapter aux besoins de résilience et de flexibilité du système électrique**, en particulier dans un contexte de crise sécuritaire où la production d'électricité renouvelable et l'électrification massive des usages apparaissent plus prioritaires que jamais. Les infrastructures de distribution de gaz portuaires et aéroportuaires doivent également être développées, notamment pour assurer le déploiement des solutions hydrogène et des carburants durables avancés.

La majorité des technologies de décarbonation, par exemple l'hydrogène, nécessite de l'électricité décarbonée. Pour répondre à cette demande, le déploiement des énergies renouvelables doit être accéléré, en **simplifiant les procédures de permis (permitting)** pour les projets renouvelables.

La décarbonation du transport aérien et maritime nécessite des capacités de production importantes de carburants durables avancés aujourd'hui indisponibles. En effet, l'industrialisation des biocarburants avancés de deuxième génération et des e-carburants nécessite des **investissements en fonds propres conséquents.** La **création de consortiums** français et européens permettrait de réduire et de diluer les risques associés à ces investissements. Les **aides financières dédiées doivent également augmenter pour soutenir le développement de ces capacités de production.** Dans le cas des e-carburants, le CO2 capté par les industriels doit être mieux valorisé dans le système d'échange de quotas d'émissions européen (SEQE).

Chaîne de valeur																
Technologie	Solaire nouvelle génération	Eolien flottant	Electrolyseurs	Stockage d'électricité stationnaire	Réseaux électriques	Réseaux de chaleur et de froid	Bétons biosourcés	Clinkers alternatifs et CCUS pour le ciment	Acier décarboné	Combustibles alternatifs (biomasse solide et CSR)	Recyclage chimique des plastiques	Rénovation en profondeur des bâtiments tertiaires privés	Pompes à chaleur	Carburants durables avancés	Batteries Li-ion pour les véhicules électriques	Fertilisants organiques et biostimulants
Barrière au déploiement (faible 0 ; forte 5)	4	2	4	3	5	2	2	3	2	2	3	5	3	2	1	2

Table : évaluation des freins concernant la chaîne de valeur

L'ENJEU DES COMPÉTENCES

Pour mener et accélérer les transformations des secteurs émetteurs, la France a besoin de s'appuyer sur des acteurs entrants ou historiques possédant des savoir-faire innovants et maîtrisant des compétences nouvelles. **Les profils concernés, qui ne sont déjà pas en nombre suffisant, font l'objet d'une forte demande au niveau européen et mondial.** Ce phénomène engendre des tensions sur les ressources humaines et génère un risque de pénurie si la formation, la transmission des savoir-faire dans certains cas comme celui de l'hydrogène, et l'attraction des talents ne sont pas assurées.

A titre d'exemples, 23 métiers en tension ont été identifiés à horizon 2030 par Think Smartgrids pour les réseaux électriques (cybersécurité, maintenance électrique et électronique, analyse de données, bureau d'études, conduite de travaux, intégration, soudure, digital, etc.). Dans le domaine de la mobilité, plus particulièrement pour la fabrication des batteries Li-ion, la pénurie mondiale en électro-chimistes constitue une importante barrière au développement des gigafactories. Dans le secteur agricole, les opérateurs de distribution (coopératives - négoce agricoles) manquent d'expertise pour mener à bien la mise sur le marché des fertilisants organiques et des biostimulants et intégrer ces nouveaux produits dans leurs conseils aux agriculteurs.

Les solutions à ces barrières sont d'ores et déjà identifiées : **lancer des programmes de formation** spécifiques, **rendre plus lisible l'offre de formation** pour les TPE et les PME, **former massivement sur les métiers des filières en tension et mener une stratégie d'attractivité** territoriale et économique pour attirer, **accueillir et retenir les talents du monde entier** et **augmenter la collaboration entre les start-ups et les grands groupes.**

Compétences & savoir-faire																
Technologie	Solaire nouvelle génération	Eolien flottant	Electrolyseurs	Stockage d'électricité stationnaire	Réseaux électriques	Réseaux de chaleur et de froid	Bétons biosourcés	Clinkers alternatifs et CCUS pour le ciment	Acier décarboné	Combustibles alternatifs (biomasse solide et CSR)	Recyclage chimique des plastiques	Rénovation en profondeur des bâtiments tertiaires privés	Pompes à chaleur	Carburants durables avancés	Batteries Li-ion pour les véhicules électriques	Fertilisants organiques et biostimulants
Barrière au déploiement (faible 0 ; forte 5)	2	2	3	2	5	2	3	2	3	0	1	3	3	3	5	4

Table : évaluation des freins concernant les compétences et savoir-faire

L'ENJEU ÉCONOMIQUE ET FINANCIER

Le soutien économique est indispensable au déploiement des technologies de décarbonation de l'étude. Les technologies innovantes sont capitalistiques (la France doit investir entre 12 et 15 milliards d'euros par an pour financer sa transition énergétique d'ici 2030 selon I4CE) et ont un temps d'accès au marché long, de 5 à 7 ans en moyenne compte tenu des coûts de R&D, des aspects réglementaires et des ressources humaines. Elles sont par ailleurs plus risquées que les solutions traditionnelles compte tenu de leur modèle d'affaires non mature et n'apportent pas systématiquement de fonctionnalité additionnelle visible par le consommateur final par rapport à leur équivalent fossile (par exemple l'acier vert par rapport aux aciers traditionnels), ce qui peut freiner leur financement.

Elles nécessitent un **soutien de l'État** dès les phases d'innovation, de démonstrateur mais aussi, et surtout, dans les phases de pré-industrialisation et de première industrialisation, compte tenu de leur déficit de compétitivité par rapport aux solutions existantes (surcoût de 100 % par exemple pour l'hydrogène bas carbone), même si ce surcoût tend déjà à diminuer en raison de l'augmentation du prix du gaz. Ce type de soutiens existe déjà, par exemple avec l'appel à projets Développement de briques technologiques et démonstrateurs (DEMIBaC) qui soutient les premières industrialisations associant offre et demande), mais nécessite d'être **renforcés surtout sur les phases d'industrialisation**.

Le soutien public recherché doit porter sur les investissements (CAPEX) mais aussi en phase de fonctionnement des technologies (OPEX), être éco conditionné et dédié à des projets structurellement rentables sur le long terme. **Un accompagnement à la mise en place des financements publics doit être favorisé.**

Le Gouvernement a un rôle clé à jouer, notamment via France 2030, pour dé-risquer les investissements nécessaires au développement de ces technologies, permettant ainsi d'attirer des investissements privés. **La mise en place de contrats long terme entre producteurs et acheteurs sont à encourager**, car ils donnent de la visibilité aux acteurs et permettent de rendre les marchés plus liquides et moins volatiles.

De même, la mise en place d'un complément de rémunération comme les **CCfDs**² avec un prix du CO2 suffisamment incitatif, permet de combler le différentiel de rentabilité à court terme entre un projet carboné plus rentable et un projet décarboné. Ce type de dispositif, mis en consultation par le Gouvernement au début de l'année 2022 et également au niveau européen, dont les modalités n'ont pas encore été définies, permettrait de favoriser l'émergence de projets de décarbonation, en particulier dans les domaines de l'industrie tels que la décarbonation de l'acier, l'usage de ciments et de bétons alternatifs ou le développement d'e-carburants et de biocarburants par exemple.

Economiques et financières																
Technologie	Solaire nouvelle génération	Eolien flottant	Electrolyseurs	Stockage d'électricité stationnaire	Réseaux électriques	Réseaux de chaleur et de froid	Bétons biosourcés	Clinkers alternatifs et CCUS pour le ciment	Acier décarboné	Combustibles alternatifs (biomasse solide et CSR)	Recyclage chimique des plastiques	Rénovation en profondeur des bâtiments tertiaires privés	Pompes à chaleur	Carburants durables avancés	Batteries Li-ion pour les véhicules électriques	Fertilisants organiques et biostimulants
Barrière économique au déploiement (faible 0 ; forte 5)	2	4	4	5	3	4	2	3	3	2	2	3	2	5	2	3
Barrière financière au déploiement (faible 0 ; forte 5)	2	2	2	4	5	3	4	4	2	1	1	3	2	5	1	2

Table : évaluation des barrières économiques et financiers

² Les contract carbone for difference (CCFD) permet de combler le différentiel de rentabilité à court terme entre un projet carboné plus rentable et un projet décarboné en rémunérant le porteur de projet si la différence entre le prix fixé dans le contrat d'aide (à définir en fonction des projets et des hypothèses d'investissements) et le prix du CO2 fixé par les marchés européens est positive. Si cette différence est négative, le porteur de projet doit payer le montant à l'Etat.

LA STABILITÉ ET L'ADAPTATION DES CADRES LÉGISLATIF ET RÉGLEMENTAIRE

La stabilité des cadres législatif et réglementaire est essentielle pour donner de la visibilité de long terme aux acteurs de chaque secteur et aux investisseurs. La planification en ce sens est primordiale. Le déploiement de l'éolien offshore passera notamment par là.

Au-delà de cette stabilité, **une évolution du cadre législatif et réglementaire est parfois indispensable**. Pour le ciment et le béton par exemple, les normes actuelles sont fondées sur leur composition plutôt que sur leur performance, empêchant ainsi la commercialisation d'alternatives bas carbone pourtant prêtes à être commercialisées.

La constitution d'un cadre de déploiement clair et transparent est clé pour le passage à l'échelle des technologies. Cette étude montre que plusieurs technologies (hydrogène, fertilisants organiques, ...) rencontrent de fortes barrières à l'entrée sur leurs marchés respectifs, qui peuvent être dues à une absence de marché organisé et réglementé. Les règles de marché doivent aussi parfois être adaptées pour créer de la rentabilité pour les nouvelles technologies, par exemple dans le domaine des réseaux électriques, afin de mieux rémunérer les moyens de flexibilité. **L'opportunité de mettre en place une tarification zonale ou nodale du réseau de transport pourrait ainsi être étudiée pour refléter le coût local d'utilisation du réseau**. Cette tarification pourrait en effet inciter les producteurs à déployer leurs moyens de production d'électricité à des endroits spécifiques, de sorte à optimiser l'exploitation du réseau électrique existant et à mieux rémunérer les moyens de flexibilité et de stockage, tels que les batteries.

Ces évolutions de marché doivent être envisagées, là où c'est possible (fertilisants organiques, e-carburants), **au niveau européen** lorsqu'il s'agit du marché pertinent.

Une contrainte réglementaire partagée par de nombreuses technologies est le temps d'accès au marché. Il peut s'expliquer par le manque de moyens des autorités en charge de délivrer les autorisations de mise sur le marché (AMM) pour les fertilisants organiques ou des trop longues procédures de permis pour les projets, notamment les projets de nouvelles capacités d'électricité renouvelable. Il convient, là où le problème est identifié, **d'améliorer la gouvernance** et/ou de **renforcer les moyens de ces autorités**.

La mise en place de ces recommandations nécessite un dialogue approfondi avec toutes les parties prenantes pour être déclinées rapidement.

		Législatives et réglementaires															
Technologie		Solaire nouvelle génération	Eolien flottant	Electrolyseurs	Stockage d'électricité stationnaire	Réseaux électriques	Réseaux de chaleur et de froid	Bétons biosourcés	Clinkers alternatifs et CCUS pour le ciment	Acier décarboné	Combustibles alternatifs (biomasse solide et CSR)	Recyclage chimique des plastiques	Rénovation en profondeur des bâtiments tertiaires privés	Pompes à chaleur	Carburants durables avancés	Batteries Li-ion pour les véhicules électriques	Fertilisants organiques et biostimulants
Barrière au déploiement (faible 0 ; forte 5)		5	3	3	4	3	2	5	4	3	2	4	2	2	2	1	5

Table : évaluation des barrières législatifs et réglementaires

MÉTHODOLOGIE

Le rapport *Fit for net-zero* publié en 2020 par Capgemini Invent en partenariat avec Breakthrough Energy mettait en lumière 55 solutions au service de la transition climatique de l'Union Européenne à l'horizon 2050.

Considérant les 55 technologies proposées, nous avons écarté les technologies avec une maturité encore trop faible, puis nous avons appliqué deux filtres, l'un portant sur la décarbonation, l'autre sur la souveraineté, tout en nous plaçant dans un contexte français. Nous avons ainsi sélectionné 16 technologies à fort potentiel pour la France à l'échéance 2030.

Pour calculer le score de décarbonation de chaque technologie, nous avons utilisé l'approche suivante :

- Recoupement des domaines d'émissions d'Eurostat avec ceux du rapport *Fit for net-zero* ;
- Calcul de la part de contribution de la France aux émissions européennes, par domaine, pour obtenir les facteurs de conversion à appliquer ;
- Application de ces facteurs de conversion aux émissions évitées en Europe en 2030, issues du rapport *Fit for net-zero*.

Sources : *Emissions Europe & France en 2019 : Eurostat / Emissions évitées Europe en 2030 : Rapport Fit for net-zero.*

Pour évaluer le score de criticité des ressources de chaque technologie, nous avons adopté la démarche suivante :

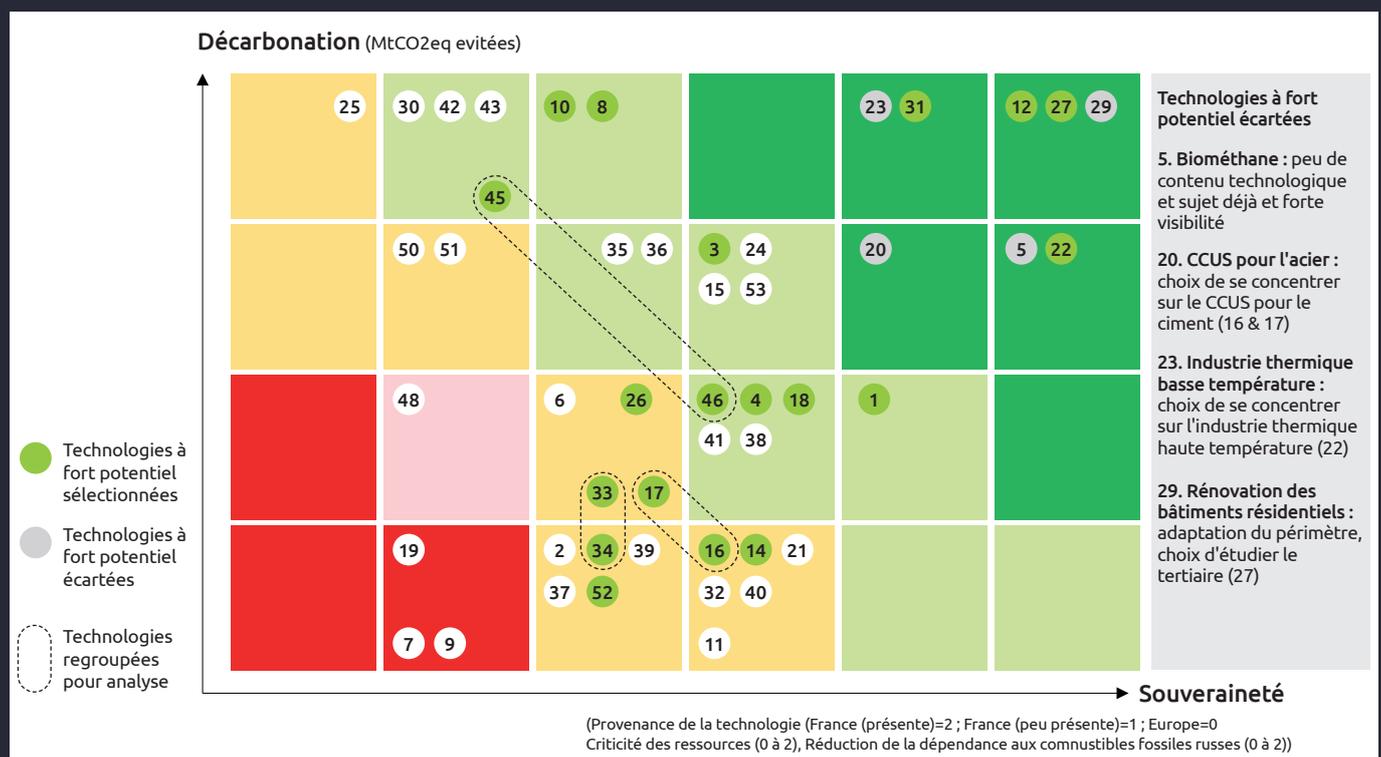
- Association de chaque technologie aux secteurs pertinents de l'étude "SNBC sous contrainte de ressources – Une approche intégrée de la transition bas carbone circulaire"
- Attribution à chaque technologie du score du domaine le plus critique
- Notation de la criticité des ressources selon l'échelle suivante :
 - Note 2 : criticité des ressources faible (scores inférieurs à 2,5)
 - Note 1 : criticité des ressources modérée (scores compris entre 2,5 et 3)
 - Note 0 : criticité des ressources élevée (scores supérieurs à 3)

Sources : *Etude "SNBC sous contrainte de ressources – Une approche intégrée de la transition bas carbone circulaire" INEC, CAPGEMINI*

Pour estimer la provenance de la technologie et la réduction de la dépendance aux combustibles fossiles russes, nous avons recueilli des avis d'experts, puis nous les avons recoupés entre eux.

Cette méthode nous a fourni la matrice ci-après, qui a été soumise à nos partenaires pour discussion, dans une approche qualitative complémentaire à l'approche quantitative. Des choix argumentés et des regroupements entre technologies ont mené aux 16 technologies que nous approfondissons dans ce nouveau rapport.

Les 16 technologies sélectionnées ne sont bien sûr pas les seules à considérer pour répondre aux objectifs de décarbonation et de sécurité énergétique de la France. Notre sélection a mis en avant des technologies couvrant un scope divers. Nous n'avons pas considéré des solutions redondantes (e.g. rénovation des bâtiments pour le tertiaire et le résidentiel, CCUS pour le ciment et l'acier). Nous avons également écarté certaines solutions qui n'ont pas d'enjeu technologique important. Enfin, nous avons écarté des technologies qui bénéficient déjà d'une place importante dans le débat public (e.g., biogaz, nucléaire).



La liste des 55 technologies est rappelée en [annexe 4](#)

PERSONNALITÉS INTERROGÉES

DOMAINE	PERSONNALITÉS INTERROGÉES	ORGANISATION
AGRICULTURE	Anthony BUGEAT Pierre COMPERE Laurent LAGRANT Renaud NALIN Quentin PROTSSENKO Ariane VOYAZATKIS	Axioma Agri Sud-Ouest Innovation AFAIA Biointrans Frayssinet Bpifrance
BÂTIMENTS	Cindy DEMICHEL Arnaud KAUTZMANN Massimiliano PICCIANI	Celsius Association Française des Pompes A Chaleur (AFPAC) Bpifrance
ENERGIE	David BRONSARD Paulo CAMEIJO Guillaume CHAZALET Hugues DEFREVILLE Antoine DEREUDRE Roch DROZDOWSKI-STREHL Pau FARRÉS Alexis GOLDBERG Matthieu GUESNE Antoine KOEN Mathieu LASSAGNE Grégory MARQUE Matthieu MONNIER Peter SCHNIERING Christelle WERQUIN	Eolink Engie Solutions Kemiwatt Newheat Commission de Régulation de l'Energie (CRE) Institut Photovoltaïque d'IDF (IPVF) Future Cleantech Architects Engie Solutions Lhyfe Future Cleantech Architects Ze Energy Institut Photovoltaïque d'IDF (IPVF) France Energie Eolienne (FEE) Future Cleantech Architects France Hydrogène
INDUSTRIE	Laurent AUGUSTE Philippe BLOSTEIN Guillaume BREGENTZER Laurent LEGAY Thierry LEGRAND Daniel MARENNE Didier PETETIN Massimiliano PICCIANI Julien POILLOT Jean-Christophe TRASSARD Karine VERNIER	Circular Resources Air Liquide Engie Generation Europe Vicat Fortera Engie Generation Europe Vicat Bpifrance Vicat Ecocem EIT InnoEnergy France
MOBILITÉ	Michel DAIGNEY Julien POILLOT Christine DURAND	Bpifrance Vicat EIT InnoEnergy France

UN RAPPORT RÉALISÉ PAR CAPGEMINI INVENT, AVEC LE SOUTIEN DE BREAKTHROUGH ENERGY ET LA PARTICIPATION DE CLEANTECH FOR FRANCE

Capgemini Invent

Capgemini Invent est la marque d'innovation digitale, de design et de transformation du groupe Capgemini, qui permet aux dirigeants de façonner l'avenir de leurs entreprises. Etablie dans plus de 36 bureaux et 37 studios de création dans le monde, elle comprend une équipe de plus de 10 000 collaborateurs, composée d'experts en stratégie, de data scientists, de concepteurs de produits et d'expériences, d'experts en marques et en technologie qui développent de nouveaux services digitaux, produits, expériences et modèles d'affaires pour une croissance durable.

Capgemini Invent fait partie du groupe Capgemini, un leader mondial, responsable et multiculturel, regroupant 340 000 personnes dans plus de 50 pays. Partenaire stratégique des entreprises pour la transformation de leurs activités en tirant profit de toute la puissance de la technologie, le Groupe est guidé au quotidien par sa raison d'être : libérer les énergies humaines par la technologie pour un avenir inclusif et durable. Fort de 55 ans d'expérience et d'une grande expertise des différents secteurs d'activité, Capgemini est reconnu par ses clients pour répondre à l'ensemble de leurs besoins, de la stratégie et du design jusqu'au management des opérations, en tirant parti des innovations dans les domaines en perpétuelle évolution du cloud, de la data, de l'Intelligence Artificielle, de la connectivité, des logiciels, de l'ingénierie digitale et des plateformes.

Avec le soutien de Breakthrough Energy

Initié en 2015 par Bill Gates et une coalition d'investisseurs privés préoccupés par les conséquences de l'accélération du changement climatique, Breakthrough Energy soutient le développement des innovations disruptives nécessaires pour faire advenir une société décarbonée. Breakthrough Energy repose sur un modèle de partenariats public-privé qui a fait ses preuves pour transformer la santé, l'éducation et la qualité de vie à travers le monde.

Breakthrough Energy est un réseau d'entités et d'initiatives, notamment de fonds d'investissements, de programmes philanthropiques et d'efforts publics liés par un engagement commun de faire passer à l'échelle les technologies nécessaires pour atteindre la neutralité carbone d'ici 2050.

Breakthrough Energy encourage le développement et le déploiement de nouvelles technologies et de politiques publiques qui accélèrent le cycle de l'innovation, du laboratoire à la commercialisation, en réunissant gouvernements, institutions de recherche, entreprises privées et investisseurs, pour améliorer et intensifier les investissements dans les énergies propres.

Avec la participation de Cleantech for France

Cleantech for France est une initiative portée par le Cleantech Group avec le soutien du Breakthrough Energy. Notre mission est de contribuer aux objectifs du « net-zéro » à travers un dialogue récurrent entre acteurs de l'innovation, de l'investissement et de la politique publique française, pour assurer les conditions d'émergence des start-ups de la cleantech, leur croissance et leur passage à l'échelle, et ainsi promouvoir un déploiement massif des solutions indispensables au monde de demain.

Le Cleantech Group a pour mission d'accélérer le développement et le déploiement des technologies vertes dans le monde. Nos recherches couvrent depuis 2002 les innovations, les investissements et les principaux acteurs de la cleantech. Nous accompagnons les entreprises, investisseurs et gouvernements dans leur stratégie de décarbonation et d'innovation. A chaque étape, de la stratégie initiale au deal, nos services apportent aux décideurs le soutien dont ils ont besoin pour réussir leur transition vers le Net-zéro. Le groupe est basé à San Francisco, avec une présence à Paris, Londres, Bruxelles et Boston.

CETTE ÉTUDE A ÉTÉ COMMANDÉE PAR BREAKTHROUGH ENERGY

AUTEURS

Capgemini Invent

Florent Andrillon - Global Head of Sustainability Services

Benoît Calatayud - Directeur conseil Transition énergétique

Avec la participation de Cleantech For France

Céline Jullien - Director

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier les contributeurs à cette étude :

Jules Besnainou - Executive Director - Cleantech for Europe

Gaëtan Bonhomme - Partner - Breakthrough Energy Ventures

Eric Dusseux - Venture Partner - Breakthrough Energy

Pénélope Le Menestrel - Manager, Europe - Breakthrough Energy

Phuc-Vinh Nguyen - Researcher, French and European energy policy - Jacques Delors Institute

Thomas Pellerin-Carlin - Director EU Programme - Institute for Climate Economics (I4CE)

Julia Reinaud - Senior Director - Breakthrough Energy

ANNEXES

Annexe 1 - Synthèse des estimations d'émissions de CO2 évitées grâce aux 16 technologies étudiées

Annexe 2 - Synthèse des estimations de la part de gaz économisée grâce aux 16 technologies étudiées

Annexe 3 - Synthèse de l'évaluation des barrières au déploiement des 16 technologies sélectionnées

Annexe 4 - 55 technologies présentées dans le rapport Fit for net-zero publié en 2020

ANNEXE 1 - SYNTHÈSE DES ESTIMATIONS D'ÉMISSIONS DE CO2 ÉVITÉES GRÂCE AUX 16 TECHNOLOGIES ÉTUDIÉES

ELECTRIFICATION STABLE ET BAS CARBONE

DOMAINE	TECHNOLOGIE	ENJEUX	EMISSIONS DE CO2 ÉVITÉES
ENERGIE	Solaire nouvelle génération (technologie hétérojonction et tandem)	Développer des gigafactories de technologies solaires de nouvelle génération	<p>Etat des lieux : Actuellement, le solaire PV à un taux d'émission de GES limité à 20 à 30 gCO₂eq/kWh. 740 ktCO₂eq d'émissions françaises ont été évitées en 2021 grâce au parc solaire installé (France Territoire Solaire, étude juin 2022).</p> <p>Prévisions 2030 : 1,4 MtCO₂eq d'émissions évitées pour la filière solaire française (France Territoire Solaire, étude juin 2022) dont 0,07 MtCO₂eq d'émissions évitées par les technologies solaires nouvelle génération (analyse Capgemini).</p> <p>Périmètre de calcul des prévisions 2030 : impact d'un passage de 41,5 à 54 GW de capacité solaires PV installées à horizon 2030 sur le système électrique français.</p>
ENERGIE	Éolien flottant	Développer l'éolien en mer flottant à grande échelle	<p>État des lieux : pas de parc en exploitation à date, seulement des parcs pilotes ou en construction. Métrique clé : 14,8 gCO₂/kWh pour un parc éolien en mer posé, à comparer au taux d'émissions moyen du mix électrique français de 51,1 gCO₂/kWh.</p> <p>Prévisions 2030 : 0,2 MtCO₂eq d'émissions évitées (analyse Capgemini).</p> <p>Périmètre de calcul des prévisions 2030 : production d'électricité, en tenant compte de tout le cycle de vie d'un parc éolien.</p>
ENERGIE	Réseaux électriques	Renforcer et rendre intelligents les réseaux électriques pour soutenir l'électrification avec un mix plus renouvelable	<p>Le développement et l'opération des réseaux électriques ne réduit pas directement les émissions de CO₂, mais est incontournable à la décarbonation par l'électrification.</p> <p>Deux sujets cependant : limitation drastique des interventions terrain et groupes de secours diesel à remplacer.</p>
ENERGIE	Stockage d'électricité stationnaire de longue durée	Établir un leadership concurrentiel dans le stockage d'électricité à usage stationnaire	<p>Le développement du stockage stationnaire d'électricité ne réduit pas directement les émissions de CO₂, mais est incontournable à la décarbonation par l'électrification. En effet, le stockage est nécessaire pour pallier l'intermittence des énergies renouvelables.</p> <p>Plus spécifiquement, la PPE définit un objectif d'autonomie énergétique des ZNI (Zones Non Interconnectées) en 2030, visant donc un mix approchant les 100% d'énergies renouvelables. Cette cible n'est atteignable qu'avec le déploiement de technologies de stockage.</p>

SÉCURISATION DES APPROVISIONNEMENTS STRATÉGIQUES

DOMAINE	TECHNOLOGIE	ENJEUX	EMISSIONS DE CO2 ÉVITÉES
MOBILITÉ	Carburants durables (biocarburants avancés et e-fuels)	Développer des gigafactories de technologies solaires de nouvelle génération	<p>Etat des lieux : 10,3 MtCO₂eq générées par le transport aérien en France en 2020 et 140 MtCO₂eq émises par le transport maritime européen en 2018 selon l'Agence européenne pour l'environnement (AEE).</p> <p>Les biocarburants permettent d'économiser jusqu'à 90% des GES sur l'ensemble du cycle de vie selon la Feuille de route française pour le déploiement des biocarburants aéronautiques durables. Les e-carburants réduisent les GES de 70% sur tout le cycle de vie en comparaison aux carburants pétroliers selon le CEA.</p> <p>Prévisions 2030 : 7 MtCO₂eq d'émissions pourraient être évitées chaque année grâce à l'utilisation du carburant durable en 2030 (incorporation de 5% pour le transport aérien et de 6% pour le transport maritime) (analyse Capgemini).</p> <p>Périmètre de calcul des prévisions 2030 : injection de 5% de biocarburants dans le transport aérien et injection de 3% de biocarburants et de 3% d'e-carburant dans le transport maritime.</p>
ENERGIE	Électrolyseurs (focus alcalin et proton exchange membrane)	Produire de l'hydrogène bas carbone à grande échelle	<p>Etat des lieux : Chaque année, presque 9 MtCO₂eq sont émises en France pour la production d'hydrogène carboné, soit environ 3 % des émissions nationales (ADEME, 2021).</p> <p>Prévisions 2030 : 6 MtCO₂eq d'émissions évitées par an à horizon 2030 pour la filière hydrogène (France Hydrogène 2021).</p> <p>Périmètre de calcul des prévisions 2030 : impact de la production de 6,5 GW d'électrolyseurs déployés, à 70% sur des usages industriels, notamment pour remplacer l'hydrogène carboné issu de gaz naturel, aujourd'hui utilisé dans l'industrie du raffinage, de la chimie et des engrais (ammoniac), à 23,5% sur la mobilité et 6,5% pour les usages énergétiques.</p>
MOBILITÉ	Batteries Li-ion (ou équivalent compétitif pour les véhicules électriques)	Créer des gigafactories de batteries automobiles Lithium-ion et développer l'économie circulaire associée	<p>Prévisions 2030 : 2,5 MtCO₂eq d'émissions évitées pour une production de batteries en France (analyse Capgemini).</p> <p>Périmètre de calcul des prévisions 2030 : CO₂ évité pour produire 120 GWh de batteries Li-ion en France par rapport au mix électrique chinois.</p>
AGRICULTURE	Fertilisants organiques et biostimulants	Renforcer la résilience des cultures en utilisant des engrais et des intrants à moindre intensité d'émissions et à moindre impact sur la biodiversité	<p>Etat des lieux : Les fertilisants azotés représentent 45 % des émissions de GES (CO₂, azote, méthane) du secteur agricole, dont 4,7 MtCO₂eq liés à la production en France.</p> <p>40% des émissions de gaz à effet de serre sont générées par la production et le transport des engrais. Les 60% restants viennent de leur application sur les sols, qui émet massivement du protoxyde d'azote (N₂O), un gaz 265 fois plus réchauffant que le CO₂.</p> <p>Prévisions 2030 : 1,26 MtCO₂eq d'émissions évitées (analyse Capgemini).</p> <p>Périmètre de calcul des prévisions 2030 : test et commercialisation d'engrais organiques et de biostimulants dans 50 fermes pilotes.</p>

EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE ET SOBRIÉTÉ

DOMAINE	TECHNOLOGIE	ENJEUX	EMISSIONS DE CO2 ÉVITÉES
BÂTIMENTS	Pompes à chaleur (PAC) aérothermiques, hybrides, géothermiques de surface	Électrifier massivement la chaleur avec des pompes à chaleur à faible coût	<p>Etat des lieux : Le secteur du bâtiment en France est responsable de 75 MtCO₂eq en 2021 (CITEPA). Le chauffage, eau chaude sanitaire et cuisson des secteurs domestique et tertiaire représente 60 MtCO₂eq (CITEPA, rapport Secten 2022).</p> <p>Prévisions 2030 : Entre 12,07 et 19,42 MtCO₂eq d'émissions évitées à horizon 2030 (estimations de l'AFPAC selon les scénarii bas et haut de la PPE), soit environ 1/5ème des émissions du bâtiment en France en 2021.</p> <p>Périmètre de calcul des prévisions 2030 : part des énergies renouvelables valorisée par les pompes à chaleur pour une PAC d'un coefficient de performance supérieur à 2,5.</p>
ENERGIE	Réseaux de chaleur et de froid	Déployer massivement les réseaux de chaleur et de froid	<p>Etat des lieux : En 2020, les réseaux de chaleur sont responsables de l'émission de 3,82 MtCO₂eq (FEDENE 2021), tandis que le chauffage urbain, de plus en plus décarboné, reste responsable de 6 MtCO₂eq en 2020 (Citepa (Format SECTEN, 2022)).</p> <p>Cependant les réseaux EnR&R ont permis d'éviter 5,65 MtCO₂eq en 2020 (par rapport à l'utilisation de chaudières gaz individuelles) (FEDENE, 2021). En dix ans, les réseaux de chaleur ont pratiquement réduit de moitié leur contenu CO₂ (-48%) grâce au développement massif des EnR&R (contenu de CO₂ moyen des réseaux de chaleur qui est passé de 0,195 à 0,101 kgCO₂eq./kWh entre 2010 et 2020).</p> <p>Prévisions 2030 : 7,7 MtCO₂eq d'émissions évitées (analyse Capgemini).</p> <p>Périmètre de calcul des prévisions 2030 : impact à un passage à 31 TWh de chaleur livrée en 2030 (estimation basse PPE 2028). Emissions évitées calculée par rapport à l'utilisation de chaudières gaz individuelles.</p>
BÂTIMENTS	Rénovation profonde des bâtiments tertiaires	Développer des équipements de nouvelle génération pour augmenter les performances de la rénovation en profondeur du tertiaire privé	<p>Etat des lieux : Selon le Haut Conseil pour le Climat, le bâtiment tertiaire a représenté 6% (vs 10% pour le résidentiel) des émissions de GES françaises en 2021, soit 29 MtCO₂eq.</p> <p>Le tertiaire privé représente 2/3 des bâtiments tertiaires avec 667 millions de m² : les bureaux et les commerces sont les plus grands consommateurs d'énergie et représentent 45% des surfaces du tertiaire (analyse Capgemini).</p> <p>Prévisions 2030 : 7,4 MtCO₂eq d'émissions pourraient être évitées chaque année avec la rénovation en profondeur du parc tertiaire privé (analyse capgemini).</p> <p>Périmètre de calcul des prévisions 2030 : bâtiments tertiaires privés supérieurs à 1000 m² pour la rénovation en profondeur des classes G, F, E, D, C.</p>
INDUSTRIE	Recyclage chimique des plastiques	Développer des solutions technologiques chimiques (bio-chimique, électro-chimique, thermo-chimique) pour contribuer à l'économie circulaire des plastiques	<p>Etat des lieux : Le recyclage chimique en fin de vie des plastiques (gain de 1,6 tCO₂ par rapport à l'incinération pour la pyrolyse par exemple). L'incinération émet en moyenne 1 à 1,4 tonnes de CO₂ par tonne de déchets brûlés. La mise en décharge émet du méthane.</p> <p>La décarbonation des sources d'énergie du recyclage chimique, par exemple l'électrification de la pyrolyse (projets actuellement à un stade de R&D).</p> <p>Prévisions 2030 : 1,77 MtCO₂eq d'émissions évitées (analyse Capgemini).</p> <p>Périmètre de calcul des prévisions 2030 : 20% de recyclage chimique des déchets plastiques (non déjà recyclés par d'autres procédés) à partir de 2030.</p>

DÉCARBONATION DES PRINCIPAUX ÉMETTEURS DE L'INDUSTRIE

DOMAINE	TECHNOLOGIE	ENJEUX	EMISSIONS DE CO2 ÉVITÉES
INDUSTRIE	Acier décarboné	Utiliser l'hydrogène décarboné pour la réduction du minerai de fer dans les hauts fourneaux	<p>Etat des lieux : L'aciérie est le 3e secteur industriel le plus émetteur de GES en France, avec 20 MtCO₂eq émises chaque année.</p> <p>Prévisions 2030 : 9 MtCO₂eq d'émissions seraient évitées grâce au projet dunkerquois d'ArcelorMittal et au projet GravitHy à horizon 2030.</p> <p>Périmètre de calcul des prévisions 2030 : comprend à la fois les émissions évitées grâce à l'électrolyse pour produire l'hydrogène décarboné et celles évitées grâce au processus de DRI (réduction du minerai de fer).</p>
INDUSTRIE	Combustibles alternatifs : biomasse solide et CSR (Combustibles Solides de Récupération)	Passer aux combustibles à faible teneur en CO ₂ pour les procédés de l'industrie thermique haute température	<p>Etat des lieux : France Relance permet d'éviter 2,8 MtCO₂eq par an pour 141 lauréats dont plus de 1,1 MtCO₂eq d'émissions de gaz à effet de serre dues à la combustion d'énergie fossile évitées par an par la mise en œuvre de ces projets (en comparaison, le secteur de l'industrie en France en 2019 représente 79 MtCO₂eq d'émissions de GES (émissions liées aux procédés industriels, consommation de combustibles et autres).</p> <p>Prévisions 2030 : 3,51 MtCO₂eq d'émissions évitées (analyse Capgemini).</p> <p>Périmètre de calcul des prévisions 2030 : industries haute température (sidérurgie, chimie, papier-carton, agroalimentaire (industrie sucrière), verre et céramique, cimenterie, métallurgie, machinerie, bois et textiles).</p>
INDUSTRIE	Alternatives au clinker et CCUS (Carbon Capture Utilisation & Storage) pour le ciment	Développer des alternatives au clinker portland et industrialiser le captage, l'usage et le stockage du carbone pour une production de ciment bas carbone	<p>Etat des lieux : 10 MtCO₂eq d'émissions émises pour la production annuelle de 16 Mt de ciment.</p> <p>Prévisions 2030 : production annuelle de 12 Mt de ciment</p> <ul style="list-style-type: none"> - Scénario conservateur : 1,5 MtCO₂eq d'émissions évitées (analyse Capgemini). - Scénario ambitieux (100% ciments ternaires) : 2,9 MtCO₂eq évitées (analyse Capgemini). <p>Périmètre de calcul des prévisions 2030 : remplacement des clinkers hautement carbonés (à forte teneur en clinker Portland) par des clinkers bas carbone (à faible teneur en clinker Portland voire sans). Pas de prise en compte du CCUS, non opérationnel en 2030.</p>
INDUSTRIE	Bétons biosourcés	Réduire le besoin en béton traditionnel grâce à des bétons alternatifs pour des usages équivalents	<p>Etat des lieux : 13,66 MtCO₂eq émises pour la production annuelle de 20 Mt de béton.</p> <p>Prévisions 2030 : 0,3 MtCO₂eq d'émissions évitées (analyse Capgemini).</p> <p>Périmètre de calcul des prévisions 2030 : remplacement du béton classique par du béton à base de biomasse dans la construction des bâtiments et la réalisation des travaux publics.</p>

ANNEXE 2 - SYNTHÈSE DES ESTIMATIONS DE LA PART DE GAZ ÉCONOMISÉE GRÂCE AUX 16 TECHNOLOGIES ÉTUDIÉES

En nous appuyant sur ces émissions de CO₂, ainsi que sur l'empreinte carbone du gaz évaluée par l'ADEME et les parts du gaz dans chaque domaine émetteur fournies par le ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, nous estimons une quantité de gaz non consommée et nous la ramenons à la quantité de gaz consommée annuellement en France.

A titre d'information, la consommation annuelle française de gaz s'élève à 494 TWh PCS et 9% est d'origine russe.

DOMAINE	TECHNOLOGIES SÉLECTIONNÉES	ÉMISSIONS DE CO ₂ ÉQ ÉVITÉES EN 2030 (en millions de tonnes)	EQUIVALENCE EN QUANTITÉ DE GAZ NON CONSOMMÉ (en TWh PCS)	PART D'ÉCONOMIE DE GAZ
ENERGIE	<ul style="list-style-type: none"> • Électrolyseurs (focus alcalin et Proton Exchange Membrane) • Solaire nouvelle génération (technologie hétérojonction et tandem) • Éolien flottant • Stockage d'électricité stationnaire de longue durée • Réseaux électriques • Réseaux de chaleur et de froid 	15,3 Mt	11,9 TWh	2,4%
INDUSTRIE	<ul style="list-style-type: none"> • Bétons biosourcés • Recyclage chimique des plastiques • Alternatives au clinker et CCUS (Carbon Capture Utilisation & Storage) pour le ciment • Acier décarboné • Combustibles alternatifs : biomasse solide et CSR (Combustibles Solides de Récupération) 	17,5 Mt	33,9 TWh	6,9%
MOBILITÉ	<ul style="list-style-type: none"> • Batteries Li-ion (ou équivalent compétitif) pour les véhicules électriques • Carburants durables avancés 	9,5 Mt	0,2 TWh	0,0%
AGRICULTURE	<ul style="list-style-type: none"> • Fertilisants organiques et biostimulants 	1,3 Mt	0,3 TWh	0,1%
TOTAL		66,8 Mt	77,7 TWh	15,7%

ANNEXE 3 - SYNTHÈSE DE L'ÉVALUATION DES BARRIÈRES AU DÉPLOIEMENT DES 16 TECHNOLOGIES SÉLECTIONNÉES

Nous avons rassemblé dans le tableau ci-après les notations des barrières au déploiement pour chacune des technologies. Ces notes s'appuient sur des éléments qualitatifs issus de nos analyses et des entretiens réalisés et sont expliquées dans chacune des fiches. L'échelle va de 0 (barrière inexistante) à 5 (barrière majeure).

#	Domaines	Technologie	Approvisionnement matériaux et technologie	Capacité de développement et infrastructures	Compétences & savoir-faire	Economiques	Financières	Acceptabilité	Législatives et réglementaires
1	ENERGIE	Solaire nouvelle génération (technologie hétérojonction et tandem)	3	4	2	2	2	1	5
3	ENERGIE	Éolien flottant	2	2	2	4	2	2	3
4	ENERGIE	Électrolyseurs (focus alcalin et Proton Exchange Membrane)	2	4	3	4	2	1	3
8	ENERGIE	Stockage d'électricité stationnaire de longue durée	1	3	2	5	4	2	4
10	ENERGIE	Réseaux électriques	3	5	5	3	5	3	3
12	ENERGIE	Réseaux de chaleur et de froid	2	2	2	4	3	0	2
14	INDUSTRIE	Bétons biosourcés	2	2	3	2	4	1	5
16 & 17	INDUSTRIE	Alternatives au clinker et CCUS (Carbon Capture Utilisation & Storage) pour le ciment	1	3	2	3	4	2	4
18	INDUSTRIE	Acier décarboné	4	2	3	3	2	0	3
22	INDUSTRIE	Combustibles alternatifs : biomasse solide et CSR (Combustibles Solides de Récupération)	3	2	0	2	1	1	2
26	INDUSTRIE	Recyclage chimique des plastiques	3	3	1	2	1	3	4
27	BATIMENTS	Rénovation profonde des bâtiments tertiaires	3	5	3	3	3	0	2
31	BATIMENTS	Pompes à chaleur aérothermiques, hybrides, géothermiques de surface	2	3	3	2	2	1	2
33 & 34	MOBILITE	Carburants durables avancés	3	2	3	5	5	2	2
45 & 46	MOBILITE	Batteries Li-ion (ou équivalent compétitif) pour les véhicules électriques	5	1	5	2	1	0	1
52	AGRICULTURE	Fertilisants organiques et biostimulants	4	2	4	3	2	2	5

ANNEXE 4 - 55 TECHNOLOGIES PRÉSENTÉES DANS LE RAPPORT FIT FOR NET-ZERO PUBLIÉ EN 2020

DOMAINE	#	TECHNOLOGIE
ENERGIE	1	DEVELOPPER DES GIGAFACTORIES DE TECHNOLOGIES SOLAIRES DE NOUVELLE GÉNÉRATION
	2	GÉNÉRER 30% D'ÉLECTRICITÉ SUPPLÉMENTAIRE PAR M ² GRÂCE À DES PANNEAUX SOLAIRES BIFACIAUX
	3	DEVELOPPER L'EOLIEN EN MER FLOTTANT À GRANDE ÉCHELLE
	4	PRODUIRE DE L'HYDROGÈNE DÉCARBONÉ À GRANDE ÉCHELLE À 1,5€/KG D'ICI 2025-2030
	5	INDUSTRIALISER LE BIOMÉTHANE POUR RÉALISER DES ÉCONOMIES D'ÉCHELLE
	6	RENDRE DISPONIBLE 24/7 L'ÉLECTRICITÉ COMBINANT PRODUCTION SOLAIRE, STOCKAGE ET RÉSEAU
	7	EXPLOITER TOUTE LA CAPACITÉ EUROPÉENNE DE STOCKAGE DES CENTRALES HYDRAULIQUES
	8	ETABLIR UN LEADERSHIP CONCURRENTIEL DANS LE STOCKAGE D'ÉLECTRICITÉ À USAGE STATIONNAIRE
	9	DEVELOPPER LE DIGITAL À TOUS LES NIVEAUX : CLIENT, PRODUCTION ET RÉSEAU, POUR RESOUDRE LES PROBLÉMATIQUES DE DISPONIBILITÉ ET D'INTERMITTENCE
	10	RENFORCER LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES POUR UN MIX PLUS RENOUVELABLE
	11	TRANSFORMER LES RÉSEAUX DE GAZ VERS UN MODÈLE MULTI-SOURCES
	12	DÉPLOYER MASSIVEMENT LES RÉSEAUX DE CHALEUR ET DE FROID DANS LES VILLES EUROPÉENNES
	13	CAPTER LE CO ₂ À GRANDE ÉCHELLE DE FACON RENTABLE ET AVEC UNE HAUTE EFFICACITE ENERGETIQUE
ENERGIE	14	RÉDUIRE LE BESOIN EN BÉTON GRÂCE À UNE MEILLEURE CONCEPTION ET À DES BÉTONS ALTERNATIFS POUR DES USAGES ÉQUIVALENTS
	15	REMPLENER L'UTILISATION DU BÉTON PAR DES MATÉRIAUX PUIITS DE CARBONE DANS LES NOUVELLES CONSTRUCTIONS
	16 & 17	RÉDUIRE LA PART DU CLINKER DANS LE CIMENT PORTLAND, DÉVELOPPER DE NOUVEAUX CLINKERS ALTERNATIFS ET INDUSTRIALISER LE CAPTAGE ET L'USAGE DU CARBONE POUR UNE PRODUCTION DE CIMENT BAS CARBONE
	18	UTILISER L'HYDROGÈNE DÉCARBONÉ POUR LA RÉDUCTION DU MINERAI DE FER POUR LES FOURS OXYGÉNÉS BASIQUES ET LES FOURS ÉLECTRIQUES À ARC
	19	DEVELOPPER L'ELECTROEXTRACTION DU MINERAI DE FER POUR LES FOURS À ARC ÉLECTRIQUE
	20	RÉUTILISER LES GAZ UTILISÉS OU EMIS PAR LES PROCÉDÉS ET CAPTER LE CO ₂ POUR RÉDUIRE LES ÉMISSIONS DES ACIERIES INTÉGRÉES
	21	ACCROITRE LA PRODUCTION D'HYDROGÈNE DÉCARBONÉ SUR SITE DANS LES RAFFINERIES
	22	PASSER AUX COMBUSTIBLES À FAIBLE TENEUR EN CO ₂ POUR LES PROCÉDÉS DE L'INDUSTRIE THERMIQUE HAUTE TEMPERATURE
	23	PASSER À DES SOLUTIONS BASSES EN CO ₂ POUR LES BESOINS DE L'INDUSTRIE THERMIQUE BASSE TEMPERATURE
	24	METTRE EN ŒUVRE UN PROGRAMME D'EFFICACITÉ ÉLECTRIQUE MASSIF POUR TOUTES LES USINES INDUSTRIELLES EUROPÉENNES
25	RÉDUIRE L'IMPACT GES DES RÉFRIGÉRANTS	
26	RÉDUIRE L'IMPACT GES DU PLASTIQUE GRÂCE À LA RÉUTILISATION ET AU RECYCLAGE	
BÂTIMENTS	27	RÉNOVER EN PROFONDEUR LES BÂTIMENTS RÉSIDENTIELS
	28	DÉVELOPPER DES ÉQUIPEMENTS NOUVELLE GÉNÉRATION POUR AUGMENTER LES PERFORMANCES DE LA RÉNOVATION EN PROFONDEUR
	29	RÉNOVER EN PROFONDEUR LES BÂTIMENTS PUBLICS
	30	AUTOMATISER, NUMÉRISER ET RATIONALISER LES PROCESSUS ET MÉTHODES DE CONSTRUCTION POUR LA RÉNOVATION ET LES NOUVELLES CONSTRUCTIONS
	31	ÉLECTRIFIER MASSIVEMENT LA CHALEUR AVEC DES POMPES À CHALEUR À FAIBLE COÛT
	32	DÉVELOPPER DES BÂTIMENTS NOUVELLE GÉNÉRATION PERMETTANT UNE CONSOMMATION ULTRA-BASSE ET UNE GESTION ÉNERGÉTIQUE TOTALEMENT FLEXIBLE

DOMAINE	#	TECHNOLOGIE
MOBILITÉ	33 & 34	AMÉLIORER LA PRODUCTION DE E-CARBURANT ET BIO-CARBURANT COMBINANT HYDROGENE ET CO2
	35	AMÉLIORER LA PRODUCTION D'AMMONIAC VERT COMBINANT HYDROGENE ET AZOTE ET L'INFRASTRUCTURE LOGISTIQUE POUR LE TRANSPORT MARITIME LONGUE DISTANCE
	36	DEVELOPPER LA PROPULSION A L'AMMONIAC POUR LE TRANSPORT MARITIME LONGUE DISTANCE
	37	FAIRE PASSER LES FERRIES DE COURTE ET MOYENNE DISTANCE À LA PROPULSION PAR PILES À COMBUSTIBLES HYDROGÈNE
	38	DÉVELOPPER LE RESEAU DE STATIONS DE RECHARGE HYDROGÈNE POUR LE FRET ROUTIER LOURD
	39	DEVELOPPER LA PRODUCTION DE CAMIONS À L'HYDROGÈNE
	40	FAIRE PASSER LES TRAINS INTERCITÉS FONCTIONNANT AUX ÉNERGIES FOSSILES À L'HYDROGÈNE
	41	ÉLECTRIFIER LES FLOTTES DE CAMIONS DE COURTE DISTANCE, DE COLLECTE DES DÉCHETS ET D'AUTOBUS URBAINS
	42	DEVELOPPER L'INFRASTRUCTURE PRIVEE DE RECHARGE DE VEHICULES ELECTRIQUES POUR FACILITER L'ADOPTION DE LA MOBILITÉ ÉLECTRIQUE À COURTE DISTANCE
	43	DEVELOPPER L'INFRASTRUCTURE PUBLIQUE DE RECHARGE DE VEHICULES ELECTRIQUES POUR FACILITER L'ADOPTION DE LA MOBILITÉ ÉLECTRIQUE À COURTE DISTANCE
	44	DÉVELOPPER DES TECHNOLOGIES PLUS RAPIDES, MOINS CHÈRES ET PLUS PRATIQUES POUR LA RECHARGE DE VEHICULES ELECTRIQUES
	45 & 46	APPROVISIONNER L'INDUSTRIE AUTOMOBILE EUROPÉENNE EN BATTERIES LI-ION "MADE IN EUROPE" ET CREATION D'UNE ÉCONOMIE DE BATTERIES ELECTRIQUES 100% CIRCULAIRE EN EUROPE
	47	STIMULER LE DÉVELOPPEMENT DE TECHNOLOGIES DE BATTERIES NOUVELLE GÉNÉRATION ALTERNATIVES AUX BATTERIES LI-ION POUR LA MOBILITÉ
	48	CONSTRUIRE DE NOUVEAUX SYSTÈMES DE TRANSPORT URBAIN MULTIMODAUX POUR FACILITER LA PLANIFICATION, L'EXPÉRIENCE ET LE PAIEMENT DES DÉPLACEMENTS DE PORTE À PORTE
	49	PRIVILEGIER LES VÉHICULES AUTONOMES DE FLOTTES PARTAGÉES
AGRICULTURE	50	TRANSFORMER L'AGRICULTURE EUROPÉENNE GRÂCE À DES TECHNIQUES AGRICOLES DURABLES
	51	EXPLOITER LA PUISSANCE DE L'AGRICULTURE 4.0
	52	RENFORCER LA RÉSILIENCE DES CULTURES EN UTILISANT DES ENGRAIS ET DES INTRANTS À MOINDRE INTENSITÉ D'ÉMISSIONS
	53	EXPLOITER LE POTENTIEL DES INSECTES EN TANT QUE PROTÉINES À CROISSANCE RAPIDE
	54	CAPTER LES ÉMISSIONS DE MÉTHANE ET DE GES NON CO ₂ DU BETAIL
	55	PROMOUVOIR DES ALTERNATIVES SAVOUREUSES, ABORDABLES ET À FAIBLES ÉMISSIONS À LA VIANDE ET AUX PRODUITS LAITIERS

En savoir plus

[55 projets technologiques aux impacts positifs sur le climat](#) - Capgemini France

A propos de Capgemini Invent

Capgemini Invent est la marque d'innovation digitale, de design et de transformation du groupe Capgemini, qui permet aux dirigeants de façonner l'avenir de leurs entreprises. Etablie dans plus de 36 bureaux et 37 studios de création dans le monde, elle comprend une équipe de plus de 10 000 collaborateurs composée d'experts en stratégie, de data scientists, de concepteurs de produits et d'expériences, d'experts en marques et en technologie qui développent de nouveaux services digitaux, produits, expériences et modèles d'affaire pour une croissance durable.

Capgemini Invent fait partie du groupe Capgemini, un leader mondial, responsable et multiculturel, regroupant 340 000 personnes dans plus de 50 pays. Partenaire stratégique des entreprises pour la transformation de leurs activités en tirant profit de toute la puissance de la technologie, le Groupe est guidé au quotidien par sa raison d'être : libérer les énergies humaines par la technologie pour un avenir inclusif et durable. Fort de 55 ans d'expérience et d'une grande expertise des différents secteurs d'activité, Capgemini est reconnu par ses clients pour répondre à l'ensemble de leurs besoins, de la stratégie et du design jusqu'au management des opérations, en tirant parti des innovations dans les domaines en perpétuelle évolution du cloud, de la data, de l'Intelligence Artificielle, de la connectivité, des logiciels, de l'ingénierie digitale et des plateformes. Le Groupe a réalisé un chiffre d'affaires de 18 milliards d'euros en 2021.

*Get The Future You Want**

Plus d'informations sur www.capgemini.com/invent

** Capgemini, le futur que vous voulez*