

GAME CHANGERS, POUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

anRT
ASSOCIATION NATIONALE
RECHERCHE TECHNOLOGIE

 **FUTURIS**

**LE POUVOIR DE
L'INTELLIGENCE
COLLECTIVE**

JUIN / 2023
LES CAHIERS FUTURIS

Sous la présidence d'Olivier Appert, membre de l'Académie des technologies
Richard Lavergne, co-président
Denis Randet, co-président
Félix Elefant, rapporteur
Clarisse Angelier, ANRT, directrice de publication

2023

Ces travaux sont soutenus financièrement par les soucripteurs FutuRIS :

AI CARNOT, AIR LIQUIDE, AMPRIC - AIX-MARSEILLE UNIVERSITE, ANR, BERGER-LEVRAULT, BOUYGUES, BRGM, CEA, CNRS, FRANCE UNIVERSITÉS, EDF, ENGIE, META, GENERAL ELECTRIC, INSERM, INSTITUT MINES TELECOM, INRIA, INSTITUT PASTEUR, MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE, DE LA JEUNESSE ET DES SPORTS, MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE, NOKIA BELL LABS, RÉGION PAYS DE LA LOIRE, SCHNEIDER ELECTRIC, SNCF, SERVIER, TOTAL ENERGIES

Le contenu n'engage que la responsabilité de l'ANRT en tant qu'auteur et non celle des institutions qui lui apportent son soutien.



LISTE DES MEMBRES ACTIFS DU GROUPE DE TRAVAIL

- Marie-Cécile Alvarez (UGA)
- Dominique Auverlot (CGEDD)
- Mickael Allouche (Schlumberger)
- Telman Azarmahd (EDF)
- Patrick Bastard (Renault)
- Julien Barreteau (DGEC)
- Jean-Claude Benech (CNES)
- Etienne Beeker (France Stratégie)
- Nadine Berthomieu (ADEME)
- Sylvain Bremond (Capenergies)
- Marc-Antoine Collardeau (ENGIE)
- Christophe Coutanceau (CNRS)
- Antoine Derreudre (CRE)
- Nicolas De Warren (Arkema)
- Rémi Dreux (ENGIE)
- Ivan Faucheux (CRE)
- Jean-Henry Ferasse (Université d'Aix-Marseille)
- Pascal Fugier (CEA)
- Jérôme Garnier (CEA)
- Nouha Gazbour (CEA)
- Nicolas Jonquères (CEA)
- Julian Kashdan (IFPEN)
- Samira Kherrouf (ADEME)
- Delphine Labry (MDEF)
- Élodie Le Cadre-Loret (ENGIE)
- Fabrice Lemoine (ANCRE)
- Christophe Lharidon (PCM)
- Xavier Longaygue (IFPEN)
- Jérôme Lopez (Notabek)
- Paul Lucchese (CEA)
- Vincent Mazauric (Schneider Electric)
- Antoine Monnet (GRDF)
- Xavier Montagne (MESR)
- François Nicol (VEOLIA)
- Amaury Pachurka (Beoga)
- Grégoire Postel-Vinay (DGE)
- Thierry Priem (CEA)
- David Proutt (CEA)
- Audrey Quehen (ENGIE)
- Tristan Rigou (GRDF)
- Nicolas Roche (Enedis)
- Sylvie Sevestre-Ghalila (CEA)
- Francisco Silverio Marques (VEOLIA)
- Abdelilah Slaoui (CNRS)
- Julien Szabla (Notabek)
- Muriel Thibaut (MESR)
- Jean-Philippe Thierry (France Industrie)
- Isabelle Tisserand (La Poste)
- Cyrille Viallefont (MDEF)
- Frédéric Wurtz (CNRS)

SOMMAIRE

INTRODUCTION

1- Pourquoi s'intéresser aux Game Changers ?	p. 6
2- Les Game Changers dépendent des circonstances nationales	p. 7
3- Nature des Game Changers	p. 7
4- Structure du rapport	p. 8
5- Remerciements	p. 8

A. TECHNOLOGIES DE L'OFFRE EN ÉNERGIE	p. 10
A1. Énergie solaire	p. 12
A2. Énergie éolienne	p. 14
A3. Énergie nucléaire	p. 16
A4. Biomasse et déchets pour l'énergie	p. 18

B. TECHNOLOGIES D'INTERFACE OFFRE / DEMANDE	p. 20
B1. Réseaux (électricité, gaz, chaleur)	p. 22
B2. Technologies numériques	p. 26
B3. Hydrogène bas carbone	p. 30
B4. Gaz et carburants bas carbone (hors hydrogène)	p. 36

C TECHNOLOGIES DE LA DEMANDE EN ÉNERGIE	p. 40
C1. Véhicules légers	p. 42
C2. Véhicules lourds et aviation	p. 44
C3. Industrie	p. 48
C4. Bâtiment	p. 50

D. CAPTAGE, STOCKAGE ET UTILISATION DU CARBONE	p. 54
D1. Bois et forêts	p. 56
D2. Captage, stockage et valorisation du CO ₂ (CCUS)	p. 58

CONCLUSION GÉNÉRALE	p.62
----------------------------------	-------------

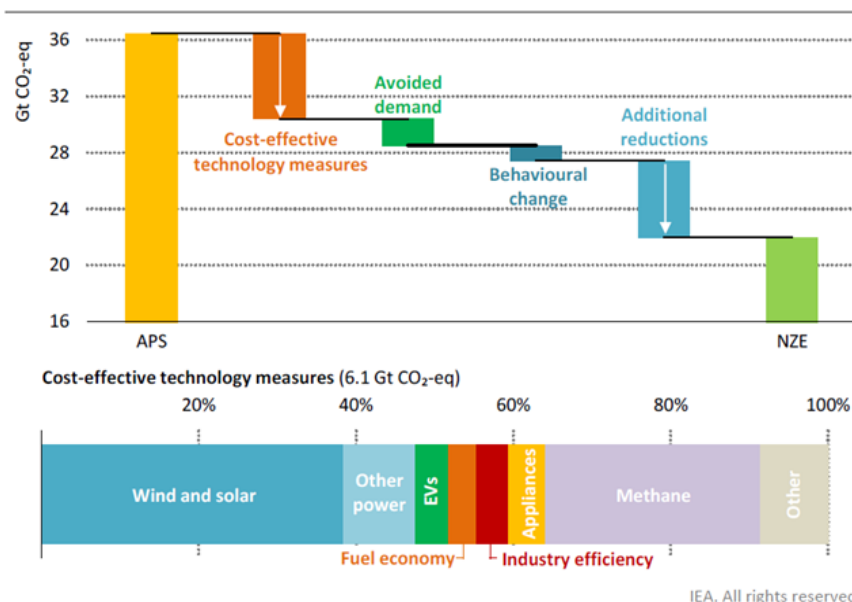
INTRODUCTION

1- POURQUOI S'INTÉRESSER AUX « GAME CHANGERS » ?

La neutralité carbone de la France et de l'UE d'ici 2050 est un objectif ambitieux au regard des tendances passées et elle nécessite la mise en place d'instruments économiques pour orienter les comportements et les investissements. Cependant, ces instruments ne peuvent pas anticiper les nouvelles technologies qui deviendront matures à cet horizon de sorte qu'ils sont bâtis sur la base d'études d'impact, de type "sagesse conventionnelle", ne tenant pas compte des "game changers" plus ou moins inattendus qui interviendront notamment sur les technologies.

Le graphique suivant de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) indique qu'au niveau mondial il existe un déficit d'ambition d'environ 14 Gt CO₂ d'émissions entre les promesses annoncées par les pays qui ont ratifié l'Accord de Paris et les émissions

Répartition des mesures permettant de combler l'écart entre les scénarios NZE¹ et APS² de l'AIE (source : World Energy Outlook, page 107, AIE, octobre 2021).



1 The Net Zero Emissions by 2050 Scenario (NZE). This is a normative IEA scenario that shows a narrow but achievable pathway for the global energy sector to achieve net zero CO₂ emissions by 2050, with advanced economies reaching net zero emissions in advance of others. This scenario also meets key energy-related United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), in particular by achieving universal energy access by 2030 and major improvements in air quality. The NZE does not rely on emissions reductions from outside the energy sector to achieve its goals, but assumes that non-energy emissions will be reduced in the same proportion as energy emissions. It is consistent with limiting the global temperature rise to 1.5°C without a temperature overshoot (with a 50% probability).

2 The Announced Pledges Scenario (APS) appears for the first time in this WEO. It takes account of all of the climate commitments made by governments around the world, including NDCs as well as longer term net zero targets, and assumes that they will be met in full and on time. The global trends in this scenario represent the cumulative extent of the world's ambition to tackle climate change as of mid-2021. The remaining difference in global emissions between the outcome in the APS and the normative goals in the NZE or the Sustainable Development Scenario shows the "ambition gap" that needs to be closed to achieve the goals agreed at Paris in 2015.

TION

compatibles avec un scénario de type "neutralité carbone".

Il apparaît que 40% de ce déficit peut être comblé par des mesures favorisant le développement de technologies "coût-efficaces" et 25% par des mesures d'efficacité et sobriété énergétique, y compris en efficacité d'usage des matériaux et en numérique. L'AIE estime que l'écart résiduel pourrait être comblé par des progrès relevant des domaines tels que l'électrification, les combustibles à base d'hydrogène, le CCUS et les émissions négatives.

Afin d'éclairer dans quelle mesure les objectifs de politique énergétique à long terme, tels qu'exprimés par la Stratégie française pour l'énergie et le climat (SFEC)³, pourraient être satisfaits grâce à l'aide de "game changers" pouvant nécessiter des mesures à fort contenu technologique, où la France pourrait disposer d'une compétence technologique et industrielle, l'ANRT a confié à son groupe de travail "SNRE" une mission d'investigation réalisée tout au long du second semestre 2022 et du premier semestre 2023. Le groupe espère que le fruit de ses travaux pourra être utile à la préparation de la future SFEC. Sur la base d'auditions de porteurs de projets et d'experts des différents secteurs, le groupe de travail a engagé une démarche de type SWOT pour qualifier diverses ruptures potentielles à l'horizon 2030-2040, qu'on peut classer en deux catégories :

1. Les ruptures qui peuvent changer le paysage mondial :
 - celles qui se présentent comme des solutions annoncées avec un changement qui peut prendre deux visages : soit il se produit, mais dans quelles conditions ?, soit il n'arrive pas, alors qu'on comptait dessus ;
 - celles qu'on ne connaît pas aujourd'hui mais qui apporteraient enfin une solution à un problème majeur qui n'en a pas actuellement.
2. Les ruptures qui pourraient modifier la position française et/ou européenne, positivement ou négativement :
 - en positif, grâce au développement de nos atouts ;
 - en négatif, grâce à la conquête possible par d'autres pays de nos approvisionnements ou de notre production, ce qui justifie d'émettre une alerte.

2- LES « GAME CHANGERS » DÉPENDENT DES « CIRCONSTANCES NATIONALES »

La disponibilité de ressources naturelles, la disponibilité d'infrastructures, les modes de vie, la démographie, la géographie (dont la possibilité d'avoir des interconnexions), etc., impactent fortement la consommation d'énergie et la sécurité

énergétique d'un pays (on peut parler d'autonomie stratégique). Par exemple, la forte proportion d'électricité bas carbone (dont nucléaire et hydraulique) est une singularité et un atout potentiel pour la France depuis des décennies. Il revient à chaque pays de trouver son chemin, même si le voisinage et les interconnexions plaident pour des concertations et des solidarités européennes.

Pour la France, une étude sur les "game changers" se justifie d'autant plus que, depuis plusieurs années, aucun exercice de ce type n'a été engagé comportant un volet lié à la transition énergétique, comme pouvaient l'être les rapports "Technologies clés" de la DGE. Fort heureusement, l'AIE a continué de publier périodiquement ses rapports "Energy Technology Perspectives"⁴, mais ils sont de portée mondiale et ils décrivent trop de technologies pour apporter aux pouvoirs publics français une aide directe à la décision, nécessitant un complément d'analyse de façon à prioriser les technologies les plus appropriées à la situation de notre pays.

3- NATURE DES « GAME CHANGERS »

Selon le mandat de l'ANRT, **le groupe de travail s'est surtout attaché aux conditions et aux effets potentiels du progrès technologique**, avec l'objectif d'aider à définir les priorités françaises en matière de recherche, de développement, d'industrie et de services. Les membres du groupe sont bien conscients que la technologie n'est pas seule en cause : les comportements des citoyens d'une part et l'engagement des entreprises - tant par leurs offres que par la façon dont elles les produisent -, d'autre part, constituent des facteurs cruciaux pour atteindre les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Les actions des pouvoirs publics et les signaux économiques permettant de les orienter en ce sens, ainsi que les investissements correspondants, sont donc à considérer avec soin, en tenant compte de l'évolution des marchés, de la concurrence internationale, de nos capacités scientifiques, techniques et financières, et des conséquences de nos investissements futurs sur la balance des paiements et l'emploi.

Le groupe de travail a orienté sa recherche de "game changers" en s'appuyant sur les considérations suivantes :

- L'intermittence et la dissémination de la production d'électricité d'origine renouvelable posent des problèmes que peuvent réduire la flexibilité, l'interconnexion, le pilotage, le stockage. Le stockage intersaisonnier reste cependant sans solution économiquement acceptable à ce jour.
- Dans des secteurs à forte inertie, tels que l'agriculture et le bâtiment, des progrès diffus, fondés sur des solutions éprouvées, peuvent conduire à faire évoluer les usages, les procédés et les infrastructures.

³ Anciennement Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC).

⁴ Le dernier en date a été publié en janvier 2023 : <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023>

- Les investissements mondiaux considérables qui sont engagés depuis quinze ans au titre des énergies renouvelables (production, distribution, usages) ont abouti à l'industrialisation massive de trois technologies nouvelles : les panneaux photovoltaïques, les éoliennes, les batteries lithium-ion, pour lesquelles la Chine a su établir certaines positions monopolistiques.
- L'essor du véhicule électrique va bouleverser la filière automobile, et présente un risque de perte de valeur pour les constructeurs européens de véhicules thermiques.
- Le numérique connaît de multiples mutations : co-conception des processeurs, IA, IoT, calcul rapproché. Dans ce secteur également, il existe un risque de captation des chaînes de valeur.
- La transition énergétique a coûté - et va coûter - très cher. Cela risque de freiner les progrès techniques, faute d'argent et de compétences disponibles. C'est une raison supplémentaire pour identifier les "game changers" et pour bien définir nos priorités.

4- STRUCTURE DU RAPPORT

Le groupe de travail s'est attaché à identifier des "game changers" au sein de 14 filières amenées à jouer un rôle clé dans la transition énergétique. Ces filières sont classées en quatre catégories :

A. Technologies de l'offre en énergie

Énergie solaire, Énergie éolienne, Énergie nucléaire, Biomasse et déchets pour l'énergie.

B. Technologies d'interface offre / demande

Réseaux (électricité, gaz, chaleur), Technologies numériques, Hydrogène bas-carbone, Gaz et carburants bas-carbone (hors hydrogène).

C. Technologies de la demande en énergie

Véhicules légers, Véhicules lourds et aviation, Industrie, Bâtiment.

D. Captage, stockage et utilisation du carbone

Bois et forêts, Captage, stockage et valorisation du CO2 (CCUS).

Pour chaque technologie, nous nous sommes intéressés à l'impact, à la progression, au positionnement français et européen, avant d'indiquer les défis et facteurs clés de succès et de formuler des recommandations.

Ces indications sont davantage une base pour des analyses ultérieures que des feuilles de route. Dans ce domaine très vaste, il nous était impossible de quantifier le niveau atteint par la R&D liée aux opérations françaises, ni sa vitesse de progression. Tout au plus avons-nous pu donner une idée du positionnement des principales entreprises ; celui-ci permet d'espérer, même si les bouleversements en cours rendent les pronostics difficiles. Malheureusement, on ne peut en dire autant du positionnement de la R&D publique, dont dépendra une grande partie de l'avenir. Nous y reviendrons dans la conclusion.

5- REMERCIEMENTS

Les animateurs du groupe de travail remercient chaleureusement Félix Elefant, rapporteur du groupe, pour son dévouement et l'excellence de sa contribution, ainsi que les nombreux intervenants, qu'ils soient membres du groupe ou extérieurs, qui ont apporté la matière au présent rapport :

- Gwenaëlle Avice-Huet (Schneider Electric)
- Monique Axelos (INRAE)
- Michel Berthélémy (AEN)
- François Bertière (FIMINCO REIM)
- Gaëtan Bonhomme (Breakthrough Energy)
- Guillaume Bullier (CRE)
- Frank Carré (CEA)
- Pierre-Franck Chevet (IFPEN)
- Hélène Chraye (Commission Européenne)
- Renaud Crassous (EDF / NUWARD)
- Philippe Cros (ENEDIS)
- Vincent Delcourt (SNCF)
- Olivier Devaux (Think Smartgrids)
- Pierre-Étienne Franc (Hy24 Partners)
- Héloïse Goutte (CEA)
- Thomas Jeannin (DGE)
- Élodie Le Cadre-Loret (ENGIE)
- Jean-Baptiste Lemarois (AIE)
- Fabrice Lemoine (ANCRE)
- David Marchal (ADEME)
- Vincent Mazauric (Schneider Electric / IPCC)
- Jan Mertens (ENGIE)
- Bruno Mesureur (ENPC)
- Isabelle Moretti (Université de Pau)
- Marc Mortureux (PFA)
- Nicolas Raillard (The Shift Project)
- Julia Reinaud (Breakthrough Energy)
- Tristan Rigou (GRDF)
- Bernard Salha (EDF)
- Marie-Noëlle Semeria (TotalEnergies)
- Muriel Thibaut (ANCRE / MESR)

TECHNOLO

A. TECHNOLOGIES DE L'OFFRE EN ÉNERGIE

A1. ÉNERGIE SOLAIRE

- A1.1 Panorama de l'énergie solaire
- A1.2. Vision prospective de l'énergie photovoltaïque
 - A.1.2.1. Impact de l'énergie photovoltaïque
 - A.1.2.2. Évolutions techniques envisagées
 - A.1.2.3. Positionnements respectifs de la Chine et de l'Europe
 - A.1.2.4. Défis et facteurs clés de succès
- A1.3. Recommandations concernant l'énergie solaire

A2. ÉNERGIE ÉOLIENNE

- A2.1. État existant et contraintes de déploiement
- A2.2. Éolien flottant, un game changer pour la transition énergétique
 - A.2.2.1. Impact de l'éolien flottant
 - A.2.2.2. Positionnement de la France et opportunités
 - A.2.2.3. Défis et facteurs clés de succès
- A2.3. Recommandations concernant l'énergie éolienne

A3. ÉNERGIE NUCLÉAIRE

- A3.1. Panorama des technologies nucléaires
 - A.3.1.1. Situation française et défis de R&D correspondants
 - A.3.1.2. Contrainte de déploiement des centrales classiques
- A3.2. Les SMR, un game changer potentiel pour l'énergie nucléaire
 - A.3.2.1. Impact des SMR dans la perspective de la transition énergétique
 - A.3.2.2. Positionnement de la France dans la concurrence mondiale
 - A.3.2.3. Défis et facteurs clés de succès
- A3.3. Recommandations concernant l'énergie nucléaire

A4. BIOMASSE ET DÉCHETS POUR L'ÉNERGIE

- A4.1. Compétitions d'usages
- A4.2. Le biogaz et le gaz de synthèse issu des déchets, un game changer pour la transition énergétique
 - A.4.2.1. Impact du biogaz et du gaz de synthèse issu des déchets
 - A.4.2.2. Procédés de production de gaz à partir de biomasse et de déchets
 - A.4.2.3. Développement de la production de gaz à partir de biomasse et de déchets en France
 - A.4.2.4. Défis et facteurs clés de succès
- A4.3. Recommandations concernant l'usage de la biomasse et des déchets pour l'énergie

A1 ÉNERGIE SOLAIRE

A.1.1. PANORAMA DE L'ÉNERGIE SOLAIRE

L'énergie solaire comporte deux familles principales : la production d'électricité, au moyen de panneaux photovoltaïques, et la production de chaleur, au moyen de capteurs solaires thermiques.

Les systèmes de production de chaleur à basse température absorbent directement la lumière du soleil pour produire de l'eau chaude sanitaire ou pour chauffer des locaux, avec un rendement élevé. Les systèmes à moyenne température (100 à 400°C) sont principalement utilisés pour des applications industrielles. Les systèmes à haute température pourraient être, à terme, des substituts aux combustibles fossiles pour produire de la vapeur et générer de l'électricité, mais n'auront pas d'impact significatif à court ou moyen terme.

Au cours de la période récente, la filière solaire thermique a connu peu de progrès techniques et un déploiement limité, tandis que la filière photovoltaïque s'est développée très rapidement. Une forte croissance de la demande est attendue, qui fait du solaire photovoltaïque une composante indispensable à la transition énergétique. Pour cette raison, l'énergie solaire photovoltaïque apparaît comme un *game changer*.

A.1.2. VISION PROSPECTIVE DE L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE

A.1.2.1. IMPACT DE L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE

Dans son scénario *Net Zero Emission*, l'AIE prévoit une multiplication par trois de la production d'électricité photovoltaïque en Europe au cours de la décennie à venir. Depuis 2009, la baisse significative des coûts de production des cellules photovoltaïques est l'un des principaux facteurs de dynamisme de la filière. Cette baisse des coûts s'explique en premier lieu par des économies de série réalisées par les gigafactories chinoises.

La puissance nominale des installations photovoltaïques raccordées au réseau français était de 15,2 GW mi 2022. Cependant, la puissance produite en moyenne est nettement inférieure à cette valeur nominale, en raison des conditions d'ensoleillement (à cette date, le facteur de charge est inférieur à 15 %). En France, la production d'électricité photovoltaïque représente environ de 5 % de la production totale d'électricité. Il est prévu de doubler d'ici 2028 la puissance des installations photovoltaïques raccordées au réseau.

L'obstacle majeur que constituait initialement le coût des panneaux tend à s'amenuiser, alors que d'autres facteurs limitant le déploiement de l'énergie photovoltaïque en Europe commencent à se faire sentir, notamment les surfaces disponibles, l'insertion paysagère et le dimensionnement du réseau électrique. L'adaptation des panneaux à ces nouvelles contraintes crée des opportunités de valeur ajoutée pour les acteurs européens.

A.1.2.2. ÉVOLUTIONS TECHNIQUES ENVISAGÉES

Le rendement des panneaux industriels à base de silicium s'est continuellement amélioré. À ce jour, les panneaux commerciaux atteignent un rendement de 23 %, et se rapprochent de la limite théorique du silicium (30 %). Plusieurs ruptures technologiques sont envisagées pour dépasser cette limite :

- constituer des cellules tandem, en superposant à des cellules en silicium des couches minces, par exemple des pérovskites, qui sont plus performantes sur certaines plages spectrales.
- utiliser des couches minces photovoltaïques ne nécessitant pas de plaquettes (ou wafers) de silicium (CdTe, CIGS, pérovskite), ou utiliser d'autres semi-conducteurs, notamment de type III-V (GaAs, GaN)⁵.

Cependant, ces solutions de rupture ne sont pas encore prêtes. En particulier, les semi-conducteurs monocristallins III-V présentent des rendements élevés, mais ne sont pas encore réalisables sur de grandes surfaces.

De l'avis des experts, les panneaux à base de silicium monocouches continueront à dominer le marché durant la décennie à venir.

A.1.2.3. POSITIONNEMENTS RESPECTIFS DE LA CHINE ET DE L'EUROPE

À ce stade, la Chine dispose d'une avance considérable en termes de compétitivité et de volume de production, grâce à des investissements massifs engagés depuis 2010, avec un financement public estimé à 150 milliards de dollars. Dans ce contexte, l'enjeu pour l'Europe est de savoir s'il lui sera possible de s'insérer dans le marché des panneaux photovoltaïques de qualité courante, et comment elle peut anticiper l'émergence de panneaux de nouvelle génération.

D'après l'AIE, la part de la Chine dans la chaîne de valeur globale des panneaux photovoltaïques, toutes étapes de fabrication confondues (polysilicium, lingots, plaquettes, cellules et modules), dépasse 80 %. L'exportation de produits photovoltaïques correspond à 7 % du surplus de la balance commerciale chinoise. L'Asie du Sud-Est dans son ensemble produit 98 % des plaquettes de silicium (wafers) utilisées dans le monde.

⁵ Des prototypes de cellules III-V multi-jonctions ont atteint des rendements de 47 %, mais sont encore loin d'une application commerciale.

En l'espace d'une décennie, la production européenne est devenue marginale (2 %). Cependant, depuis l'éclatement du conflit russo-ukrainien, l'Europe affiche sa volonté de relancer son industrie photovoltaïque. Des projets de gigafactories apparaissent, en Italie, en Espagne, en Allemagne et en France. La France possède des atouts en R&D, avec deux instituts de recherche spécialisés, qui sont notamment actifs dans le domaine des panneaux à haut rendement de conversion : l'INES (2013), qui fait partie du CEA-LITEN et qui compte 500 collaborateurs, et l'IPVF (2018), fruit d'une collaboration entre plusieurs entreprises (EDF, Total, Air Liquide). À ce stade, des incertitudes subsistent quant à savoir si ces panneaux pourraient constituer une alternative à la production chinoise, et à quelle échéance.

A.1.2.4. DÉFIS ET FACTEURS CLÉS DE SUCCÈS

- **La dépendance aux importations** : Sans actions volontaristes en Europe, la production chinoise répondra à l'augmentation de la demande. Pour l'Europe, le principal enjeu concerne l'amont de la chaîne de valeur, à savoir les étapes qui permettent de produire les plaquettes de silicium (wafers) nécessaires à la fabrication des cellules photovoltaïques.
- **L'intégration spatiale** : La compétition avec les autres usages des terres peut être surmontée par le développement de solutions d'intégration des cellules photovoltaïques dans de nouvelles applications, ou sur différents supports, par exemple sur des bâtiments, sur des ombrières de parking, sur des installations flottantes, sur des véhicules, ou en combinaison avec des productions agricoles (agrivoltaïsme).
- **L'amélioration du rendement** est un levier pour une meilleure utilisation des surfaces disponibles. Dans une perspective de long terme, les cellules tandem sont une piste intéressante.
- **La fiabilité et la durée de vie des panneaux** : Des travaux de recherches doivent être poursuivis, en particulier dans le domaine des cellules à haut rendement, de nouvelle génération, dont les caractéristiques actuelles sont insuffisantes.
- **La durabilité et le recyclage des panneaux solaires** : Le réemploi des matériaux contenus dans les panneaux est un enjeu de souveraineté et de circularité pour l'Europe. La durabilité représente un enjeu de rentabilité et de compétitivité de la filière photovoltaïque, en particulier pour les panneaux à haut rendement.
- **L'intégration électrique** : La croissance de l'énergie photovoltaïque exige l'anticipation de son intégration dans le système électrique global. L'autoconsommation de l'énergie provenant d'installations individuelles dans lesquelles les panneaux photovoltaïques sont combinés à des batteries peut contribuer à soulager le réseau électrique. Cependant, en l'absence de batteries, l'autoconsommation ne génère pas d'économies de dimensionnement des raccordements au réseau, à cause des pointes de consommation, qui ont lieu hors des heures d'exposition au soleil.
- **L'électronique de puissance** est une brique essentielle pour raccorder les sources photovoltaïques au réseau et gérer leur intermittence. La position des acteurs français dans ce domaine est un atout potentiel qui mériterait d'être renforcé.
- **L'acceptabilité sociétale** : Un soutien public peut être obtenu, et permettre une forte contribution de l'électricité photovoltaïque à la transition énergétique, si les défis socio-économiques et écologiques sont pleinement pris en compte, en particulier la limitation de l'artificialisation des terres et l'intégration dans le paysage.

A.1.3. RECOMMANDATIONS CONCERNANT L'ÉNERGIE SOLAIRE

- **Des investissements majeurs dans l'amont de la chaîne de valeur photovoltaïque** seront nécessaires, si l'Europe souhaite réduire les flux d'importation de silicium pur, de lingots et de plaquettes.
- Des travaux de R&D sont à poursuivre en vue **d'augmenter le rendement des panneaux en silicium**, en partenariat avec les industriels.
- **Des recherches sur la technologie tandem pérovskite/silicium**, puis 100 % pérovskite, sont à mener en vue de produire, de manière industrialisable, des cellules solaires de grande surface, à haut rendement (~35 %) et longue durée de vie (~30 ans).
- Des recherches sont à mener pour **développer de nouvelles applications du solaire photovoltaïque et de nouveaux supports**, en vue d'étendre les types de surfaces disponibles pour son déploiement, en particulier sur des bâtiments (BIPV), sur des véhicules (VIPV), en surplomb de certaines cultures (Agri-PV), et sur l'eau (PV flottant).
- Les travaux de R&D portant sur de nouvelles surfaces doivent être accompagnés **d'une analyse d'impact du déploiement de l'énergie photovoltaïque** sur l'environnement, la biodiversité, la société et le climat, notamment à travers la modification de l'albédo des surfaces couvertes.
- **Des jumeaux numériques de centrales solaires photovoltaïques** sont à élaborer, intégrant la simulation des cellules solaires, et le fonctionnement des convertisseurs électroniques.
- **Une démarche d'écoconception doit être soutenue** en vue d'élaborer des panneaux solaires économes en matériaux critiques ou toxiques⁶.
- L'Europe doit se doter de moyens significatifs pour le **réemploi des matériaux issus du recyclage des panneaux**, dans une logique d'économie circulaire.
- La production chinoise s'effectue à partir d'électricité fortement carbonée. **Une taxe CO2 aux frontières européennes** pourrait avoir un impact sur la compétitivité de certaines importations.
- **L'utilisation de capteurs solaires thermiques doit être encouragée** en tant qu'appoint utile pour la production d'eau chaude sanitaire et le chauffage des bâtiments.

⁶ À titre d'illustration, les panneaux perovskite contiennent du plomb. Les cellules CdTe contiennent du cadmium qui est néfaste pour la santé et l'environnement.

A2 ÉNERGIE ÉOLIENNE

A.2.1. ÉTAT EXISTANT ET CONTRAINTES DE DÉPLOIEMENT

L'Europe est l'un des principaux producteurs d'énergie éolienne, avec environ 35 % de la capacité éolienne installée dans le monde⁷. L'Union européenne s'est fixé l'objectif ambitieux de porter sa capacité éolienne installée de 220 GW en 2021 à 300 GW d'ici 2030. À la fin de l'année 2022, la France avait installé de 20,4 GW de capacité éolienne terrestre, et 0,5 GW de capacité éolienne en mer. Au cours de l'année 2022, 2,0 GW ont été raccordés, dont un quart (480 MW) provient de la mise en service du premier parc d'éoliennes en mer en France⁸. Le pays vise 35 GW de capacité éolienne terrestre et 5 GW de capacité éolienne en mer installée d'ici 2028, conformément à sa stratégie énergétique nationale⁹.

La puissance produite en moyenne par une éolienne au cours d'une année n'est qu'une fraction de la puissance installée : la production dépend du facteur de charge de l'éolienne, qui dépend lui-même du type d'éolienne et des caractéristiques du site où celle-ci est implantée. Les vents étant plus puissants et réguliers en mer, le facteur de charge des éoliennes marines est supérieur à celui des éoliennes terrestres. Pour les éoliennes actuellement installées en mer, le facteur de charge est en moyenne compris entre 20 et 35 %, et il est estimé entre 30 et 55 % pour les éoliennes de nouvelle génération¹⁰.

1- Éoliennes terrestres – Une filière mature, dont la croissance est désormais contrainte

Les progrès technologiques des dernières décennies ont eu pour effet une augmentation significative des dimensions des éoliennes. En 30 ans, la puissance nominale unitaire des éoliennes déployées dans les parcs d'exploitation a été multipliée par 30, ce qui a permis une baisse importante du coût de l'électricité produite, en tirant avantage de l'effet d'échelle¹¹. À ce jour, l'électricité d'origine éolienne est produite à un coût compétitif par rapport au coût de l'électricité d'origine fossile. Cependant, le déploiement des éoliennes se heurte à trois contraintes : la puissance du vent est intermittente (ce qui induit des surcoûts pour le stockage et le dimensionnement du réseau), les terres disponibles sont limitées, et la présence des éoliennes pose des problèmes d'acceptabilité.

2- Éoliennes posées en mer – Une filière en pleine croissance, mais qui va manquer de sites éligibles

Les éoliennes en mer bénéficient de vents plus puissants et plus

réguliers qu'à terre. Elles permettent en outre d'augmenter la production nationale d'électricité sans mobiliser d'espace à terre. Des conflits d'usages peuvent néanmoins subsister sur certains sites, notamment près des zones de pêche ou des couloirs de transport maritime, et les éoliennes peuvent être confrontées à des problèmes d'insertion paysagère, en particulier à proximité des sites touristiques. Par ailleurs, les éoliennes posées, qui représentent à ce jour la quasi-totalité des éoliennes en mer, ne peuvent pas être implantées dans des eaux d'une profondeur supérieure à 60 m, ce qui limite les sites éligibles.

A.2.2. ÉOLIEN FLOTTANT, UN GAME CHANGER POUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

A.2.2.1. IMPACT DE L'ÉOLIEN FLOTTANT

La plus grande partie des ressources en énergie éolienne en mer se trouve dans des eaux dont la profondeur est supérieure à 60 m. Les éoliennes flottantes, bien que plus chères que les éoliennes posées, pourraient être une alternative intéressante, car, déployées au large, elles permettront de bénéficier de régimes de vents plus puissants et plus stables, et permettront d'étendre la liste des sites d'exploitation possibles, tout en atténuant les conflits d'usages. Des travaux de R&D significatifs sont en cours pour améliorer la conception des flotteurs et des amarres, et pour optimiser l'implantation des fermes, en vue de réaliser le plein potentiel de l'éolien flottant.

A.2.2.2. POSITIONNEMENT DE LA FRANCE ET OPPORTUNITÉS

La France bénéficie du 2^e gisement d'énergie éolienne en mer en Europe après le Royaume-Uni¹².

La chaîne de valeur du secteur éolien en mer comprend des acteurs français expérimentés dans la conduite de projets, parmi lesquels EDF Renouvelables, ENGIE ou TotalEnergies. De nombreux acteurs de la construction navale, de l'industrie offshore et de l'ingénierie sont en outre impliqués comme partenaires de ces projets (Eiffage, Vinci, Naval Group, Bouygues TP, Chantiers de l'Atlantique, Technip Energies, Doris, Bourbon, etc.).

Les entreprises françaises sont en retard dans le domaine des pales et des nacelles par rapport à leurs concurrents européens, les usines de fabrication de pales de Cherbourg et du Havre appartenant désormais à des groupes étrangers. L'expérience acquise avec le développement des plateformes pétrolières pourrait offrir aux entreprises françaises l'opportunité de se positionner sur le marché des flotteurs et des ancres. Les savoir-faire et les capacités opérationnelles des acteurs de l'Oil

7 <https://www.irena.org/publications/2022/Apr/Renewable-Capacity-Statistics-2022>

8 <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publicationweb/526>

9 <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Synth%C3%A8se%20finale%20Projet%20de%20PPE.pdf>

10 Le facteur de charge du parc éolien offshore de Saint Nazaire (premier parc offshore français, mis en service en juin 2022), a été de 50,4 % pour le mois de janvier 2023.

11 Les éoliennes les plus puissantes dépassent aujourd'hui 10 MW. L'éolienne Siemens Gamesa SG 14-222 DD, d'une puissance nominale de 14 MW, est prévue pour 2024.

12 <https://www.ecologie.gouv.fr/eolien-en-mer-0>

& Gas sont mobilisables pour assurer les services d'entretien et de réparation des parcs éoliens en mer.

En termes de R&D, la France peut s'appuyer sur l'infrastructure de recherche THEOREM, une structure sans équivalent en Europe, née de la mise en réseau des moyens d'essais en ingénierie marine de l'Ifremer et de l'École Centrale de Nantes. Cette infrastructure, désormais rattachée à la fondation Open-C, a pour objet de mener des activités de recherche et des projets collaboratifs avec des industriels français et étrangers.

A.2.2.3. DÉFIS ET FACTEURS CLÉS DE SUCCÈS

Contrairement aux éoliennes posées pour lesquelles la turbine tripale à axe horizontal et à nacelle pivotante face au vent est le standard désormais bien établi, il n'existe pas encore de consensus sur le design optimal d'une éolienne flottante. Des travaux de R&D importants sont en cours pour déterminer les meilleurs choix de conception, et notamment le type de flotteur (SPAR, TLP, etc.), le mode d'orientation de la turbine (orientation de la nacelle ou orientation du flotteur), le mode de transmission de l'énergie à terre (sous forme électrique ou sous forme d'e-fuels), le type d'ancrages.

Il est possible que plusieurs types d'éoliennes flottantes émergent en parallèle, pour répondre aux conditions particulières des différents sites d'exploitation.

Les principaux défis et facteurs clés de succès sont les suivants :

- **Les simulations et les moyens de calcul**, les simulations numériques sont indispensables pour optimiser la conception des éoliennes flottantes et dimensionner les ouvrages. Ces simulations requièrent des algorithmes spécifiques et de très grandes capacités de calcul (supercalculateurs) pour résoudre le comportement dynamique des éoliennes flottantes sous les effets combinés du vent, des vagues, des courants, et des efforts d'ancrage.
- **Les réalisations expérimentales à différentes échelles** et en particulier l'expérimentation en mer de démonstrateurs d'échelle 1:1, sont des sources de données indispensables pour consolider les modèles numériques. Un accès aux données issues de campagnes d'essais menées en conditions réelles constitue un avantage concurrentiel majeur.
- **Les composants dédiés**, de nouveaux matériaux en polymères extensibles et résistants au milieu marin sont nécessaires pour les amarres. Par ailleurs, le développement de câbles électriques sous-marins résistants à la fatigue causée par les mouvements du flotteur est un défi.
- **La maintenance prédictive**, les outils numériques permettent d'anticiper l'endommagement des points critiques, et ainsi de planifier les opérations de maintenance, afin d'en optimiser le coût. Les données recueillies tout au long du cycle d'exploitation des éoliennes actuellement déployées permettront d'affiner encore ces calculs.
- **La montée en échelle** est un levier majeur de la baisse des coûts de fabrication, d'installation et de maintenance des éoliennes.

- **La dépendance aux matériaux critiques**, les générateurs électriques des éoliennes en mer sont des machines synchrones à aimants permanents. Ces aimants contiennent des lanthanides (néodyme) dont le prix augmente rapidement du fait d'une demande croissante. En 2020, la Chine assurait 80 % de la production mondiale d'aimants au néodyme.
- **Le recyclage des pales (matériaux composites)** n'a pas encore atteint le stade industriel. Des recherches en cours¹³ présentent des résultats encourageants.
- **Le temps d'accès à la mer** est très long en France, en raison de la durée des procédures administratives (près de 10 ans pour obtenir l'autorisation d'implanter un parc en mer). Les nouvelles législations vont dans le sens d'un raccourcissement des délais¹⁴, mais leur effet devra être vérifié à l'usage.
- **Des études d'impact** environnemental des différentes solutions technologiques sont à mener de manière systématique pour tenir compte des usages de la mer, et notamment de la pêche.

A.2.3. RECOMMANDATIONS CONCERNANT L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

- **La poursuite d'investissements dans la R&D** est nécessaire pour éclairer les choix de conception des éoliennes flottantes et perfectionner des briques technologiques utiles, comme les matériaux élastomères pour les amarres, et les câbles dynamiques.
- **Le développement des moyens de calcul haute performance (HPC)** est nécessaire à l'optimisation de la conception des éoliennes et de leur maintenance.
- **Les sites d'essais en mer** faisant partie des infrastructures de recherche telles que THEOREM doivent être étendus pour augmenter les capacités d'accueil des réalisations expérimentales, afin d'accélérer les progrès de la filière.
- **Les contraintes réglementaires et les temps d'accès à la mer** doivent être réduits afin d'accélérer les déploiements commerciaux.
- Il serait utile de réserver **des terrains à proximité des ports** pour assembler les éoliennes au plus près des sites de déploiement.
- **La coopération européenne** doit être encouragée pour favoriser l'adoption de normes techniques et réglementaires communes, ainsi que pour échanger les meilleures pratiques et les leçons apprises, la France pouvant, par exemple, bénéficier du savoir-faire de ses voisins en matière de pales et de nacelles, et trouver des débouchés aux compétences qui sont les siennes en termes de flotteurs, d'interactions vagues-structures et d'opérations en mer.

¹³ Le projet ZEBRA développe des pales en résine thermoplastique 100% recyclable. Le projet CETE porte sur une nouvelle technique de séparation des matériaux composites des pales.

¹⁴ Notamment l'article 7 du projet de loi sur les industries vertes.

A3 ÉNERGIE NUCLÉAIRE

L'énergie nucléaire a vocation à jouer un rôle clé dans le bouquet énergétique des pays pouvant assurer un bon niveau de sûreté, en tant que source d'énergie bas carbone, fiable et relativement pilotable.

A.3.1. PANORAMA DES TECHNOLOGIES NUCLÉAIRES

La production d'énergie nucléaire est l'objet d'un large spectre de technologies qui se caractérisent par des niveaux de maturité et des horizons de développement variés.

Les centrales de 2^e génération dominent actuellement la production d'énergie nucléaire dans le monde. Elles seront progressivement remplacées par des centrales de 3^e génération, comme l'EPR, qui répondent à des normes de sécurité supérieures.

Les réacteurs de quatrième génération, principalement à neutrons rapides, et à plus long terme la fusion nucléaire sont des pistes de recherche actives, mais leur déploiement industriel en France n'est pas attendu avant 2050 et la fin du XXI^e siècle, respectivement.

A.3.1.1. SITUATION FRANÇAISE ET DÉFIS DE R&D CORRESPONDANTS

La filière nucléaire française occupe une position unique en Europe, en ce qu'elle couvre l'ensemble du cycle du combustible, de l'enrichissement de l'uranium au stockage des déchets, en passant par le retraitement et l'utilisation du plutonium. Indépendamment des recherches portant sur les réacteurs de 4^e génération et les SMR, des travaux de recherche seront à mener pour :

- prolonger la durée de vie des réacteurs actuels et améliorer leur flexibilité,
- utiliser un combustible nucléaire plus résistant aux accidents¹⁵,
- accompagner le stockage géologique CIGEO des déchets,
- assainir et démanteler les installations obsolètes,
- accompagner la construction des EPR 2.

Le maintien à terme de l'activité de la filière française dépendra notamment des moyens qui seront déployés en vue de restaurer la capacité de production de nouveaux réacteurs.

A.3.1.2. CONTRAINTE DE DÉPLOIEMENT DES CENTRALES CLASSIQUES

Depuis le début de l'ère nucléaire, les réacteurs installés sont de plus en plus grands. Pour des raisons d'économies d'échelle, la puissance unitaire des réacteurs dépasse désormais nettement 1 GW électrique. Dans les pays industrialisés, le déploiement de nouveaux réacteurs de forte puissance se heurte cependant au manque de sites éligibles pour le refroidissement des centrales. En France en particulier, l'installation de grands réacteurs à proximité des cours d'eau est désormais fortement contrainte par le niveau de l'eau en été, lorsque le débit des fleuves est au plus bas.

A.3.2. LES SMR, UN GAME CHANGER POTENTIEL POUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

Des petits réacteurs modulaires, d'une puissance thermique inférieure à 1000 MW, permettraient, à terme, de substituer une économie de série aux économies d'échelle des réacteurs actuels. Ces petits réacteurs, couramment désignés par l'acronyme SMR (Small Modular Reactor), présentent l'avantage de pouvoir être fabriqués en usine sous forme de modules, avant d'être acheminés jusqu'au site d'exploitation pour y être assemblés. Si les quantités sont suffisantes, ce principe de fabrication permettrait une meilleure productivité, et un meilleur contrôle de la qualité des pièces. Par comparaison avec les centrales classiques, les SMR offrent une meilleure autonomie de refroidissement, ce qui constitue un avantage de sûreté passive, et consomment moins d'eau pour leur refroidissement.

Les technologies requises pour le développement des premiers SMR sont connues pour l'essentiel. Pour cette raison, le sujet des SMR fait l'objet d'efforts de recherche significatifs dans la plupart des pays nucléarisés, et donne lieu à une profusion de projets de développement à travers le monde. Les SMR sont susceptibles de connaître un déploiement en France à partir de 2030, et pourraient être déployés à grande échelle dans le monde à moyen terme, ce qui en ferait un game changer pour le paysage énergétique.

A.3.2.1. IMPACT DES SMR DANS LA PERSPECTIVE DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Les SMR sont principalement destinés à trois types d'usages : la production directe de chaleur, la production d'électricité, ou la cogénération. Cependant, l'installation de réacteurs nucléaires à proximité des villes est problématique, ce qui limiterait le développement de certains de ces usages.

1- Utilisation des SMR comme source de chaleur bas carbone

Un champ d'application des SMR concerne la fourniture de chaleur pour le chauffage urbain ou pour l'industrie. Il existe notamment un besoin de sources de chaleur de basse ou moyenne température à destination d'usages qui seront amenés à se développer dans le contexte de la transition énergétique et du changement climatique, comme par exemple la chimie des carburants de synthèse ou le dessalement de l'eau.

2- Utilisation des SMR pour produire de l'électricité bas carbone

La chaleur générée par un SMR peut être convertie en électricité au moyen d'une turbine, comme dans une centrale classique, avec un rendement énergétique d'environ 30 %.

¹⁵ Ceci conditionne l'éligibilité du nucléaire aux financements consentis par la Commission Européenne au titre des investissements durables.

Les principaux marchés cibles des SMR sont le remplacement des centrales à charbon existantes, l'électrification des villes de taille moyenne et des pôles industriels isolés, et les réseaux dont la capacité est insuffisante pour raccorder une centrale nucléaire classique.

3- Utilisation des SMR pour la production d'énergie multi-usages

Parallèlement à la production d'électricité, la valorisation de la chaleur résiduelle, qui représente 70 % de la puissance totale exploitable, est un enjeu d'efficacité énergétique, mais aussi un enjeu économique majeur. Des pistes sont la cogénération (production d'électricité et de chaleur) ou la tri-génération (production d'électricité, de chaleur et de vapeur, par exemple pour l'électrolyse à haute performance¹⁶).

A.3.2.2. POSITIONNEMENT DE LA FRANCE DANS LA CONCURRENCE MONDIALE

1- L'Europe accuse un retard important dans la course au développement des SMR

Hors de l'UE, les grands pays nucléaires (États-Unis, Royaume-Uni, Chine, Russie, Corée du Sud) ont tous au moins un projet de SMR en cours. Un SMR russe est déjà en fonctionnement et le réacteur américain BWRX300 semble le plus avancé sur le plan commercial avec des projets de déploiement dans plusieurs pays.

2- La France pourrait jouer le rôle de leader européen

Fort de son excellence technique en matière de réacteurs à eau pressurisée, la France pourrait jouer un rôle de leader européen dans le déploiement de la technologie SMR à moyen terme. TechnicAtome, Naval Group et le CEA travaillent depuis longtemps sur les éléments clés de la technologie SMR désormais portée par l'entreprise NUWARD, filiale du groupe EDF.

A.3.2.3. DÉFIS ET FACTEURS CLÉS DE SUCCÈS

1- L'émergence d'un leader européen du SMR suppose d'engager des collaborations européennes suffisamment tôt dans le processus de développement, notamment pour :

- **Atteindre une taille de marché critique** : le marché intérieur français n'est pas assez vaste pour rentabiliser le développement d'un SMR et l'exportation est donc un objectif à privilégier.
- **Accéder à un vivier de compétences suffisamment large** : la filière nucléaire française doit reconstituer ses compétences et ses effectifs dans le cadre de la relance du nucléaire.

- **Favoriser la convergence de certaines normes** : la disparité des référentiels de sûreté propres à chaque pays entrave le développement des SMR. Un effort d'harmonisation s'impose au moins au niveau européen.

2- La prévention de la prolifération nucléaire.

- Le modèle économique des SMR repose sur une diffusion géographique importante, ce qui nécessite des précautions de façon à prévenir la prolifération nucléaire.

A.3.3. RECOMMANDATIONS CONCERNANT L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

1- Concernant la filière nucléaire en général :

- Rétablir la filière nucléaire française, comme une filière d'excellence, en encourageant la formation de personnels qualifiés (chefs de projet, techniciens, ingénieurs, docteurs) spécialisés dans les disciplines nucléaires.
- Améliorer la flexibilité des réacteurs actuels et futurs afin d'assurer la meilleure interface possible avec une part croissante de production électrique renouvelable.
- Développer les innovations qui seront nécessaires pour prolonger la durée des réacteurs actuels et pour accompagner la construction des EPR 2.
- Sécuriser l'approvisionnement de long terme en uranium, en s'assurant d'avoir des contrats avec des fournisseurs suffisamment variés.
- Développer l'utilisation d'un combustible nucléaire plus résistant aux accidents.
- Développer les moyens d'utilisation du combustible mixte uranium-plutonium (MOX) en proportion suffisante pour permettre de recycler tout le plutonium provenant du retraitement des combustibles et éviter de saturer CIGEO.

2- Concernant les SMR spécifiquement :

- Favoriser la collaboration européenne autour de projets de développement de SMR, en commençant par les pays les plus enclins à s'associer à la France.
- Promouvoir l'harmonisation des référentiels de sûreté des pays avec lesquels la France serait susceptible de travailler.
- Identifier les clients potentiels, évaluer leurs attentes, les renseigner sur les technologies en développement.

¹⁶ L'intérêt de l'électrolyse à haute température est abordé au B.3.5.3, du chapitre consacré à l'hydrogène.

A4 BIOMASSE ET DÉCHETS POUR L'ÉNERGIE

A.4.1 COMPÉTITIONS D'USAGES

En 2021, les énergies renouvelables représentaient 13 % de la consommation d'énergie primaire française. Un peu plus de la moitié de ces EnR (53 %) était issue de la biomasse, sous la forme de bois énergie (36 %), de biocarburants liquides (6 %), de biogaz (5 %), de déchets renouvelables (4 %). La demande de biomasse pour l'énergie est en constante augmentation.

Les types de biomasse et de déchets qui servent à produire de l'énergie se trouvent souvent en situation de concurrence avec d'autres usages :

- **Usage des terres agricoles pour les cultures principales :** les biocarburants de 1ère génération sont en concurrence avec les cultures pour l'alimentation.
- **Usage du bois :** le bois énergie peut être en compétition avec le bois d'œuvre et le bois d'industrie.
- **Usage des résidus agricoles :** les biogaz peuvent être en concurrence avec les litières pour les animaux, les engrais organiques, les matériaux de synthèse et les matériaux de construction.
- **Usage des effluents d'élevage :** les biogaz peuvent être en concurrence avec les engrais.
- **Usage des déchets :** la production de chaleur peut être en concurrence avec le recyclage.

D'une manière générale, il convient de hiérarchiser les usages de la biomasse et des déchets et de privilégier le développement de technologies qui étendent le spectre des intrants exploitables, au-delà des usages actuels.

À titre d'exemple, les biocarburants de deuxième génération, qui exploitent une variété de déchets et de résidus biologiques, et les biocarburants de troisième génération, qui pourraient être obtenus à partir de micro algues, offrent l'avantage de réduire la compétition avec les usages alimentaires.

Dans le même ordre d'idées, différents procédés existants ou en cours de développement permettent de produire du gaz à partir de biomasse ou de déchets ménagers ou industriels tout en limitant les conflits avec d'autres usages. Compte tenu de la croissance rapide et des perspectives de développement de cette filière, la production de gaz à partir de biomasse et de déchets apparaît comme un game changer pour la transition énergétique.

A.4.2. LE BIOGAZ ET LE GAZ DE SYNTHÈSE ISSU DES DÉCHETS, UN GAME CHANGER POUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

A.4.2.1. IMPACT DU BIOGAZ ET DU GAZ DE SYNTHÈSE ISSU DES DÉCHETS

Le biogaz et le gaz de synthèse issu des déchets sont une source d'énergie durable qui offre des avantages environnementaux considérables, notamment la possibilité de remplacer le gaz fossile. Environ 60 % de la production sont actuellement injectés dans le réseau de gaz, et cette pratique est en forte croissance. Environ 28 % de la production sont utilisés pour la cogénération de chaleur et d'électricité, tandis que 12 % sont utilisés pour produire exclusivement de la chaleur.

La quasi-totalité du gaz produit à partir de la biomasse et des déchets provient à ce jour de la méthanisation. La biomasse utilisée dans les méthaniseurs provient essentiellement (à 82 %) des résidus de l'agriculture, des effluents d'élevage et des cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE), de déchets non dangereux (12 %) et des boues des stations d'épuration (6 %). En l'état, les conflits avec les usages alimentaires sont donc limités.

A.4.2.2. PROCÉDÉS DE PRODUCTION DE GAZ À PARTIR DE BIOMASSE ET DE DÉCHETS

- **La méthanisation** est un procédé mature exploitant de la biomasse. Elle produit du biogaz qui peut être valorisé en biométhane utilisable comme combustible pour produire de la chaleur ou de l'électricité. Elle produit aussi du CO₂ biogénique qui peut être utilisé dans l'industrie. La méthanisation produit en outre du digestat, un fertilisant organique pouvant remplacer les engrais minéraux, qui proviennent aujourd'hui essentiellement de la pétrochimie.
- **La pyrogazéification** est un procédé thermochimique en cours de développement, qui traite les déchets solides non fermentescibles¹⁷ pour produire du méthane de synthèse directement injectable dans les réseaux gaziers, et utilisable dans les usages domestiques, industriels, et de mobilité. En outre, ce procédé peut produire du charbon, un résidu riche en carbone qui peut être retourné au sol, offrant ainsi un moyen de séquestration durable du carbone.
- **La gazéification hydrothermale** est un procédé à l'état de recherche, qui permet de valoriser la biomasse humide laissée de côté par la méthanisation.

¹⁷ C'est-à-dire des déchets biologiques, tels que des résidus de bois, mais aussi des déchets non-biologiques tels que des déchets de plastique.

A.4.2.3. DÉVELOPPEMENT DE LA PRODUCTION DE GAZ À PARTIR DE BIOMASSE ET DE DÉCHETS EN FRANCE

La croissance des capacités de méthanisation s'est considérablement accélérée depuis 2019. Dès la fin de l'année 2022, la filière biogaz avait injecté plus de 6 TWh dans le réseau gaz, dépassant ainsi l'objectif fixé pour l'année 2023¹⁸. Pour l'année 2025, l'objectif visé est de 25 TWh, ce qui correspond à 5 % de la consommation actuelle de gaz naturel.

Cependant, les méthaniseurs et les services de maintenance qui leur sont associés sont largement importés de l'étranger, notamment d'Allemagne, ce qui pose un problème de balance commerciale.

La filière de la pyrogazéification est prête à s'industrialiser, avec une quinzaine de projets en cours de développement, et l'objectif de produire 6 TWh par an en 2030.

Concernant la gazéification hydrothermale, il n'existe pas encore de démonstrateur en France.

A.4.2.4. DÉFIS ET FACTEURS CLÉS DE SUCCÈS

- **Les mauvaises conditions d'épandage du digestat** utilisé comme engrais organique pourraient causer des problèmes environnementaux et de santé.
- **Le report de la récolte des CIVE**, en vue d'en augmenter le rendement, pourrait faire courir le risque d'un retard dans la production des cultures alimentaires principales.
- **Les conditions de culture des CIVE** doivent être soigneusement surveillées pour éviter toute détérioration de l'environnement et de la qualité des sols.
- **La création d'une filière industrielle française de fabrication de méthaniseurs** et de services associés contribuerait à l'autonomie de la France en termes d'énergie et de production d'engrais.
- **L'acceptabilité des installations de méthanisation** par les communautés locales est un autre risque important à prendre en compte pour assurer la viabilité à long terme de cette filière.
- **L'accès à l'eau est un défi majeur** pour la production de biomasse. Les évolutions climatiques à venir risquent d'aggraver les tensions qui pèsent déjà sur cette ressource fondamentale.

A.4.3. RECOMMANDATIONS CONCERNANT L'USAGE DE LA BIOMASSE ET DES DÉCHETS POUR L'ÉNERGIE

L'avenir de la biomasse doit s'appréhender dans le contexte plus large de la bioéconomie. L'objectif double consistant à exploiter la biomasse pour l'énergie et à assurer la souveraineté alimentaire nécessitera de trouver les moyens de mobiliser davantage de biomasse, tout en émettant moins de carbone et sans nuire à la biodiversité, alors même que le changement climatique impacte les activités agricoles. Il en va de même pour la question des déchets, dont on peut anticiper qu'ils constitueront à l'avenir une denrée sujette à des conflits d'usage, du fait de l'augmentation attendue des besoins de recyclage.

- **Une approche systémique de l'exploitation de la biomasse et des déchets** est nécessaire pour garantir la cohérence des actions au regard des objectifs généraux que sont le bouclage du cycle du carbone, et la préservation des écosystèmes.
- **Les différents usages de la biomasse et des déchets doivent être hiérarchisés**, en donnant la priorité aux usages stratégiques.
- **Le développement de la biomasse doit être lié aux spécificités territoriales**, de manière à déterminer quels types de biomasse exploiter localement, et à quels usages cette biomasse doit être destinée.
- **La reconstitution de la biomasse doit être envisagée à différentes échelles de temps**, en tenant compte des effets du changement climatique.
- Le développement d'une filière industrielle dans le domaine de **la fabrication et la maintenance des méthaniseurs** serait un atout pour l'économie française, et son autonomie stratégique.
- **L'industrialisation de la pyrogazéification** nécessite de poursuivre les investissements en cours.
- **Le développement de la gazéification hydrothermale** nécessite de poursuivre des efforts de R&D.

¹⁸ <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/20200422%20Synthe%CC%80se%20de%20la%20PPE.pdf>

TECHNOLOGO

B. TECHNOLOGIES D'INTERFACE OFFRE / DEMANDE

B1. RÉSEAUX (ÉLECTRICITÉ, GAZ, CHALEUR)

- B.1.1. Vision prospective de l'équilibre offre / demande
- B.1.2. Game changers : flexibilité, stockage et interfaces
 - B.1.2.1. Impact des changements des réseaux sur la transition énergétique
 - B.1.2.2. Positionnement de l'Europe et de la France
 - B.1.2.3. Défis et facteurs clé de succès
- B.1.3. Recommandations concernant les réseaux énergétiques

B.2. TECHNOLOGIES NUMÉRIQUES

- B.2.1. Impact sur la transition énergétique
- B.2.2. Principales évolutions technologiques
- B.2.3. Positionnement français et européen
- B.2.4. Défis et facteurs clés de succès
- B.2.5. Recommandations concernant les technologies numériques

B.3. HYDROGÈNE BAS CARBONE

- B.3.1. Notion d'hydrogène bas-carbone
- B.3.2. Utilisations de l'hydrogène
 - B.3.2.1. Panorama des utilisations actuelles de l'hydrogène
 - B.3.2.2. Anticipation des usages futuruse
 - B.3.2.3. État de la production mondiale
- B.3.3. Procédés de production d'hydrogène
 - B.3.3.1. Les technologies émettrices de gaz à effet de serre
 - B.3.3.2. Les technologies bas-carbone
- B.3.4. L'hydrogène naturel, un game changer potentiel
 - B.3.4.1. Impact dans la perspective de la transition énergétique
 - B.3.4.2. Positionnement de la France dans la concurrence mondiale
 - B.3.4.3. Défis et facteurs clés de succès
- B.3.5. Game changer : l'hydrogène bas-carbone produit par électrolyse
 - B.3.5.1. Impact dans la perspective de la transition énergétique
 - B.3.5.2. Positionnement de l'Europe dans la concurrence mondiale
 - B.3.5.3. Défis et facteurs clés de succès
- B.3.6. Recommandations
 - B.3.6.1. Concernant la filière hydrogène en général
 - B.3.6.2. Concernant le game changer hydrogène naturel
 - B.3.6.3. Concernant l'hydrogène bas-carbone produit par électrolyse

B.4. GAZ ET CARBURANTS BAS CARBONE (HORS HYDROGÈNE)

- B.4.1. Les familles de gaz et carburants bas-carbone
- B.4.2. Les gaz et les carburants bas-carbone, un game changer pour les transports de longue distance énergétique
 - B.4.2.1. Impact des gaz et carburants bas-carbone
 - B.4.2.2. Positionnement de la France dans la concurrence mondiale
 - B.4.2.3. Défis et facteurs clés de succès
- B.4.3. Recommandations concernant les gaz et carburants alternatifs

B1 RÉSEAUX (ÉLECTRICITÉ, GAZ, CHALEUR)

B.1.1. VISION PROSPECTIVE DE L'ÉQUILIBRE OFFRE / DEMANDE

Dans les 30 ans à venir, l'abandon progressif des combustibles fossiles provoquera, selon RTE, une augmentation moyenne de 35 % des consommations électriques en France, faisant de l'électricité le vecteur énergétique central en 2050.

À ce jour, les énergies fossiles répondent à la plus grande part des besoins de flexibilité du système énergétique, en couvrant notamment 75 % de l'augmentation des consommations lors de la pointe hivernale. La baisse de cette capacité de production pilotable, l'augmentation de la part des énergies renouvelables intermittentes et l'augmentation de la consommation soumettront le réseau électrique à de très fortes contraintes. Pour maintenir une base énergétique minimale, réguler la fréquence, et maintenir la tension d'alimentation, il faudra renforcer le système électrique.

Les besoins d'investissements dans le réseau électrique dépendront :

- du rythme de déploiement des nouvelles sources de production d'électricité, et des moyens de flexibilité, dont le stockage, qui faciliteront l'intégration de ces nouvelles sources au réseau,
- du rythme de l'électrification des usages (en particulier la mobilité électrique et les services associés) et de la décarbonation de l'industrie (notamment la production d'hydrogène vert),
- des comportements collectifs qui affecteront la flexibilité de la demande et la sobriété énergétique,
- de la contribution des réseaux de chaleur et de gaz pour réduire les contraintes pesant sur le réseau électrique.

Des investissements dans les réseaux de gaz (méthane et hydrogène) et les réseaux de chaleur seront donc nécessaires à l'appui du renforcement du réseau électrique.

B.1.2. GAME CHANGERS : FLEXIBILITÉ, STOCKAGE ET INTERFACES

B.1.2.1. IMPACT DES CHANGEMENTS DES RÉSEAUX SUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Pour renforcer son indépendance énergétique, la France doit engager des investissements significatifs dans la recherche et dans le développement de technologies qui sont nécessaires aux évolutions du réseau électrique. Ce réseau, composite par nature, tend à se complexifier progressivement avec la décentralisation des moyens de production et la diversité des technologies impliquées (intégration de points de recharges de véhicules électriques, raccordements d'EnR, etc.). Des moyens de flexibilité nouveaux devront donc être mis en œuvre pour coordonner l'offre, la demande et le stockage de l'énergie (sachant que l'électricité est difficile à stocker). Ces moyens devront s'appuyer sur un ensemble de solutions technologiques et non technologiques, dont certaines sont déjà matures et d'autres en devenir. D'une manière générale, l'évolution du mode de gestion du réseau électrique vers un pilotage intelligent et décentralisé, peut être qualifié de game changer.

1- Solutions de soutien à l'équilibre offre / demande

- **La modulation de la puissance produite** par les moyens de production pilotables, y compris nucléaires, permet d'ajuster l'offre aux fluctuations de la demande en électricité, pour autant que la part de ces moyens pilotables dans la production globale soit suffisante.
- **La modulation de la demande** par des incitations de différentes natures (applications incitatives, offres tarifaires et signaux pointes mobiles) permet de soulager le réseau lors des pointes de consommation.
- **Les interconnexions à grande échelle**, typiquement assurées par des lignes HVAC ou HVDC, permettent le lissage spatial des excédents ou déficits de production régionale ou nationale, ce qui permet de compenser une partie de la variabilité des énergies renouvelables intermittentes, et de profiter de la diversité des sources régionales.
- **L'interfaçage entre les différents réseaux d'énergie** (électricité, gaz, carburants liquides, hydrogène, chaleur) apporte des moyens de flexibilité pour gérer les variations de consommation et de production tout au long de l'année. À titre d'exemple, les pompes à chaleur (PAC) hybrides, combinant une PAC électrique, une chaudière à condensation et un système de régulation, permettent un effacement électrique efficace en périodes de forte tension sur le réseau

électrique et lorsque le rendement de la PAC est le plus faible (au plus froid de l'hiver) sans réduire le confort de chauffage des utilisateurs. Cette solution est particulièrement pertinente pour l'habitat collectif et les bâtiments d'activité (industrie et services), et peut également être avantageuse pour les particuliers disposant d'une installation de chauffage au gaz.

- **Les solutions de stockage de l'énergie à l'échelle de la journée**, telles que les batteries stationnaires de grande capacité (notamment les batteries flux qui sont en cours de déploiement dans le monde) permettent d'ajuster l'offre et la demande d'électricité, en lissant les pointes de consommation et les variations de production des énergies intermittentes. À l'avenir, ces solutions pourraient être complétées par le "véhicule-réseau" ou V2G (vehicle-to-grid), c'est-à-dire la mobilisation de la capacité de stockage des batteries des véhicules électriques en stationnement pour soutenir l'effort d'équilibrage de l'offre et de la demande, en accumulant de l'énergie pendant les heures creuses de la journée, et en la restituant au réseau lors des pointes de consommation quotidiennes. Cependant, il importe de noter qu'en l'absence d'une gestion planifiée de la charge des batteries à l'échelle de la journée, l'augmentation du nombre de véhicules électriques aura pour conséquence une aggravation des pointes de consommation.
- **Le stockage de l'énergie à l'échelle de quelques jours** : les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) sont une solution de stockage mature, dont les possibilités de nouveaux déploiements sont désormais limitées sur le territoire français, et les coûts d'investissement sont très élevés.
- Le stockage de l'énergie sur la longue durée peut s'effectuer à ce jour sous forme de gaz ou de carburants liquides (méthane, hydrogène, etc.). Cependant, le faible rendement de conversion de ces technologies de stockage et le coût élevé des installations entravent leur déploiement. Les barrages hydroélectriques constituent une autre solution technique, mais le potentiel hydroélectrique du territoire français est déjà pleinement exploité.

2- Solutions de stabilisation de la fréquence

Dans un réseau traditionnel, les machines tournantes des centrales électriques possèdent une inertie importante qui contribue à stabiliser la fréquence du réseau. Par contraste, l'intégration de systèmes énergétiques ne comportant pas de machines tournantes, notamment des batteries et des panneaux photovoltaïques, tend à réduire l'inertie du réseau, ce qui le rend plus difficile à piloter. L'apport d'inertie artificielle par injection d'énergie cinétique "synthétique" et l'utilisation de réserves disponibles en moins d'une seconde (batterie) permettraient de limiter en temps réel les fluctuations de la fréquence du réseau.

B.1.2.2. POSITIONNEMENT DE L'EUROPE ET DE LA FRANCE

Compte tenu des discussions en cours à l'échelon européen, le marché de l'électricité pourrait être réparti entre un marché des énergies dominées par le CapEx (l'énergie nucléaire, les énergies renouvelables), et un marché des énergies dominées par l'OpEx (le gaz, le charbon). Dans ce nouveau marché de l'électricité, il importe d'établir un mécanisme de prix qui soit suffisamment variable pour rémunérer les moyens de flexibilité, mais aussi suffisamment prévisible pour inciter les investissements et protéger les consommateurs.

La Commission Européenne prévoit des investissements de grande ampleur dans la R&D et dans les infrastructures électriques. Ces investissements représentent un risque, dans la mesure où il faudra les financer, mais ils représentent aussi une opportunité de marchés pour les acteurs français.

La Belgique et le Royaume-Uni construisent de grandes unités de stockage électrique (entre 300 et 500 MW) utilisant des batteries stationnaires. En France, les batteries raccordées au réseau ENEDIS totalisent 300 MW, et sont réparties en petites unités qui permettent de soulager localement le réseau électrique.

L'électronique de puissance est omniprésente dans le système électrique. La France possède des positions fortes dans le domaine de l'électronique de puissance pour les très hautes tensions, mais des efforts de développement doivent être poursuivis dans le domaine des moyennes et des basses tensions.

B.1.2.3. DÉFIS ET FACTEURS CLÉS DE SUCCÈS

1- Défis et verrous liés à l'évolution du réseau électrique et des interconnexions

- **Stabilité et résilience du réseau électrique** : des investissements très significatifs seront nécessaires pour assurer la stabilité et la résilience du réseau électrique tout au long de l'intégration des énergies renouvelables et des moyens de flexibilité. En particulier, des méthodes formelles, du type diagnostic / pronostic / optimisation du fonctionnement, seront nécessaires pour assurer le pilotage et le contrôle de l'électronique de puissance.
- **Sécurité du réseau** : les conditions de coupure des réseaux intégrant des productions décentralisées sont un enjeu important pour la gestion des risques liés aux courants de défauts et aux surtensions passagères. Dans ce contexte,

de nouvelles techniques de gestion de la sécurité du réseau, telles que la digitalisation des protections, sont à développer.

- **Des équipements centralisés de gestion de la tension** seront nécessaires, et devront être homologués.
- **Dans le domaine de l'électronique de puissance**, des solutions font l'objet de travaux de R&D s'appliquant aux réseaux basse tension, mais les solutions font défaut à ce jour concernant le courant continu et la moyenne tension.
- **L'interconnexion des réseaux électriques à longue distance** se heurte à la difficulté de faire accepter socialement de nouvelles lignes aériennes à haute tension, tandis que les lignes enterrées coûtent très cher.
- **Les couplages entre différents vecteurs énergétiques** constituent une solution pertinente pour apporter de la flexibilité et de la stabilité au système énergétique global, mais l'évolution cohérente des différents réseaux nécessite des travaux de modélisation systémique pour déterminer les conditions de déploiement optimales (choix de la gamme de températures appropriée pour les réseaux de chaleur, proximité géographique entre offre et demande, etc.).
- **Le développement du stockage** comme moyen de flexibilité pour le système électrique sera tributaire de paramètres tels que les signaux de prix envoyés par le marché, les normes technologiques et environnementales, mais aussi des décisions publiques en matière de fiscalité et de mécanismes de soutien.
- **La recharge des véhicules électriques à batterie** risque d'aggraver les pointes de consommation quotidiennes d'énergie électrique. Il est crucial de mettre en place une gestion appropriée des conditions de recharge à l'échelle de la journée par le biais de signaux de prix spécifiques, ou d'offres de services. En outre, la perspective du développement à grande échelle des véhicules électriques impose de renforcer le réseau de transport d'électricité le long de grands axes autoroutiers pour faire face à des pointes de consommation.
- **Le modèle économique du véhicule-réseau (V2G)** n'est pas encore établi. En effet, l'utilisation des batteries des véhicules comme auxiliaire de stockage en renfort du réseau électrique pose le problème de la modalité de rémunération de l'électricité délivrée, qui doit permettre de rentabiliser l'acquisition des batteries et l'installation des bornes de recharge bidirectionnelles.
- **L'effacement de la demande des petits consommateurs** fait face à deux problèmes : un défi technico-économique, lié à la rétribution des services fournis au réseau par la flexibilité des usages, et un défi social, lié à l'appropriation et à l'acceptation de ces services par l'utilisateur final. Dans le contexte actuel, le bouclier tarifaire a pour avantage de protéger les consommateurs, mais présente l'inconvénient de ne pas encourager les effacements et la flexibilité.

2- Facteurs clés de succès

- **Le développement des techniques de stockage inter-saisonnier**, en particulier le Power-to-gas, sera nécessaire à terme en vue d'assurer l'équilibre offre / demande d'un réseau intégrant une forte proportion d'énergies intermittentes.
- **Des cartes régionales d'adaptation au changement climatique** incluant des projections en rapport avec les besoins du réseau électrique sont en cours d'établissement, sur la base des travaux du GIEC, et permettront d'éclairer les choix de long terme.
- **La simulation numérique de réseaux multi-vecteurs** - qui intègre à la fois les jumeaux numériques de tous les composants de ces réseaux et un ensemble de stratégies de pilotage en fonction de différents objectifs, tels que la décarbonation, la recherche de flexibilité ou l'efficacité de l'adaptation de l'offre à la demande - est un outil essentiel pour assurer un suivi du fonctionnement des systèmes et optimiser la mobilisation des sources de flexibilité locales.
- **L'autoconsommation collective** pourrait constituer un game changer légal, car elle favorise l'implication des citoyens dans les efforts de sobriété et de flexibilité. L'autoconsommation collective présente en outre l'avantage de minimiser les pertes d'acheminement de l'énergie en associant les producteurs et les consommateurs d'électricité à travers des circuits courts

B.1.3. RECOMMANDATIONS CONCERNANT LES RÉSEAUX ÉNERGÉTIQUES

- **Un programme national d'électronique de puissance** peut être proposé, à l'instar de celui qui a été mis en place pour l'automobile, permettant d'investir fortement dans la R&D pour continuer à développer de nouvelles solutions, et pour favoriser les synergies de recherche entre les laboratoires et les entreprises de réseaux en vue de développer les filières industrielles correspondantes. Des progrès sont notamment attendus dans le domaine des semi-conducteurs à large gap (CSi, GaN, et peut-être à terme le diamant).
- **Des solutions technologiques sont à développer dans le domaine de l'inertie synthétique**, ou d'autres substituts à l'inertie des machines tournantes, pour stabiliser la fréquence en prévision de l'intégration d'une forte proportion d'énergies asynchrones.
- **Les moyens de stockage multi-services (Power to X)** de grande capacité sont à développer à l'appui du réseau électrique. Cela passe par le développement de stratégies de pilotage synergique des différents réseaux (gaz, électricité et

chaleur), et par le développement de briques technologiques à hautes performances, tels que les électrolyseurs à haute température, ou les procédés de méthanation.

- **Les moyens de stockage de chaleur ou de froid**, qui permettent de réduire la puissance des systèmes de production d'énergie, requièrent le développement de stratégies fines de gestion de charge pour exploiter au mieux leur potentiel à différentes échelles de temps.
- **Il convient de développer les interconnexions à différentes échelles spatiales :**
 - des solutions de raccordement à grande distance, par exemple la technologie HVDC, et
 - des plateformes de flexibilité locale, qui permettent aux acteurs en présence de mutualiser les données pour gérer au mieux les opportunités d'échanges entre les moyens de production, les postes de consommation et les stockages localement disponibles. L'intelligence artificielle et des études comportementales peuvent y contribuer.
- **Le déploiement de pompes à chaleur hybrides** (comprenant un chauffage d'appoint au gaz) est un gage de flexibilité permettant d'alléger considérablement les contraintes sur le réseau électrique durant les périodes de grande demande, mais aussi un gage d'efficacité énergétique : l'efficacité d'une pompe à chaleur est excellente lorsque la différence entre la température du logement et la température extérieure est faible. Cette efficacité est bien plus faible durant les quelques jours de l'année où les températures sont très basses.
- **Un cadre réglementaire est nécessaire** pour accompagner différents modèles d'affaires permettant de rentabiliser les investissements initiaux dans les solutions de flexibilité, notamment le véhicule-réseau, avec la mise en place de nouvelles normes au fur et à mesure des retours d'expérience.
- **Des travaux de R&D doivent être poursuivis dans le domaine de l'autoconsommation collective**, en regroupant des grandes entreprises et des start-ups pour travailler sur des composants et des systèmes de production et de stockage multi-énergies.
- **Des recherches sont également à mener sur les conditions d'injection et de coupure**, afin d'optimiser les solutions techniques d'effacement de la demande. Les effacements de consommation bénéficient à la fois aux consommateurs (source d'économies), au système électrique (équilibre offre-demande : vente d'énergie effacée au marché de l'énergie et vente de disponibilité de puissance au marché de capacité), et à la collectivité (adaptation des consommations aux productions intermittentes dues à l'intégration d'EnR).

B2 TECHNOLOGIES NUMÉRIQUES

B.2.1. IMPACT SUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Les technologies numériques sont indispensables pour mener à bien la transition énergétique.

Ces technologies permettent notamment :

- de concevoir des produits et des procédés nécessitant moins d'énergie,
- de concevoir et de piloter des réseaux énergétiques de plus en plus complexes et décentralisés,
- de mettre en œuvre une maintenance prédictive, grâce aux jumeaux numériques qui rendent compte du vieillissement des dispositifs tout au long de leur durée de vie,
- de développer de nouveaux usages fondés sur la prise de décision automatique, comme par exemple la gestion énergétique des bâtiments,
- de mesurer, d'analyser et de prévoir l'évolution des milieux naturels et l'exploitation des ressources géophysiques,
- de simuler différents scénarios climatiques et énergétiques.

Ces nouvelles applications impliquent une croissance ininterrompue des moyens de transmission et de traitement de l'information. Ces moyens étant eux-mêmes consommateurs d'énergie, il conviendra de s'assurer que les coûts énergétiques n'excèdent pas les bénéfices attendus.

B.2.2. PRINCIPALES ÉVOLUTIONS TECHNOLOGIQUES

Plusieurs évolutions sont en cours qui ont des effets sur la transition énergétique :

- **L'accroissement de la bande passante** du réseau de transmission, avec l'extension de la 5G et la préparation de la 6G.
- **Le cloud computing** permet d'accéder à des ressources informatiques de grande envergure sans se préoccuper de l'endroit où elles se trouvent, ni de la manière dont elles sont gérées. Cependant, les interactions avec le cloud consomment de la bande passante et induisent des temps d'accès relativement longs (temps de latence). Par ailleurs, le cloud présente des risques de panne et de piratage.
- **L'edge computing** consiste, en complément au cloud, à traiter localement les données. L'intérêt de l'edge computing est de diminuer le volume des échanges, de réduire la latence et de réduire la consommation d'énergie. Cette technologie est souvent utilisée dans les applications qui nécessitent une réponse rapide, comme les véhicules autonomes, ou pour protéger la confidentialité des données. Toutefois, l'utilisation

de l'intelligence artificielle dans des architectures locales nécessite une mise en forme préalable des bases de données au moyen de superordinateurs.

- **L'internet des objets (IoT)** est un réseau constitué de dispositifs physiques, tels que des capteurs ou des actionneurs connectés à Internet, qui communiquent entre eux et avec des systèmes informatiques distants, notamment grâce à la 5G. Dans le contexte de la transition énergétique, l'IoT permet une conduite automatisée des opérations afin de réduire les consommations d'énergie.
- **L'intelligence artificielle (IA)** couvre un champ très vaste de résolutions de problèmes par ordinateur. Des progrès récents concernent tout particulièrement l'apprentissage automatique qui permet d'affiner les prévisions en les complétant par les acquis de l'expérience antérieure. Les applications dans le domaine de l'énergie sont multiples (prédictions météorologiques, prévisions des intermittences affectant la production des énergies renouvelables, anticipation du comportement des consommateurs, etc.).
- **Les données satellitaires et leur traitement** ont vocation à jouer un rôle majeur dans la planification des déploiements de systèmes énergétiques, et dans la prévention des risques. Plusieurs cas d'utilisation des données satellitaires peuvent être cités en exemple :
 - la modélisation de la circulation atmosphérique,
 - la connaissance des ressources en eau, en bois, en terres cultivables,
 - l'étude du mouvement de sols et de leur stabilité, notamment pour les sites nucléaires,
 - la détection de zones propices à l'implantation de fermes photovoltaïques, de fermes éoliennes, ou de fermes d'exploitation des énergies marines (hydrolienne, marée motrice, houlomotrice), et l'estimation de la production,
 - l'aménagement du territoire et des mobilités,
 - la sécurité des réseaux électriques, pétroliers et gaziers,
 - la sobriété énergétique de bâtiment en zone urbaine, en relation avec le confort thermique,
 - le suivi de pollutions,
 - les conditions océanographiques pour les installations offshore et côtières,
 - la mesure de stocks,
 - le routage maritime et aérien.

Cependant, à côté de ces évolutions positives, qui contribuent à augmenter les performances tout en contenant la consommation électrique des systèmes d'information, la miniaturisation des circuits intégrés, qui s'était poursuivie depuis 60 ans selon les prévisions de la loi de Moore, a atteint une limite. Cela se traduit par le plafonnement de la fréquence des microprocesseurs. Pour continuer à augmenter les puissances de calcul, diverses solutions technologiques sont à l'étude, comme la spintronique,

ou l'ordinateur quantique, dont l'usage pourrait toutefois rester limité à des opérations très particulières.

En pratique, il faut aujourd'hui s'orienter vers des traitements parallèles et des opérateurs spécialisés, conçus pour chaque type d'application. Cette fin de l'exclusivité du processeur universel est une révolution. Elle risque de bouleverser les chaînes de valeur en obligeant les concepteurs de produits à s'occuper aussi de la conception des processeurs, sous peine de voir des fabricants de processeurs s'emparer de la fabrication des produits.

B.2.3. POSITIONNEMENT FRANÇAIS ET EUROPÉEN

75 % des composants utilisés par les fabricants européens sont produits hors d'Europe. En particulier, les processeurs universels et les cartes graphiques sont développés aux États-Unis et fabriqués en Asie du Sud-Est. En dépit de cette dépendance, l'Europe possède un potentiel pour constituer la chaîne de valeur de la transformation numérique, grâce notamment à une capacité de fabrication de composants et de supercalculateurs, et à sa filière de télécommunications.

Des investissements sont en cours en Europe, stimulés par les pénuries d'approvisionnement en circuits intégrés et la rivalité entre les États-Unis et la Chine.

France 2030 prévoit un financement public supérieur à 5 mds €, pour accompagner l'ambition de l'UE de porter de 8 % à 20 % la part européenne au sein du marché mondial des composants. Le paquet législatif sur les semi-conducteurs, (chips act) prévoit plus de 43 milliards d'euros d'investissements d'ici 2030, en appui de la législation sur les semi-conducteurs d'ici 2030, auxquels viendront s'ajouter des investissements privés de long terme d'un montant globalement équivalent. ST-Microelectronics va construire en Isère une grande usine de fabrication de semi-conducteurs, en partenariat avec GlobalFoundries. En outre, Soitec est le leader mondial de la technologie FD-SOI, qui permet de réduire la consommation d'énergie et d'augmenter la fréquence d'un processeur. Par ailleurs, Intel va investir plus de 15 mds € en Allemagne.

Dans le domaine des logiciels, les entreprises françaises sont en grande partie dépendantes d'outils et de services américains.

B.2.4. DÉFIS ET FACTEURS CLÉS DE SUCCÈS

La capacité de fabrication des circuits intégrés et des capteurs est un enjeu majeur de souveraineté, comme l'ont montré les pénuries récentes.

Le pilotage intelligent des actionneurs : les systèmes de contrôle-commande adaptés, tels que les variateurs électroniques de vitesse, permettent des économies d'énergie, notamment dans les bâtiments et dans l'industrie.

Les jumeaux numériques permettent, en particulier, de réaliser le diagnostic de fonctionnement de dispositifs (batteries, panneaux solaires, électrolyseurs, piles à combustible), au service du pilotage efficace des systèmes énergétiques.

Les processeurs spécialisés : le développement de l'edge computing va de pair avec le développement de microcontrôleurs ou de processeurs spécialisés, domaine dans lequel la France a une carte à jouer (avec ST Microelectronics notamment).

La cyber sécurité : l'intégration croissante de dispositifs numériques au sein des systèmes énergétiques, soulève un défi majeur de cyber sécurité.

Les collaborations européennes de recherche sont essentielles pour atteindre la masse critique : notamment dans les domaines des composants logiciels et des systèmes d'exploitation, domaines dans lesquels l'Europe accuse un retard très important par rapport aux États-Unis.

Les consommations énergétiques du numérique : les technologies numériques représentent à ce jour un poste de consommation d'énergie significatif (8 % de la consommation électrique en France¹⁹), et en croissance. L'optimisation des consommations du numérique est un enjeu d'efficacité d'énergétique, auquel des technologies comme le FD-SOI peuvent apporter des solutions.

B.2.5. RECOMMANDATIONS CONCERNANT LES TECHNOLOGIES NUMÉRIQUES

- **L'approvisionnement en semi-conducteurs** est un enjeu crucial pour la souveraineté nationale et européenne. Les investissements importants et les partenariats internationaux, en cours et en projet, doivent être menés à bien, avec l'appui de la R&D.
- **L'Europe est la bonne échelle pour la recherche profonde en**

¹⁹ https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/cge/consommation-energie-numerique.pdf?v=1667230680

B2

informatique, en particulier dans le domaine des processeurs, des systèmes d'exploitation, des supercalculateurs et de l'ordinateur quantique. Les collaborations européennes ont vocation à être poursuivies et renforcées.

- **Il importe d'améliorer l'efficacité énergétique des systèmes informatiques**, notamment en limitant les échanges d'informations (edge computing) grâce à des méta-modèles.
- **La France peut s'appuyer sur ses atouts en matière de systèmes embarqués** (processeurs spécialisés, microcontrôleurs, capteurs etc.) pour prendre des positions fortes dans l'edge computing et l'Internet des objets, qui vont connaître un développement important dans les prochaines années.
- **L'intelligence artificielle est un axe de recherche clé** pour réaliser le diagnostic de fonctionnement de dispositifs tels que les batteries, les panneaux solaires, les électrolyseurs et les piles à combustible, afin de piloter de manière optimale les systèmes énergétiques.
- En prévision de l'intégration d'un grand nombre d'objets connectés au sein des infrastructures énergétiques, **les recherches doivent être intensifiées dans le domaine de la cyber sécurité**.
- **L'exploitation des technologies et des données satellitaires** dans le cadre du déploiement de systèmes énergétiques et de la prévention des risques doit être encouragée, notamment à travers des partenariats entre les instituts de recherche publics et les industriels.
- Si les technologies numériques peuvent apporter des gains d'efficacité énergétique, elles constituent aussi un poste de consommation. **Une analyse coûts / bénéfices menée dans le cadre d'une approche systémique est donc nécessaire**²⁰.

²⁰ Le lecteur peut notamment se référer à https://annales.org/re/2023/re_110_avril_2023.html

B3 HYDROGÈNE BAS CARBONE

L'hydrogène existe à la fois sous la forme d'une ressource naturelle, présente dans le sous-sol, et sous la forme d'un produit de synthèse. L'hydrogène naturel est une source d'énergie primaire, tandis que l'hydrogène de synthèse joue le rôle de vecteur énergétique dans la mesure où il est le résultat de la transformation d'une autre forme d'énergie (fossile, renouvelable, etc.).

B.3.1. NOTION D'HYDROGÈNE BAS-CARBONE

La France soutient au niveau européen la prise en compte d'une seule catégorie d'**hydrogène bas-carbone** dans les objectifs de décarbonation, que l'hydrogène soit produit à partir d'énergies renouvelables (hydrogène dit "vert") ou par électrolyse grâce à de l'électricité d'origine nucléaire (hydrogène dit "rose"). La France estime, à la différence d'autres États membres comme l'Allemagne, que c'est la seule façon d'assurer la crédibilité des objectifs de décarbonation et de leur impact sur la souveraineté et la compétitivité européenne. La France s'oppose également à tout accord avec un pays tiers faisant mention d'un futur marché de l'hydrogène ou d'importations massives d'hydrogène vers l'UE qui risqueraient de fragiliser l'émergence d'une filière de production d'hydrogène en UE et de priver le pays concerné de ses capacités de production d'électricité renouvelable.

Plus précisément, la France soutient l'introduction du concept d'"hydrogène bas-carbone" dans le cadre de la révision de la directive "énergies renouvelables pour 2030" dans les sous-objectifs d'hydrogène renouvelable des secteurs de l'industrie et des transports. À ce stade, le Conseil Européen a refusé cette introduction, mais la discussion porte aussi sur un nouveau projet de directive sur le gaz et sur un acte délégué établissant des règles pour les critères d'additionnalité de l'hydrogène renouvelable et de ses dérivés (ammoniac, e-fuel, méthanol), dits RFNBO (Renewable Fuels of Non Biological Origin). Le sujet est donc loin d'être clos.

B.3.2. UTILISATIONS DE L'HYDROGÈNE

B.3.2.1. PANORAMA DES UTILISATIONS ACTUELLES DE L'HYDROGÈNE

L'hydrogène est principalement utilisé comme matière première dans la production d'ammoniac (NH₃) et de fertilisants pour l'agriculture, dans le raffinage de produits pétroliers, et dans la production de méthanol (CH₃OH). Lorsqu'il est utilisé comme combustible, le dihydrogène (H₂) présente l'avantage qu'il ne produit pas de dioxyde de carbone (CO₂), mais seulement de l'eau.

B.3.2.2. ANTICIPATION DES USAGES FUTURS

Il peut être anticipé que la transition énergétique s'accompagnera d'une augmentation des besoins en hydrogène, notamment pour répondre à une demande accrue de produits dérivés bas carbone.

En théorie, l'hydrogène pourrait être employé dans tout type d'activités consommatrices d'énergie. Cependant, toute utilisation d'hydrogène bas carbone au-delà des usages industriels existants impliquerait de déployer des capacités de production d'énergie bas-carbone d'autant plus grandes, nécessitant ainsi des investissements considérables. Pour un certain nombre d'applications, une solution mieux adaptée que l'hydrogène existe. C'est notamment le cas de la mobilité légère, pour laquelle l'utilisation de biocarburants avancés ou l'électrification, accompagnée de l'usage de batteries, est non seulement plus efficace sur le plan énergétique, mais aussi plus rentable sur le plan économique, et peut être mise en œuvre dès à présent avec les technologies disponibles. L'usage de l'hydrogène ou de ses dérivés, tels que l'ammoniac, le méthanol ou les carburants de synthèse, aurait donc vocation à être réservé aux applications pour lesquelles l'électrification est problématique, comme par exemple le stockage intersaisonnier, ou le transport lourd routier longue distance et le transport maritime.

B.3.2.3. ÉTAT DE LA PRODUCTION MONDIALE

D'après l'AIE, plus de 90 % de l'hydrogène produit dans le monde provient aujourd'hui de ressources fossiles. Le gaz naturel représente environ les trois-quarts de ces ressources fossiles, tandis que le charbon constitue le quart restant. À l'échelle de la planète, le secteur de la production d'hydrogène émet plus de 800 millions de tonnes de CO₂ chaque année, ce qui est supérieur aux émissions totales de gaz à effet de serre d'un pays comme l'Allemagne. À ce jour, l'hydrogène n'est donc pas une ressource bas carbone.

Au vu de ces considérations, il est essentiel pour le succès de la transition énergétique de s'assurer que la croissance anticipée de la production d'hydrogène se fera par des moyens faiblement émetteurs de CO₂.

B.3.3. PROCÉDÉS DE PRODUCTION D'HYDROGÈNE

Différentes techniques existent pour produire de l'hydrogène.

B.3.3.1. LES TECHNOLOGIES ÉMETTRICES DE GAZ À EFFET DE SERRE

1- **L'hydrogène gris**, qui est produit à partir de gaz ou de pétrole, et l'**hydrogène noir**, qui est produit à partir de charbon, sont obtenus par reformage du méthane à la vapeur. Le reformage à la vapeur consiste à porter du méthane

à 800°C et à y ajouter de l'eau pour produire de l'hydrogène. Ce procédé de fabrication est le plus utilisé à ce jour. C'est aussi la solution la plus économique dans la mesure où 1 kilogramme de dihydrogène produit de cette manière coûte en moyenne 2 €. Ce procédé présente cependant l'inconvénient d'émettre beaucoup de CO₂ et d'être très énergivore, puisque chaque kilogramme de dihydrogène produit requiert 5,2 kWh et se traduit par l'émission de 10 kilogrammes de CO₂.

2- L'hydrogène bleu est obtenu en ajoutant des dispositifs de captage du CO₂ aux dispositifs classiques de production d'hydrogène gris. Par comparaison avec l'hydrogène gris, 60 à 90 % du CO₂ émis au cours du processus de production pourrait être capté et stocké dans des cavités géologiques naturelles ou converti en des molécules d'intérêt. D'après l'IFPEN, il est raisonnable d'envisager à terme un coût proche de 2 € pour un kilogramme d'hydrogène bleu. En attendant qu'il soit possible de produire de l'hydrogène à faible coût et par un moyen totalement neutre en carbone, l'hydrogène bleu pourrait constituer un compromis pertinent entre coût de production et émission de gaz à effet de serre.

B.3.3.2. LES TECHNOLOGIES BAS-CARBONE

3- L'hydrogène vert et l'hydrogène rose sont produits par électrolyse de l'eau, respectivement à partir d'électricité renouvelable et à partir d'électricité nucléaire. L'électrolyse est un procédé qui consomme beaucoup d'eau, mais surtout beaucoup d'énergie, et qui consiste à produire du dihydrogène en séparant électriquement l'oxygène et l'hydrogène contenu dans des molécules d'eau. Il existe une grande disparité dans les coûts de production de l'hydrogène vert, en fonction du coût des énergies renouvelables localement disponibles pour le produire. L'hydrogène vert produit en France coûte significativement plus cher que l'hydrogène gris, ou que l'hydrogène noir. Le coût de l'hydrogène vert décroît continûment au gré de la baisse du coût de l'électricité renouvelable et de l'augmentation de la capacité totale des électrolyseurs déployés. Concernant le couplage entre l'hydrogène et les énergies marines, l'IFPEN considère que la production d'hydrogène en mer constitue désormais une solution réaliste sur le plan technique. Des études sont en cours pour déterminer s'il est plus avantageux d'acheminer jusqu'à la terre ferme des molécules ou des électrons depuis les sites de production en mer.

4- L'hydrogène turquoise est une nuance intermédiaire entre l'hydrogène vert et l'hydrogène bleu. Il est obtenu par pyrolyse du méthane, un procédé qui produit du noir de carbone (carbone à l'état solide) sans rejeter de CO₂ dans l'atmosphère. Le noir de carbone est un produit valorisable pour la vulcanisation du caoutchouc ou pour la production d'électrodes en graphite. Il représente également un mode de stockage de carbone plus dense et plus sûr que le CO₂ gazeux. Lors de sa production,

l'hydrogène turquoise nécessite en outre moins d'énergie que l'hydrogène gris, mais le procédé n'est pas aussi mature.

5- L'hydrogène naturel sort principalement des fumeurs, qui se trouvent au milieu des océans atlantique et pacifique. Il peut également sortir en surface sur terre. La formation d'hydrogène naturel résulte d'un processus géochimique au niveau de la croûte terrestre. Le fer contenu dans les roches de la croûte s'oxyde au contact de l'eau en laissant échapper de l'hydrogène. Un autre processus de formation de l'hydrogène naturel provient de la radioactivité naturelle qui rompt les molécules d'eau avoisinantes en libérant de l'hydrogène. Extraire de l'hydrogène naturel en mer coûterait cher, en particulier du fait du coût des forages. Pour minimiser les risques financiers, les premiers travaux d'exploration ont donc été initiés à terre. À terme, l'hydrogène naturel produit à terre selon les mêmes procédés que le gaz naturel pourrait coûter moins cher que l'hydrogène gris ou que l'hydrogène noir, dans la mesure où la production s'effectue sans qu'il soit nécessaire d'apporter de l'énergie pour chauffer le gaz.

B.3.4. L'HYDROGÈNE NATUREL, UN GAME CHANGER POTENTIEL

B.3.4.1. IMPACT DANS LA PERSPECTIVE DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Parmi tous les modes de production qui ont été évoqués, l'hydrogène naturel pourrait être le moins cher. Par ailleurs, la production d'hydrogène naturel n'est pas polluante. C'est pourquoi, des grands industriels et des start-ups s'intéressent désormais à ce sujet.

Par extrapolation des mesures effectuées sur les premiers gisements observés, on estime que le potentiel de production d'hydrogène naturel dans le monde pourrait répondre à la consommation actuelle d'hydrogène.

Par ailleurs, une part importante des gisements d'hydrogène naturel présente une teneur non négligeable en hélium, qui est un gaz stratégique hautement valorisable. À ce jour, la plupart de l'hélium produit dans le monde provient de champs gaziers où le méthane naturel est liquéfié en vue de son transport par bateaux. L'hélium ayant la température de liquéfaction la plus basse de tous les gaz, il constitue le reliquat gazeux à l'issue du processus de liquéfaction du méthane. L'hélium ainsi produit est valorisé notamment par l'Algérie ou le Qatar, tandis que l'Europe importe 100 % de son hélium. Aux États-Unis et en Australie, des entreprises réalisent des forages en vue d'exploiter simultanément l'hélium et l'hydrogène naturel.

B.3.4.2. POSITIONNEMENT DE LA FRANCE DANS LA CONCURRENCE MONDIALE

La quantité d'hydrogène naturel disponible en France n'est pas connue précisément à ce jour, mais des ressources en hydrogène naturel existent, en particulier dans les Pyrénées et en Nouvelle-Calédonie. L'hydrogène est considéré par la France comme une ressource naturelle depuis le mois de février 2022, ce qui offre des possibilités d'exploration sur le territoire national.

Aux États-Unis, différentes compagnies ont déjà foré des puits d'hydrogène, et de nouvelles opportunités sont en cours d'étude. Le potentiel du pays fait actuellement l'objet d'une évaluation. Au Canada, une évaluation est en cours pour certifier les réserves du Québec. L'Australie est actuellement le pays le plus actif dans le domaine. Dès les premières publications ayant révélé le potentiel local, l'Australie a adapté sa loi minière. Depuis 2021, des "permis hydrogène" peuvent être demandés, notamment en Australie du Sud. De nombreuses compagnies se sont intéressées au sujet, et le domaine minier hydrogène s'est considérablement étendu au cours des derniers mois.

B.3.4.3. DÉFIS ET FACTEURS CLÉS DE SUCCÈS

Des travaux de prospection mériteraient d'être menés afin de déterminer quelles quantités d'hydrogène se trouvent dans les réservoirs naturels en France et dans le monde, mais surtout de déterminer à quel rythme ces réservoirs se remplissent, et quelle pourrait être la production quotidienne.

Les contraintes technologiques liées à l'exploitation des puits d'hydrogène naturel sont de même nature que celles qui concernent le stockage et la production d'hydrogène en général : les aciers et les types de joints utilisés pour les conduites doivent faire l'objet d'une attention particulière. Les efforts de recherche et de développement consacrés au stockage et les efforts consacrés à l'hydrogène en sous-sol seront mutuellement bénéfiques.

Des programmes de recherche sont nécessaires pour mieux comprendre les mécanismes et modéliser les briques entrant en jeu dans le système productif. Il est nécessaire d'engager des projets pilotes pour démontrer le potentiel.

B.3.5. GAME CHANGER : L'HYDROGÈNE BAS-CARBONE PRODUIT PAR ÉLECTROLYSE

B.3.5.1. IMPACT DANS LA PERSPECTIVE DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Les besoins de l'industrie en d'hydrogène sont indéniables, et la production d'hydrogène bas-carbone et bon marché est un préalable essentiel au développement de carburants de synthèse qui seront nécessaires à la transition énergétique. Au vu de ces considérations, il apparaît qu'en dépit de son coût élevé, l'hydrogène vert est amené à jouer un rôle significatif dans le développement de la production d'hydrogène bas carbone dans le monde à l'horizon 2050, et mérite à ce titre d'être considéré comme un game changer probable.

B.3.5.2. POSITIONNEMENT DE L'EUROPE DANS LA CONCURRENCE MONDIALE

L'industrie et la recherche européennes disposent d'une position technologique favorable dans le domaine de l'hydrogène vert, et des investissements importants sont engagés.

Cependant, le coût de l'hydrogène vert est étroitement corrélé au coût local des énergies renouvelables. D'après Hy24, il peut ainsi être anticipé que la production d'hydrogène vert se développera en priorité dans les régions où les énergies renouvelables sont les moins chères, et dans les régions où la compétition pour l'usage des sols disponibles est la plus faible. En vertu de leur très bon ensoleillement et de la faible pression foncière, l'Australie, l'Afrique, l'Amérique du Sud et le Moyen Orient sont particulièrement propices à l'exploitation de l'énergie solaire, tandis que le Canada présente un potentiel hydroélectrique important. À terme, il est probable qu'un kilogramme d'hydrogène vert, ou une quantité équivalente de ses dérivés, produit dans ces régions du monde coûtera moins cher qu'une même quantité produite en France.

Dans ce contexte, la France, et plus généralement, l'Europe de l'Ouest et l'Europe Centrale font face à un choix stratégique difficile, à savoir :

- 1) importer de l'hydrogène vert venu de régions où l'énergie est bon marché, au détriment de la balance commerciale, ou bien
- 2) produire de l'hydrogène vert à partir de ressources locales, à un coût relativement élevé, dans une optique d'autonomie stratégique, mais au risque de ne pas être compétitif.

B.3.5.3. DÉFIS ET FACTEURS CLÉS DE SUCCÈS

À court terme, un des principaux obstacles au développement de l'hydrogène vert est son coût de production élevé. Ce coût pourrait être amené à diminuer significativement sous l'effet de la baisse du coût des énergies renouvelables, mais aussi de la baisse du coût de fabrication des électrolyseurs, par effet de série.

Les défis à relever en rapport avec l'hydrogène bas carbone concernent **l'approvisionnement en métaux critiques** qui sont indispensables aux électrodes et aux membranes des électrolyseurs, mais concernent également l'accès à l'eau douce qui est requise pour alimenter les électrolyseurs.

S'agissant d'utiliser l'hydrogène comme vecteur ou comme moyen de stockage des énergies renouvelables intermittentes, le rendement des électrolyseurs est très inférieur au rendement du stockage par batteries. Une perspective pour améliorer significativement ce rendement est **l'électrolyse à haute température**, la barrière énergétique pour décomposer l'eau étant plus faible à haute température. Ce procédé doit cependant faire l'objet de travaux de recherche complémentaires visant à valoriser différentes sources de chaleur et à développer les matériaux supportant les hautes pressions, les hautes températures et les milieux très corrosifs.

Une autre perspective pour améliorer le rendement de l'électrolyse consiste à utiliser des membranes échangeuses d'anions (AEM), qui présentent une conductivité ionique plus élevée que les membranes échangeuses de protons actuellement en usage, sans nécessiter le recours à des terres rares coûteuses.

Par ailleurs, et dans un souci d'anticipation des risques, **l'impact de l'intégration d'un nombre croissant d'électrolyseurs dans le réseau électrique national** devra être finement étudié.

D'une manière plus générale, les CapEx élevés de l'hydrogène vert, la disponibilité en énergies renouvelables, la disponibilité en eau douce et la disponibilité des métaux nobles nécessaires à la fabrication des électrodes, constituent des freins à un déploiement rapide.

Dans le cas où le choix se porterait sur l'option d'importer l'hydrogène, **la capacité d'accueil des transports d'hydrogène dans les ports français**, constitue pour la France, par comparaison notamment avec le port de Rotterdam, un handicap complémentaire.

B.3.6. RECOMMANDATIONS

B.3.6.1. CONCERNANT LA FILIÈRE HYDROGÈNE EN GÉNÉRAL

1- Nécessité d'un développement cohérent de la production et des usages

L'AIE estime qu'il serait problématique d'inciter l'industrie à utiliser de l'hydrogène qui ne serait pas produit par des moyens décarbonés. En conséquence, l'AIE recommande de développer de manière cohérente les technologies qui participent de l'hydrogène vert, en évitant de bâtir des stratégies d'innovation en silos, et en liant entre elles les priorités technologiques, en considérant les chaînes de valeur dans leur ensemble, et les secteurs, de manière corrélée.

L'exposition croissante aux risques de raréfaction des ressources en eau impose de mener des travaux de R&D visant à développer des technologies d'électrolyse utilisant de l'eau impropre à la consommation.

2- Le transport et le stockage, des sujets de R&D importants

Les besoins de l'industrie en d'hydrogène sont indéniables, et la production d'hydrogène bas carbone et bon marché est un préalable essentiel au développement de carburants de synthèse qui seront nécessaires à la transition. Le stockage de cet hydrogène à différentes échelles et son transport se heurtent cependant à des limitations techniques (matériaux, fragilisation, tenue en pression ...). Le transport d'hydrogène hébergé dans la structure de molécules liquides organiques (LOHC ou Liquid Organic Hydrogen Carriers, tels que les hydrocarbures, les diols, etc.) est aussi une solution pour son transport. Cette voie, connue de longue date, regagne de l'intérêt. Elle bénéficierait d'une logistique de transport existante mais nécessiterait la mise en place d'usines d'hydrogénation et de déshydrogénation des molécules transportées. Pour les usages de mobilité, si l'usage de batteries est généralement préférable pour les véhicules légers, le transport lourd nécessite des développements spécifiques pour des réservoirs adaptés et à haute pression.

Les industriels français ont un savoir-faire appréciable en matière de stockage souterrain en cavités salines, en matière de réservoirs, de joints et de conduites, mais les efforts de recherche doivent être amplifiés. Ces recherches transversales ont un impact sur toute la chaîne de valeur de l'hydrogène, quels que soient l'utilisation et le mode de production choisis. Du succès de ces recherches dépendra la possibilité d'utiliser industriellement l'hydrogène ou ses dérivés.

3- Développement des infrastructures adaptées

Des investissements dans les infrastructures de transport et de stockage de l'hydrogène et de ses dérivés (terminaux portuaires, gazoducs, réservoirs) seront nécessaires pour accompagner le développement de la filière.

B.3.6.2. CONCERNANT LE "GAME CHANGER" HYDROGÈNE NATUREL

- Des progrès doivent être accomplis dans la compréhension et la modélisation de la genèse de l'hydrogène naturel.
- Les réserves souterraines en Europe et leur rythme de remplissage naturel doivent être évalués.
- La quantité quotidienne pouvant être produite de manière durable doit être évaluée.
- Le déploiement de pilotes doit être favorisé pour démontrer le potentiel économique.
- Des partenariats industriels doivent être bâtis, ou des concessions doivent être achetées dans des pays comme l'Australie qui disposent de gisements importants.

B.3.6.3. CONCERNANT L'HYDROGÈNE BAS-CARBONE PRODUIT PAR ÉLECTROLYSE

- La production d'électricité bas-carbone doit être suffisante pour assurer l'alimentation des futurs électrolyseurs. Par ailleurs, il faut anticiper l'impact de l'intégration d'un nombre croissant d'électrolyseurs et de sources d'énergies renouvelables sur le réseau électrique national.
- Des efforts de R&D doivent être poursuivis en vue de faire baisser le coût des électrolyseurs et de l'hydrogène qu'ils produisent.
- L'approvisionnement en métaux critiques pour la fabrication des électrolyseurs doit être sécurisé. Des recherches doivent être poursuivies pour développer des membranes et/ou électrodes permettant de s'affranchir de ces métaux critiques, telles les membranes échangeuses d'anions (AEM).
- Des efforts de R&D doivent être poursuivis pour accroître le rendement des électrolyseurs et des piles à combustible, notamment par le développement de l'électrolyse à haute température.
- Des partenariats industriels durables doivent être bâtis avec des régions où les énergies renouvelables sont très peu chères de manière à sécuriser un approvisionnement de long terme en hydrogène ou en produits dérivés bas carbone.

B4 GAZ ET CARBURANTS BAS CARBONE (HORS HYDROGÈNE)

B.4.1. LES FAMILLES DE GAZ ET CARBURANTS BAS-CARBONE

Les carburants bas-carbone se répartissent en trois familles principales :

1- Biocarburants et biogaz

- **Biocarburants liquides de 1ère génération** : les biocarburants liquides actuellement sur le marché sont produits à partir de cultures sucrières ou d'huiles végétales, et sont utilisés en mélange dans l'essence (bioéthanol) et le gazole (biogazole). Du fait des surfaces agricoles qu'elles mobilisent, ces cultures entrent en concurrence avec les cultures destinées à la production alimentaire.
- **Biocarburants liquides de 2e génération, dits "avancés"** : ces biocarburants peuvent être produits à partir de biomasse lignocellulosique provenant de résidus agricoles et forestiers (donc sans concurrence d'usage avec la production alimentaire), ou de cultures dédiées. Les procédés de production de ces biocarburants sont démontrés à l'échelle préindustrielle.
- **Biogaz** : des gaz renouvelables peuvent être produits à partir de matières organiques non vivrières, par méthanisation (production de méthane par digestion anaérobie), par gazéification (production de syngas par combustion incomplète contrôlée) ou par pyrolyse (production de biogaz et de charbon par chauffage anaérobie à haute température), et sont destinés à alimenter des moteurs à gaz, des chaudières ou à être directement injectés dans le réseau de gaz naturel. De nouveaux procédés sont à l'étude, comme la gazéification hydrothermale qui vise à valoriser la biomasse très humide.

2- Gaz et carburants de synthèse provenant de déchets non-biologiques

- Des gaz et carburants de synthèse (en particulier du méthane) peuvent être obtenus, par pyrolyse ou gazéification, à partir de déchets ménagers ou industriels, tels que les déchets de plastique ou les combustibles solides de récupération.

3- E-fuels et e-méthane

- **Les électro-carburants (e-fuels)** sont produits au moyen de procédés électro-thermo-chimiques à partir d'hydrogène bas carbone et de CO₂ recueilli dans les fumées industrielles (cimenteries, aciéries, industries chimiques), ou directement dans l'air ambiant.
- **Le e-méthane (CH₄)** est produit par le procédé de méthanation à partir de monoxyde de carbone (CO) ou de dioxyde de carbone (CO₂) et de dihydrogène bas-carbone (H₂), en présence d'un catalyseur.
- **L'ammoniac (NH₃)** peut être produit au moyen du procédé Haber-Bosch, à partir d'hydrogène bas-carbone et de diazote (N₂) contenu dans l'air ambiant. La molécule d'ammoniac est dense en hydrogène et présente l'avantage de ne nécessiter que peu d'énergie pour sa liquéfaction (l'ammoniac se liquéfie à -33°C, à pression atmosphérique).

4- Autres sujets de recherche

Par ailleurs, des travaux de recherche à plus long terme sont en cours dans le domaine de la photo-électrocatalyse (équivalent artificiel de la photosynthèse) et dans l'ingénierie microbiologique pour produire des molécules énergétiques, notamment des carburants de troisième génération produits à partir de micro algues.

B.4.2. LES GAZ ET LES CARBURANTS BAS-CARBONE, UN GAME CHANGER POUR LES TRANSPORTS DE LONGUE DISTANCE

Les batteries actuelles ont un très bon rendement énergétique, mais leur autonomie pourrait être insuffisante pour permettre l'électrification des transports de longue distance, terrestres, aériens, fluviaux ou maritimes. Les gaz et carburants bas-carbone offrent une alternative technique à l'utilisation des gaz et carburants fossiles avec un gain en termes d'émissions de CO₂.

B.4.2.1. IMPACT DES GAZ ET CARBURANTS BAS-CARBONE

Il est possible de produire une grande variété de biocarburants à partir de différentes biomasses qui n'entrent pas en concurrence avec les ressources alimentaires. Plusieurs technologies co-développées par IFPEN sont aujourd'hui au stade commercial pour produire du bioéthanol, du biokérosène et du biogazole. Ces carburants sont proches des vecteurs énergétiques actuels, ce qui présente l'avantage que les technologies nécessaires à leur transport et à leur stockage sont bien maîtrisées. Ils peuvent être injectés directement dans les moteurs et dans les réseaux de distribution. Ces carburants offrent, à ce titre, une solution de transition intéressante pour de nombreux secteurs. Ils sont aussi particulièrement bien adaptés aux transports longue distance (routier, fluvial ou maritime et, surtout, aérien) où de fortes densités énergétiques sont requises. Plus généralement, la production industrielle de carburants bas-carbone pourrait représenter l'opportunité de décarboner, à très court terme, une partie du transport en France et d'améliorer sa souveraineté énergétique. Cependant, il est crucial de noter que les biocarburants sont essentiels au secteur aérien, et qu'ils devraient lui être réservés en priorité. La question se pose de savoir s'il en restera suffisamment pour la route ou d'autres modes de transport.

B.4.2.2. POSITIONNEMENT DE LA FRANCE DANS LA CONCURRENCE MONDIALE

La France détient des positions fortes dans la recherche et l'industrie des carburants bas-carbone, notamment à travers des détentions de brevets (IFPEN et CEA).

1- La France dans la course aux électro-carburants

De grandes entreprises telles que TotalEnergies, Air Liquide, et Engie sont impliquées dans des projets de production d'électro-carburants à partir d'électricité renouvelable et de CO2 capté. Ces projets sont encore à un stade expérimental et n'ont pas encore atteint l'échelle commerciale.

2- La France dans la course aux biocarburants

La France a mis en place une réglementation ambitieuse visant à incorporer un pourcentage minimum de biocarburants dans les carburants fossiles. Les biocarburants représentaient 1,3% de l'énergie primaire consommée en France en 2021, la production française de biocarburants étant faible par rapport aux principaux producteurs mondiaux que sont les États-Unis et le Brésil.

Des technologies françaises de production de biocarburants avancés sont aujourd'hui au stade de la commercialisation, Futuro® et BioTfuel®. Les premières unités industrielles sur le sol français ont été annoncées (ex : projet de production de biokérosène BioTJet porté par Elyse Energy).

B.4.2.3. DÉFIS ET FACTEURS CLÉS DE SUCCÈS

1- Défis de R&D et verrous technologiques

- **Le rendement énergétique** : il convient de distinguer l'usage des carburants pour la production de chaleur et l'utilisation pour le transport : dans le cas du transport, l'efficacité énergétique des carburants bas-carbone est faible, en raison notamment du rendement des moteurs thermiques (environ 30 %).
- **Le coût de production élevé** des électro-carburants et des biocarburants peut rendre difficile leur développement et leur adoption par le consommateur.
- **Des technologies de rupture** sont à l'étude en laboratoire (CEA et IFPEN) pour produire des molécules énergétiques à partir de CO2 et d'énergies renouvelables, telles que :
 - la conversion biologique du CO2 par des micro-organismes (micro-algues ou cyanobactéries),
 - la photo-électrocatalyse, procédé consistant à convertir du CO2 en molécules utiles à partir du rayonnement solaire et d'énergie électrique en présence de catalyseurs bio-inspirés.

2- Défis d'industrialisation

● La disponibilité des ressources

- Le développement à grande échelle des biocarburants doit intégrer les enjeux liés à la mobilisation des ressources en biomasses nécessaires à leur production.

- Dans le cas des électro-carburants, les défis renvoient à la disponibilité de l'eau et de l'énergie électrique requises pour la production d'hydrogène par électrolyse, d'une part, et aux capacités de production et d'approvisionnement en CO2, d'autre part.

● **L'harmonisation des normes internationales** en matière de vecteurs énergétiques au gré des évolutions technologiques est un enjeu pour assurer la compatibilité des installations.

3- Facteurs clés de succès

● **Les infrastructures de distribution et de stockage actuelles** sont compatibles avec le déploiement de gaz et de carburants alternatifs (contrairement à l'hydrogène qui pose des problèmes de déploiement).

B.4.3. RECOMMANDATIONS CONCERNANT LES GAZ ET CARBURANTS ALTERNATIFS

1- Recommandations propres aux gaz et carburants bas-carbone

- **Des investissements dans la recherche et le développement seront indispensables** pour améliorer l'efficacité des procédés de fabrication des carburants alternatifs, et faire baisser leur coût de production. En particulier, des programmes de R&D intensifs seront nécessaires pour industrialiser la production de biocarburants, notamment de 2ème et 3ème génération (sans concurrence d'usage avec les cultures pour l'alimentation), et pour accompagner le développement de technologies émergentes, telle la gazéification hydrothermale, qui vise à valoriser des matières qui ne peuvent pas être traitées par les procédés existants.
- **Des études systémiques** seront nécessaires pour déterminer les procédés et les sites les plus prometteurs pour produire ces carburants en considérant les ressources localement disponibles (CO2, eau, biomasse), mais aussi la disponibilité d'énergies décarbonées régionales, de manière à lancer des démonstrateurs et des premières industrielles en France et en Europe.
- **L'harmonisation des futures normes européennes et/ou internationales** en matière de vecteurs énergétiques est nécessaire pour s'assurer en particulier de la compatibilité des réseaux et des chaînes d'approvisionnement.

2- Recommandations concernant le développement parallèle de l'hydrogène bas carbone et des gaz et carburants alternatifs pour les transports

Indépendamment du développement de l'électricité et des batteries pour les poids lourds, trois types de vecteurs énergétiques, impliquant trois niveaux d'investissements distincts, ont vocation à répondre aux besoins du secteur des transports :

- **Niveau le plus accessible** : les carburants liquides de synthèse, issus de la biomasse ou d'électro-carburants sont immédiatement compatibles avec les moteurs et les infrastructures existantes. Les biocarburants sont démontrés à l'échelle préindustrielle. Le développement de projets de biocarburants liquides doit intégrer les enjeux de disponibilité des ressources. Ces carburants peuvent aussi bénéficier d'un apport d'hydrogène permettant d'augmenter les rendements et d'utiliser du carbone biogénique.
- **Niveau intermédiaire** : la méthanisation est une technologie mature pour produire du biogaz qui peut être utilisé pour le transport, le stockage et la motorisation, mais le déploiement du biogaz nécessite l'adaptation ou le remplacement des moteurs thermiques et des réservoirs. Le biogaz fait également face à un problème de disponibilité des ressources.
- **Niveau le plus éloigné** : des gaz synthétiques peuvent être obtenus notamment par le procédé de méthanation, à partir d'hydrogène bas carbone. Ces procédés ne sont pas encore matures et ont un rendement énergétique limité. Les piles à combustible, qui fonctionnent directement à l'hydrogène, peuvent atteindre un rendement supérieur, mais l'utilisation de l'hydrogène nécessite la création d'une infrastructure de haute technologie pour le transport et le stockage.

Une veille technologique active sera utile pour identifier le plus tôt les vecteurs énergétiques dominants pour le transport lourd, le transport maritime et l'aviation.

TECHNOLOGO

C. TECHNOLOGIES DE LA DEMANDE EN ÉNERGIE

C.1. VÉHICULES LÉGERS

- C.1.1. Vision prospective de l'industrie de la mobilité légère
- C.1.2. Le véhicule électrique, un game changer pour la mobilité légère
 - C.1.2.1. Impact de l'électrification des véhicules légers
 - C.1.2.2. Positionnement de l'Europe dans la concurrence mondiale
 - C.1.2.3. Défis et facteurs clés de succès
- C.1.3. Recommandations concernant les véhicules légers

C.2. VÉHICULES LOURDS ET AVIATION

- C.2.1. Vision prospective du transport lourd et de l'aviation
 - C.2.1.1. Spécificité du transport aérien
 - C.2.1.2. Spécificité du transport maritime
 - C.2.1.3. Spécificité du transport ferroviaire
- C.2.2. Le stockage des carburants alternatifs, un game changer pour les véhicules lourds et l'aviation
 - C.2.2.1. Impact des modes de stockage des carburants
 - C.2.2.2. Positionnement de la France dans la concurrence mondiale
 - C.2.2.3. Défis et facteurs clés de succès
- C.2.3. Recommandations concernant le transport lourd et l'aviation
 - C.2.3.1. Concernant le rééquilibrage entre les modes de transport
 - C.2.3.2. Concernant les technologies de stockage d'énergie pour le transport
 - C.2.3.3. Cas particulier du transport maritime

C.3. INDUSTRIE

- C.3.1. Émissions de GES de l'industrie en France
- C.3.2. Technologies permettant de réduire les émissions de l'industrie
 - C.3.2.1. Impact de la décarbonation de l'industrie
 - C.3.2.2. Situation de la France
 - C.3.2.3. Défis et facteurs clés de succès
- C.3.3. Recommandations concernant l'industrie

C.4. BÂTIMENT

- C.4.1. Panorama des évolutions en cours dans le bâtiment
- C.4.2. Les game changers dans le bâtiment
 - C.4.2.1. Impact des changements dans le bâtiment sur la transition énergétique
 - C.4.2.2. Positionnement de la France
 - C.4.2.3. Défis et facteurs clé de succès
- C.4.3. Recommandations concernant le bâtiment

C1 VÉHICULES LÉGERS

C.1.1. VISION PROSPECTIVE DE L'INDUSTRIE DE LA MOBILITÉ LÉGÈRE

Trois transformations majeures sont actuellement en cours :

1- L'électrification : la législation Européenne devrait imposer qu'en 2035 les nouveaux véhicules légers mis sur le marché soient tous électriques. La batterie devrait être le type de stockage le plus répandu pour les véhicules des particuliers et les véhicules utilitaires légers. En effet, l'hydrogène semble mieux adapté à des usages très intensifs et au transport lourd, les piles à combustible ne semblent pas avoir actuellement une durée de vie suffisante, et les électro-carburants sont très chers.

2- Le déplacement de la valeur du matériel vers le logiciel se traduit par l'intégration de fonctionnalités toujours plus nombreuses et par une connectivité toujours plus importante.

3- Le passage de la vente de produits à la fourniture de services, à travers la mise en place de formules de leasing, mais aussi à travers le développement des modes de mobilité partagée.

Les acteurs traditionnels du secteur automobile doivent s'adapter à ces mutations s'ils veulent rester compétitifs sur un marché en évolution rapide et faire face à la concurrence de nouveaux acteurs asiatiques et américains qui ont pris une longueur d'avance dans ces domaines.

C.1.2. LE VÉHICULE ÉLECTRIQUE, UN GAME CHANGER POUR LA MOBILITÉ LÉGÈRE

C.1.2.1. IMPACT DE L'ÉLECTRIFICATION DES VÉHICULES LÉGERS

Le véhicule électrique à batterie fait figure de game changer pour la transition énergétique, dans la mesure où il permet d'exploiter une énergie décarbonée, tout en divisant par trois l'énergie consommée par kilomètre parcouru. En effet, les véhicules à motorisation électrique tirent avantage du très bon rendement de leur chaîne propulsive et peuvent récupérer de l'énergie lors du freinage.

En revanche, les véhicules électriques à batterie nécessitent

deux fois plus d'énergie pour leur fabrication que les véhicules thermiques, en raison des matériaux utilisés notamment dans les batteries. À court terme, la transition vers le véhicule électrique à batterie se traduira donc par une augmentation de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂ si ces véhicules sont produits dans des pays qui utilisent le charbon comme source d'énergie primaire. Dans le contexte d'un risque de pénurie d'énergie pour les années à venir, la décision européenne d'une transition accélérée vers le véhicule électrique est source d'inquiétudes. Une analyse du cycle de vie (ACV), incluant la construction des véhicules, leur usage et leur recyclage, est nécessaire pour s'assurer de l'impact positif sur le climat.

C.1.2.2. POSITIONNEMENT DE L'EUROPE DANS LA CONCURRENCE MONDIALE

La composition d'un véhicule électrique à batterie diffère considérablement de celle d'un véhicule thermique. Trois éléments représentent à eux seuls 45 % de la valeur du véhicule :

- **Le moteur électrique et les organes de transmission** : la France possède des atouts dans ce domaine.
- **L'électronique de puissance** : la France a des acteurs bien placés (notamment ST-Microelectronics).
- **Les batteries** (le plus gros poste) : l'Asie a une position dominante sur la chaîne de valeur des batteries au lithium, à travers la possession de mines et d'activités de raffinage. Ce marché étant en pleine croissance, l'effet de série aurait vocation à faire baisser les prix, mais il est à craindre que la raréfaction des matériaux critiques provoque l'effet inverse. Il importe donc de créer des chaînes de valeur complètes en Europe pour limiter la dépendance aux acteurs étrangers.

La France a des acteurs scientifiques et industriels bien placés. Des travaux de recherche sur les batteries solides (4^{ème} génération) et les batteries post Li-ion (5^{ème} génération) sont en cours au sein du RS2E (Réseau sur le Stockage Electrochimique de l'Énergie), et notamment au CEA et à l'IFPEN.

C.1.2.3. DÉFIS ET FACTEURS CLÉS DE SUCCÈS

1- Investissements et chaînes d'approvisionnements

- **Les besoins d'investissement en R&D et dans l'outil productif sont immenses** : de nouvelles chaînes de valeur se forment et les acteurs européens doivent se positionner dès à présent. Il importe que les laboratoires européens se mettent au service des gigafactories en construction ou en projet.
- **La dépendance aux matériaux stratégiques** (nickel, cobalt, lithium) : Le développement de batteries de nouvelle génération est essentiel à la souveraineté et à la pérennité

de l'approvisionnement européen. Les nouvelles batteries devront être conçues dès l'origine pour être recyclables dans une approche globale du cycle de vie.

- **Les infrastructures de recharge électriques** en Europe sont très insuffisantes à ce jour, et particulièrement les bornes de recharge rapide le long des grands axes routiers.
- **L'intégration de chargeurs électriques bidirectionnels de haute puissance (>10 kW)** dans les véhicules individuels est un préalable nécessaire à la mise œuvre du véhicule-réseau²¹. Les chargeurs bidirectionnels sont cependant plus onéreux que les chargeurs ordinaires, et les modalités de financement de ce surcoût restent à définir, sachant que le véhicule-réseau serait un service rendu au réseau par le propriétaire du véhicule.

2- Défis économiques et sociaux

- **L'envolée du prix des véhicules** : du fait de l'électrification, le coût des composants d'un véhicule moyen passe de 15 000 € à 24 000 €, ce qui rend l'achat d'un véhicule neuf inaccessible à une large partie de la population. Le développement de formules de leasing pourrait être une solution alternative à l'achat.
- **Le bilan carbone sur l'ensemble de la chaîne** : afin de s'assurer d'une décarbonation réelle du secteur des transports et non d'un déplacement des émissions, il est important de tenir compte de l'analyse du cycle de vie complet du véhicule et non seulement les émissions de CO₂ à l'usage comme c'est le cas dans la réglementation européenne.
- **Protection aux frontières de l'Europe** : l'Europe a une pratique de libre-échange avec le reste du monde, alors que les autres régions protègent leur industrie. Le mécanisme d'ajustement carbone aux frontières (MACF) est un dispositif visant à faire payer ceux qui ne respectent pas les normes en matière de CO₂, mais il n'est pas efficace dans le cas de l'industrie automobile. En effet, ce dispositif ne concerne que les matières premières et l'énergie, et pourrait inciter les constructeurs à délocaliser la production des pièces qui ne sont pas soumises au MACF. Du fait de la sophistication des véhicules, il n'existe pas de règle suffisamment claire pour **calculer une empreinte carbone qui ne soit pas discutable** d'un pays à l'autre. La Chine, par exemple, pourrait affecter en priorité ses certificats d'énergie décarbonée à tout ce qui a un enjeu d'exportation, afin d'afficher une empreinte carbone avantageuse.
- **L'accompagnement des salariés** : plus la transition vers le tout électrique sera rapide, et plus elle sera douloureuse sur le plan industriel et social. On peut anticiper une perte de 50 à 100.000 emplois en France d'ici 2030. Il est donc important de prévoir l'accompagnement et la formation des salariés affectés par les transformations en cours.

²¹ Cette notion est introduite dans le paragraphe consacré aux "Solutions de soutien à l'équilibre offre / demande" de la section B.1.2.1.

C.1.3. RECOMMANDATIONS CONCERNANT LES VÉHICULES LÉGERS

1- Approvisionnement et chaînes de valeur

- **Un effort majeur doit être consacré à la mise en service de gigafactories lithium-ion**, pour limiter la dépendance nationale aux importations en provenance d'Asie.
- **L'amélioration des batteries au lithium** nécessite de poursuivre les efforts de R&D, afin notamment d'accroître l'autonomie, d'augmenter la vitesse de recharge, de réduire les risques d'incendies, et de développer le recyclage.
- Il importe de **sécuriser l'approvisionnement en métaux critiques**, de développer l'économie circulaire, et de renforcer les investissements dans les nouvelles chaînes de valeur (batteries, électronique de puissance, cuivre).
- **Des batteries de nouvelle génération**, telles que les batteries tout solide ou les batteries post lithium-ion doivent faire l'objet de travaux de R&D, dans une perspective de long terme.
- **Des solutions alternatives aux batteries doivent continuer à être explorées**, par exemple la combustion d'hydrogène ou les piles à combustible, pour limiter l'exposition aux risques de pénurie des métaux critiques utilisés dans les batteries (Li, Co, Ni, Mn, etc.).

2- Infrastructures électriques

- Des travaux de R&D sont à mener pour **améliorer la vitesse de charge et réduire le coût des équipements**.
- **Des bornes de recharge** doivent être déployées à un rythme suffisant pour répondre aux besoins des usagers. Le besoin national de bornes de recharge, et l'impact du raccordement de ces bornes sur la stabilité du réseau électrique doivent être évalués.
- Avant de pouvoir mettre en œuvre le véhicule-réseau, il faudra que les véhicules soient équipés de chargeurs bidirectionnels de forte puissance (>10 kW). **Le modèle de financement des chargeurs bidirectionnels embarqués**, d'une part, et le modèle de rémunération des capacités de stockage mises à disposition à travers les batteries individuelles, d'autre part, doivent être établis aussi tôt que possible, si l'on souhaite s'orienter vers le véhicule-réseau.

C2 VÉHICULES LOURDS ET AVIATION

C.2.1. VISION PROSPECTIVE DU TRANSPORT LOURD ET DE L'AVIATION

La décarbonation du transport lourd et de l'aviation est particulièrement problématique. Différentes solutions pourraient être envisagées. Pour les comparer, il est indispensable de faire appel à des critères basés sur des analyses de cycle de vie (ACV), incluant la construction des véhicules, leur usage et leur recyclage.

Trois solutions pourraient être envisagées :

1- L'électrification et l'usage de batteries :

L'utilisation de moteurs électriques alimentés par des batteries est une technologie maîtrisée et énergétiquement efficace. Toutefois, la capacité massique des batteries est 20 à 30 fois inférieure à celle d'un carburant liquide²², limitant ainsi l'autonomie et la charge utile des véhicules. Des batteries de 80 kWh pour les véhicules légers et de 600 kWh pour les poids lourds (40 tonnes) permettent néanmoins des autonomies proches de 400 km, suffisantes pour de longs trajets à condition qu'elles puissent se recharger. Le déploiement de bornes de recharge rapides (100 à 250 kW pour les véhicules particuliers et 250 kW à 1 MW pour les poids lourds) devient donc une nécessité pour éviter la course au gigantisme des batteries. Le développement de la mobilité électrique devrait dans un premier temps se concentrer sur les véhicules particuliers et véhicules utilitaires ainsi que sur les poids lourds régionaux, qui peuvent se recharger pendant la nuit au dépôt. La SNCF prévoit également de remplacer à terme 70 % des trains à moteurs thermiques (Diesel) par des trains à propulsion électrique alimentés par des batteries.

Pour le transport aérien, le poids des batteries et la puissance transmissible aux moteurs cantonnent la propulsion électrique à des petits avions et des vols courts, à l'horizon 2035.

2- L'hydrogène bas carbone peut être utilisé pour alimenter des moteurs électriques par l'intermédiaire d'une pile à combustible ou, avec un rendement plus faible, pour être brûlé dans un moteur thermique.

Par comparaison aux carburants usuels, le dihydrogène (H₂) possède une faible capacité énergétique rapportée à son volume. Pour stocker et transporter efficacement l'hydrogène, il est essentiel de réduire ce volume. Trois solutions sont envisageables pour y parvenir :

a. Stockage à haute pression sous forme gazeuse : au-delà du coût énergétique que représente la compression, le dihydrogène pressurisé pose un problème pour la conception des joints, des conduites et des réservoirs. En effet, la molécule de dihydrogène est de loin la plus petite de toutes les molécules, ce qui la rend extrêmement pénétrante. Or, les fuites sont dangereuses, car le dihydrogène est très réactif, en particulier en présence d'air dans lequel il brûle spontanément.

b. Stockage à très basse température sous forme liquide : la forme liquide permet de stocker de grandes quantités d'hydrogène dans un volume réduit. La liquéfaction de l'hydrogène nécessite de le refroidir à très basse température, ce qui est un processus complexe et coûteux du point de vue énergétique.

c. Stockage solide sous forme d'hydrures métalliques : le stockage de l'hydrogène sous forme solide, au moyen d'hydrures métalliques, constitue une piste de recherche intéressante en raison de sa sûreté et de son rendement énergétique élevé. Cette solution de stockage, qui est encore à un stade expérimental, est limitée par son coût élevé et par son poids²³, qui semble incompatible avec un usage pour le transport.

Concernant le transport ferroviaire, la SNCF prévoit de remplacer à terme 30 % des motorisations Diesel par des trains alimentés à l'hydrogène.

Pour le transport aérien, l'usage de l'hydrogène liquide est envisageable pour les avions régionaux mais suppose le développement et la maîtrise des technologies associées (matériaux, écoulement diphasique entre le réservoir et la turbine, ...). Son emploi pour l'aviation longue distance suppose un nouveau design de l'appareil et ne peut être envisagé qu'à nettement plus long terme.

3- Les électro-carburants (e-fuels) et les biocarburants :

D'un point de vue strictement technique, les carburants alternatifs sont la solution la plus facilement accessible à court terme, car une grande partie de ces carburants dispose d'un caractère dit "drop-in", compatible avec les motorisations existantes sans ou avec peu de modifications. Toutefois, ils posent des enjeux en matière de mobilisation des ressources pour les produire. La production d'électro-carburants consomme beaucoup d'hydrogène et d'énergie, tandis que la production de bio-carburants nécessite de grandes quantités de biomasse, avec la nécessité d'en prioriser les usages. L'efficacité des moteurs thermiques étant deux à trois fois inférieure à celle des moteurs électriques, les carburants alternatifs mériteraient d'être utilisés en priorité dans les applications nécessitant une densité énergétique importante (transport longue distance routier, fluvial ou maritime, et surtout, aérien). Dans la mesure où les quantités produites suffiraient à satisfaire les usages prioritaires, les carburants alternatifs pourraient en outre favoriser la décarbonation rapide du parc de véhicules thermiques existant. Par ailleurs, l'utilisation d'hydrogène pour doper les biocarburants est nettement plus accessible que l'utilisation d'hydrogène pur.

²² Même en tenant compte du faible rendement des moteurs thermiques (30 %).

²³ Les composés métalliques utilisés sont très denses, si bien que la masse d'hydrogène pouvant être stockée ne dépasse pas 2 à 3% de la masse totale du réservoir.

C.2.1.1. SPÉCIFICITÉ DU TRANSPORT AÉRIEN

Pour le transport aérien, qui dispose de peu de solutions alternatives de décarbonation, les biocarburants avancés et les électro-carburants, qui sont couramment désignés par l'acronyme anglais SAF (Sustainable Aviation Fuels), sont les voies les plus prometteuses. Il convient aussi de préciser que l'effet de serre induit par l'aviation n'est pas limité aux seuls rejets de produits carbonés, mais résulte également des traînées de condensation²⁴, qui continueront à être produites même si l'hydrogène est utilisé comme carburant.

C.2.1.2. SPÉCIFICITÉ DU TRANSPORT MARITIME

Pour le transport maritime, la neutralité carbone passe par le recours à des motorisations et à des carburants neutres en carbone. De nombreuses solutions sont envisageables (hydrogène, méthanol, ammoniac, GNL avec capture du CO₂, biocarburants et carburants synthétiques) et doivent être expérimentées, mais aucune ne semble s'imposer pour le moment.

- Des mesures permettant de réduire dès aujourd'hui les émissions sont applicables en exploitation, en particulier la réduction de la vitesse, voire l'amélioration du design de la coque. La propulsion vélique, par voiles rigides ou rotors Flettner, utilisée en complément aux modes de propulsion usuels, peut également permettre de réduire la consommation de carburant des navires.
- La propulsion nucléaire pour la marine marchande connaît un regain d'intérêt parmi les grandes puissances nucléaires en vertu de l'immense autonomie qu'elle procure. Toutefois, cette technologie est coûteuse et pose des problèmes majeurs de sécurité, de prévention de la prolifération nucléaire, et de gestion des déchets.

C.2.1.3. SPÉCIFICITÉ DU TRANSPORT FERROVIAIRE

La SNCF prévoit de réduire de 30 % ses émissions de CO₂ d'ici 2030, tout en doublant la part du train dans les trajets quotidiens. La neutralité carbone du transport ferroviaire passe par des mesures d'efficacité énergétique (grâce notamment au pilotage actif des consommations au moyen de l'IoT, et à l'éco-conduite des trains), d'une part, et par le recours à des motorisations et des carburants neutres en carbone, d'autre part.

Dans ce contexte, la SNCF prépare le déploiement de trains à batteries alimentés par des sources d'énergies renouvelables (barrages hydroélectriques ou panneaux photovoltaïques déployés le long des voies), de trains alimentés au GNV dans certaines régions, ou à l'hydrogène bas-carbone, sous réserve de maîtriser les problèmes de sécurité.

À plus long terme, les e-fuels pourraient constituer une alternative, et sont étudiés avec intérêt.

C.2.2. LE STOCKAGE DES CARBURANTS ALTERNATIFS, UN GAME CHANGER POUR LES VÉHICULES LOURDS ET L'AVIATION

C.2.2.1. IMPACT DES MODES DE STOCKAGE DES CARBURANTS

L'utilisation des carburants alternatifs comme l'hydrogène et les carburants de synthèse peut faire partie des solutions, en concurrence avec les batteries, pour atteindre la neutralité d'ici 2050 dans le domaine du transport lourd routier longue distance. Le stockage de l'hydrogène constitue le principal verrou technique et industriel à surmonter.

C.2.2.2. POSITIONNEMENT DE LA FRANCE DANS LA CONCURRENCE MONDIALE

La France est à la pointe de la recherche et de l'industrie dans le domaine de la cryogénie et du transport liquide avec des entreprises comme Air Liquide, qui excelle dans les différentes formes de stockage de l'hydrogène, mais aussi GTT, filiale d'ENGIE et leader mondial des réservoirs pour le transport de GNL (Méthane liquide) et les acteurs du secteur aérospatial (le CNES, Airbus, Ariane Group) qui utilisent l'hydrogène liquide comme source d'énergie pour les propulseurs Ariane. Par ailleurs, les travaux de R&D menés notamment par l'IFPEN et TotalEnergies sur les moteurs thermiques à gaz sont complémentaires des recherches sur les réservoirs.

C.2.2.3. DÉFIS ET FACTEURS CLÉS DE SUCCÈS

1- Défis transversaux liés à l'usage des carburants alternatifs

- **Une infrastructure de recharge d'hydrogène bas carbone** suffisamment étendue doit être déployée pour que ces véhicules soient utilisables à grande échelle.
- **Le coût de production des électro-carburants** est le principal obstacle à l'utilisation de ce type de carburants alternatifs.
- **L'impact écologique des électro-carburants** dépend de la manière dont l'électricité consommée pour les synthétiser est elle-même produite.

²⁴ Messages Clés du Référentiel Aviation et Climat – Référentiel ISAE-SUPAERO Aviation et Climat – <https://www.isae-supaero.fr/fr/horizons-186/referentiel-aviation-et-climat/referentiel-aviation-et-climat/>

2- Défis spécifiques au stockage de l'hydrogène

- **Le coût élevé des réservoirs d'hydrogène** : le stockage de l'hydrogène est coûteux en raison des exigences de sécurité (prévention des fuites), et de la complexité des réservoirs.
- **La prévention des risques de détonation des réservoirs d'hydrogène** en cas d'incendie dans des milieux confinés (tunnels ou parkings)²⁵ pour les véhicules routiers et ferroviaires.
- **La gestion diphasique et modulée de l'hydrogène** depuis un stockage à - 253°C jusqu'à son introduction à + 100°C dans une turbine ou une pile à combustible.

C.2.3. RECOMMANDATIONS CONCERNANT LE TRANSPORT LOURD ET L'AVIATION

C.2.3.1. CONCERNANT LE RÉÉQUILIBRAGE ENTRE LES MODES DE TRANSPORT

- Développer l'usage du tramway, du train, du ferroutage au détriment du transport routier, et du transport par avion.
- Décarboner le transport fluvial et maritime et développer le transport maritime et fluvial bas carbone pour le transport de marchandises, au détriment de la route ou de l'avion.

C.2.3.2. CONCERNANT LES TECHNOLOGIES DE STOCKAGE D'ÉNERGIE POUR LE TRANSPORT

1- Carburants fossiles

L'arrêt des carburants fossiles est une nécessité, mais dans le domaine du transport lourd et de l'aviation, la transition vers des sources de puissance entièrement décarbonées ne pourra s'opérer que progressivement.

Ceci conduit à accélérer la recherche et le développement des poids lourds neutres en carbone. Dans le domaine de l'aviation longue distance, qui utilisera encore pendant plusieurs décennies des turbopropulseurs et des turboréacteurs, il est nécessaire de poursuivre la mise au point d'une nouvelle génération d'avions plus économe en énergie et de poursuivre les recherches sur les motorisations neutres en carbone.

Aussi est-il raisonnable, tant sur le plan économique qu'écologique de continuer à investir dans une R&D visant un usage plus parcimonieux des carburants fossiles, comme solution de transition avant la mise en œuvre de technologies sans carbone.

2- Électro-carburants (e-fuels) et biocarburants

- Poursuivre les efforts de recherche visant à améliorer le bilan énergétique, le stockage et le coût global des carburants de synthèse est une mesure conservatoire pour l'avenir proche.
- Poursuivre les efforts de recherche pour élargir le spectre de biomasses et déchets en entrée des procédés de production de biocarburants.

3- Hydrogène bas carbone

- Poursuivre les efforts de recherche sur les réservoirs d'hydrogène gazeux sous pression, qui pourraient constituer une solution pour le transport lourd et l'aviation, et sur le stockage d'hydrogène liquide, qui pourrait être une solution plus spécifiquement pour l'aviation.

4- Batteries

- Poursuivre les efforts de R&D dans le domaine des batteries est essentiel. Il se pourrait qu'à la faveur de progrès continus, l'usage de batteries se généralise pour les véhicules lourds avec une autonomie de plus en plus importante (engins de chantier, matériels agricoles, véhicules pour la livraison en milieu urbain ou en association avec le ferroutage mais aussi bus et poids lourds). En outre, les développements dans le domaine des batteries bénéficieront des effets de synergies avec les véhicules légers, pour lesquels les batteries s'imposent.
- Mettre au point des dispositifs d'auto-extinction des batteries de grande taille.
- Déployer des bornes de recharge rapides ou semi-rapides pour limiter la taille des batteries.

C.2.3.3. CAS PARTICULIER DU TRANSPORT MARITIME

- Expérimenter le potentiel des différentes motorisations et carburants neutres en carbone.

²⁵ Voir notamment <https://www.ifa-swiss.ch/en/magazine/detail/hydrogen-vehicles-in-tunnels-great-danger-for-emergency-response-personnel>

C3 INDUSTRIE

C.3.1. ÉMISSIONS DE GES DE L'INDUSTRIE EN FRANCE

En France, l'industrie représente près de 20 % des émissions de gaz à effet de serre. Cette proportion est plus faible que dans la plupart des autres pays, car le mix énergétique français est moins carboné que celui des autres pays européens, l'économie française s'étant fortement désindustrialisée depuis les années 1990, au profit principalement des services.

L'industrie est un secteur coûteux à décarboner en raison de son utilisation intensive d'énergie et de matières premières. Cependant, des investissements peuvent être engagés dès lors que des niveaux de rentabilité apparaissent comme suffisants.

Où concentrer les efforts de réduction des émissions de gaz à effet de serre en priorité ?

Trois secteurs concentrent à eux seuls les trois quarts des émissions industrielles françaises : **la métallurgie, la chimie et la production de matériaux de construction.**

C.3.2. TECHNOLOGIES PERMETTANT DE RÉDUIRE LES ÉMISSIONS DE L'INDUSTRIE

1- Technologies transversales :

- L'hydrogène bas carbone, dont le développement est aujourd'hui limité par le prix de l'électricité, pourrait remplacer l'hydrogène gris dans l'industrie chimique, notamment dans la production d'ammoniac et de méthanol qui représente deux tiers des émissions de la chimie dans le monde, mais aussi dans des secteurs qui n'utilisaient pas d'hydrogène pur, tels que l'industrie de l'acier ou du verre.
- Le captage et le stockage du carbone (ou CCS, pour Carbon Capture and Storage) pourrait permettre de décarboner l'industrie, et, dans une phase de transition, d'abattre rapidement des émissions qui sont très compliquées à éviter et qui ont des coûts très élevés.

2- Technologies de la chaleur :

- Basses températures : la géothermie et le solaire thermique sont deux sources de chaleur renouvelable sous-développées qui peuvent être utilisées par l'industrie à des coûts raisonnables. Certains besoins industriels pourraient également être couverts, à moyen terme, par les SMR.
- Moyennes températures : la biomasse est pertinente jusqu'à 400°C. D'autres combustibles seront nécessaires pour obtenir des températures plus élevées et des usages plus diversifiés.
- Hautes températures : les électro-carburants sont une solution techniquement accessible. À plus long terme, l'énergie solaire haute température pourrait être considérée.
- Le stockage de la chaleur présente un intérêt pour les processus industriels intermittents, et mérite d'être développé pour réduire les coûts et accompagner l'intégration des énergies renouvelables.

3- Autres technologies

- L'organisation du système industriel sous forme d'éco-parcs permettrait d'optimiser les flux d'énergie et de matières (gain d'efficacité et/ou de sobriété), et de mutualiser des coproduits énergétiques, tels que la chaleur fatale issue des processus à haute température, qui peut être valorisée à travers des processus à plus basse température, ou des coproduits non-énergétiques, comme les laitiers de la sidérurgie, qui peuvent être mis à profit dans la fabrication du clinker pour le ciment.
- Des technologies plus ou moins matures, sont mobilisables pour contribuer à la souveraineté de la France en termes d'approvisionnement en matières premières, parmi lesquelles le recyclage des plastiques, le recyclage des batteries, ou l'utilisation de la biomasse pour la chimie organique et pour les engrais.

C.3.2.1. IMPACT DE LA DÉCARBONATION DE L'INDUSTRIE

Compte tenu des technologies mobilisables, il sera difficile de supprimer entièrement les émissions de gaz à effet de serre de l'industrie. Une réduction des émissions de 85 % constitue un objectif très ambitieux à l'horizon 2050. Les émissions incompressibles de CO₂, liées en particulier à la production d'acier et de ciment, devront être captées, et stockées.

C.3.2.2. SITUATION DE LA FRANCE

L'industrie recouvre des technologies très diverses, et il n'est pas rare qu'à l'échelle nationale, une usine soit la seule à produire un type de produit donné. Il est donc souvent difficile de dupliquer une solution de décarbonation déjà mise œuvre.

1- Risques et opportunités

La décarbonation fait peser sur l'industrie française le risque d'une baisse de compétitivité, si le coût de la transition énergétique du secteur aval n'est pas suffisamment compensé par le MACF.

La production d'électro-carburants étant très énergivore, les pays où le coût des énergies renouvelables est le plus bas pourraient être favorisés par la décarbonation de l'industrie. Il faut toutefois considérer le système énergétique dans sa globalité, en veillant à tenir compte notamment du coût du transport de l'hydrogène.

Des entreprises savent gérer le stockage du CO₂, et pourraient le mettre en œuvre dans le sud-ouest de la France (zones de Pau et Lacq). Le volume global envisagé reste néanmoins assez faible.

2- Incitations publiques en faveur de la décarbonation de l'industrie

Pour les industries très émettrices, il existe notamment :

- des mécanismes de marché, comme l'ETS et le MACF, qui donnent un prix au carbone,
- des financements spécifiques pour la mise en œuvre de projets de décarbonation,
- des possibilités d'évaluation des besoins en infrastructures des sites industriels, pour estimer quels projets particuliers sont faisables en termes d'énergie et de mutualisation.

Pour les industries diffuses, des mesures ont été prises, sous la forme de dispositifs d'accompagnements portés par l'ADEME et les CCI, de financements souvent forfaitaires et d'obligations (type bilan GES).

C.3.2.3. DÉFIS ET FACTEURS CLÉS DE SUCCÈS

1- Réduction des émissions liées à la consommation d'énergie

Les besoins de réduction des émissions ne sont pas équitablement répartis entre les filières industrielles, ce qui nécessite de cibler finement les actions d'accompagnement à engager.

À court terme, la recherche doit permettre de favoriser :

- l'usage de la chaleur solaire, de la géothermie, de la chaleur fatale, et de l'électrification pour répondre à la demande de chaleur basse et moyenne température,
- le changement de combustible dans les gammes de températures plus élevées,
- la production d'hydrogène bas carbone, d'e-ammoniac et d'e-méthanol, en ciblant toutefois en priorité les usages dont la décarbonation aura un impact significatif sur les émissions de GES, et pour lesquels cette décarbonation est économiquement acceptable.

et à un terme plus éloigné :

- la production de ciment bas-carbone,
- l'usage de la chaleur solaire haute température.

2- Transition vers un approvisionnement circulaire

Parallèlement à la transition énergétique, les sources d'approvisionnement de l'industrie européenne seront amenées à évoluer dans les décennies à venir pour inclure une part croissante de matériaux recyclés. Or, le recyclage est une activité énergivore et dont la consommation d'énergie n'est pas linéaire : plus grande est la proportion de matériaux recyclés, et plus coûteux est le recyclage d'une quantité supplémentaire. Dans le contexte de la décarbonation de l'industrie, le bon équilibre entre extraction et circularité est encore largement incertain.

C.3.3. RECOMMANDATIONS CONCERNANT L'INDUSTRIE

1- Concernant les technologies à court et moyen termes :

- développer le solaire thermique, la géothermie, la réutilisation de chaleur fatale et l'électrification pour les besoins de chaleur basse et moyenne température,
- développer des "éco-parcs" permettant de mutualiser les infrastructures et les coproduits,
- développer la production d'e-ammoniac et d'e-méthanol.

2- Concernant les recherches de plus long terme :

- développer de nouvelles technologies de stockage de la chaleur destinées aux procédés industriels intermittents,
- développer de nouveaux procédés pour le ciment bas-carbone,
- développer la chaleur solaire haute température.

3- Concernant les aspects économiques et réglementaires :

- améliorer le coût d'abattement de la tonne de CO₂ et de pénalité énergétique,
- favoriser le changement de combustibles, en arbitrant l'utilisation prioritaire des ressources issues de la biomasse entre l'industrie chimique et la production de chaleur,
- soutenir les start-ups qui ont besoin d'infrastructures dans les domaines nouveaux.

C4 BÂTIMENT

C.4.1. PANORAMA DES ÉVOLUTIONS EN COURS DANS LE BÂTIMENT

Les évolutions récentes des règles de construction de bâtiments d'habitations et des bâtiments tertiaires attestent d'une ambition environnementale accrue face au changement climatique.

La réglementation énergétique (RE2020) vise plus particulièrement à :

- **diminuer l'impact sur le climat** des bâtiments neufs, en prenant en compte l'ensemble des émissions du bâtiment sur son cycle de vie, dès la construction,
- **améliorer la performance énergétique**, et réduire les consommations des bâtiments neufs (coefficient bBio), en augmentant la performance de l'isolation de l'enveloppe du bâti, et plus généralement, en améliorant la conception bioclimatique des bâtiments,
- **améliorer le confort des bâtiments**, en leur permettant de mieux résister aux épisodes de canicule qui seront plus fréquents et intenses du fait du changement climatique.

Les solutions techniques qui sont à mettre en œuvre pour atteindre ces objectifs peuvent relever de visions très différentes, depuis une approche "high-tech" qui privilégie le recours aux équipements techniques et aux outils numériques (équipement domotique, IoT) pour optimiser la gestion des bâtiments en temps réel, jusqu'à une conception "low-tech", qui valorise les constructions passives et les comportements écoresponsables. Ces types d'approches répondent à des attentes sociétales qui méritent d'être éclairées par des études comparative du bilan énergétique et du bilan carbone des différentes solutions techniques à l'échelle du cycle de vie des bâtiments, à la recherche des bonnes pratiques. Dans le cas de la rénovation des bâtiments existants, l'évaluation du bilan énergétique et du bilan carbone des actions à mener fait face à un problème de cohérence. Dans les logements des particuliers, les travaux d'amélioration ont longtemps donné lieu à actions ponctuelles, sans objectifs d'efficacité chiffrés, ni d'évaluation des résultats obtenus. Des mesures d'interdiction isolées, ou des mesures incitatives ciblées, ont conduit au fil du temps à des rénovations "par gestes" laissant entière la question de la cohérence à des actions et des objectifs globaux.

Par ailleurs, la croissance urbaine, dans les pays en développement, et l'aspiration croissante à vivre hors des centres-villes, du fait notamment des évolutions du prix du foncier ou des possibilités de télétravail, dans les pays développés, pose la question des économies d'énergie vues sous l'angle de l'articulation entre construction et mobilité : les bâtiments peuvent être très performants, mais sur leur durée de vie, les consommations d'énergie liées aux transports pourraient dépasser les économies d'énergie réalisées grâce aux gains de performances obtenus dans les bâtiments. Pour cette raison, la densification des villes représente une alternative avantageuse à l'étalement urbain, mais elle s'accompagne toutefois de problèmes difficiles à résoudre, tels que la raréfaction des ressources bioclimatiques ou l'accroissement des îlots de chaleur, par exemple.

C.4.2. LES GAME CHANGERS DANS LE BÂTIMENT

C.4.2.1. IMPACT DES CHANGEMENTS DANS LE BÂTIMENT SUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

La décarbonation du secteur de la construction passe par le développement de **modes constructifs qui émettent peu de gaz à effet de serre** sur l'ensemble de leur cycle de vie, ou qui permettent d'en stocker. Cette évolution inclut des alternatives aux matériaux énergivores, au profit de matériaux ayant une faible empreinte carbone, notamment les matériaux biosourcés, et en premier lieu le bois, pour réaliser la structure des bâtiments, leur enveloppe, et le second œuvre.

L'abandon des énergies fossiles pour chauffer les bâtiments va accroître **les besoins en énergie électrique** ou en biogaz, et rendra nécessaire une augmentation des besoins d'énergie primaire peu carbonée, auxquels s'ajouteront des besoins accrus de rafraîchissement en été du fait du changement climatique. Face à ces demandes croissantes, et parallèlement au développement des pompes à chaleur, des solutions peuvent être exploitées, telle que la **géothermie**, dans les régions où cette technologie est disponible, à travers la création ou l'extension de réseaux d'énergie multi-vecteurs (réseaux de chaleur urbains, éventuellement en lien avec l'industrie, cogénération, éco-parcs, etc.) ou le développement de moyens de stockage de chaleur inter-saisonnier. Ce nouveau couple énergie bas-carbone / efficacité pose la question du mix énergétique dans son ensemble, et de son impact économique global.

Les outils numériques sont utiles, dès la phase de programmation, à la conception des nouveaux bâtiments, notamment pour simuler les besoins énergétiques et pour optimiser les solutions à retenir en termes de choix et de dimensionnement des composants et des équipements. Pendant la phase de construction, le numérique est utile à la fabrication standardisée des composants en atelier, et à l'amélioration du contrôle qualité de ces composants. En phase d'exploitation, les outils numériques de type EMS (Energy Management System) permettent de renforcer la sobriété des bâtiments, en optimisant les consommations et les productions éventuelles (PV, batteries stationnaires) en fonction des besoins et des données recueillies par les capteurs. Ils peuvent fournir également une assistance fine à la détection de dysfonctionnements et à la maintenance des équipements (jumeau numérique).

C.4.2.2. POSITIONNEMENT DE LA FRANCE

La France importe une part significative des matériaux de construction, notamment les produits métallurgiques (acier, aluminium, cuivre). Plus du tiers du bois utilisé dans le secteur de la construction est également importé.

Les isolants minéraux et synthétiques, qui sont les plus majoritairement utilisés en France, sont réalisés par des procédés industriels très énergivores.

Les logiciels de BIM les plus utilisés en France sont développés en Allemagne ou aux États-Unis.

Les aides de l'État sur des rénovations "par geste" ont eu un impact limité à la fois sur l'efficacité énergétique et sur les émissions de gaz à effet serre.

C.4.2.3. DÉFIS ET FACTEURS CLÉ DE SUCCÈS

- **Le coût énergétique du numérique** : le développement de la Smart City va amplifier la consommation d'énergie du numérique qui est déjà importante, au risque d'annuler l'ensemble des économies dues aux gains de performance réalisés par ailleurs (effet rebond).
- **L'exponentiation des données** ne connaît pas de limite, et un équilibre devra être trouvé entre la profusion des données disponibles et l'accessibilité aux données pertinentes, en particulier à travers un filtrage efficace des informations utiles au pilotage.
- **L'électrification des usages** (chauffage, climatisation, intégration du PV, domotique, recharge des véhicules) va induire une évolution des normes relatives aux installations électriques.
- **La décarbonation des matériaux** de construction va entraîner une transformation profonde du secteur du bâtiment, en termes de production industrielle, et de compétences de mise en œuvre.
- **Le réemploi de matériaux** pose un ensemble de problèmes de normes de qualité et de garantie.
- **Le renouvellement des essences d'arbres** dans les forêts françaises devrait permettre d'augmenter significativement l'utilisation du bois dans la construction.
- **Le marché de matériaux d'occasion**, et la valorisation de matériaux et composants d'ouvrages recyclés, permettra de développer de nouvelles filières d'économie circulaire.
- **L'amélioration de la performance énergétique des bâtiments** va nécessiter le développement de matériaux et de produits à faible empreinte carbone, destinés en particulier à la rénovation.
- **La formation des acteurs de la rénovation** : l'hybridation des méthodes et des techniques va devoir être accompagnée par une hybridation des compétences et des métiers.
- **La structuration de l'offre pour la rénovation** : la rénovation "par gestes" nuit à l'efficacité des actions destinées à améliorer la performance énergétique des bâtiments existants.
- **En rénovation**, les technologies numériques pourront servir d'aide au diagnostic, en facilitant l'arbitrage entre les objectifs de performance et de réduction des émissions, d'une part, et le coût et l'efficacité des actions qui sont à mener pour les atteindre, d'autre part.
- **La géothermie** pourrait être un apport complémentaire aux réseaux d'énergie multi-vecteurs, et contribuer à l'équilibrage du stockage d'énergie inter-saisonnier.
- **Les moyens numériques** permettront de piloter les équipements par des systèmes d'information à faible impact environnemental (Green IT), en optimisant la flexibilité et la stabilité des réseaux.
- **Le Building Information Model (BIM)**, l'intelligence artificielle (IA), la réalité virtuelle et les jumeaux numériques vont permettre de travailler en même temps sur la réalité, et sur les simulations. Dans la continuité du BIM, le City Information Modeling (CIM) pourrait ouvrir la voie à une optimisation de l'aménagement urbain en appui à la transition énergétique. Pour une approche globale, il sera important de compléter cette représentation BIM par un jumeau numérique élargi à la prise en compte des sous-sols (géotechnique, risques sismiques, etc.).

C.4.3. RECOMMANDATIONS CONCERNANT LE BÂTIMENT

- **Des efforts de R&D sont à poursuivre pour produire des matériaux à faible empreinte carbone**, et pour favoriser le recyclage des matériaux issus de la déconstruction.
- **La qualification des matériaux et des composants issus de l'économie circulaire** doit disposer de cadres réglementaires, et offrir des conditions de garanties adaptées à leur statut.
- **La structuration de l'offre pour la rénovation du bâti**, depuis la phase de diagnostic jusqu'à la phase de réalisation par les différents corps d'état, est un levier de succès pour l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments.
- **Des aides financières** plus efficaces doivent être mises en place afin d'encourager la rénovation globale des bâtiments du parc ancien.
- **Des formations adaptées** doivent être mises en place pour permettre aux professionnels du secteur du bâtiment d'appréhender les travaux de rénovation dans le cadre d'une approche énergétique globale.
- **Les constructions passives**, et plus généralement la réalisation de bâtiments conçus selon les principes de l'architecture bioclimatique, doivent être fortement encouragées, ainsi que les aménagements urbains appropriés pour éviter les îlots de chaleur.
- **L'adaptation au changement climatique requiert une cartographie des risques** et une stratégie d'adaptation de la conception des bâtiments aux effets du changement climatique. Les risques à prendre en considération sont notamment les vagues de chaleur, les tempêtes, les submersions, les inondations ou la fissuration des sols argileux.
- La réalisation de **réseaux multi-énergies** doit être favorisée, afin de mutualiser les ressources disponibles (chaleur fatale de l'industrie, géothermie, etc.).
- Des efforts de R&D doivent être poursuivis en vue de **modéliser les réseaux énergétiques interconnectés**. Des jumeaux numériques doivent être développés pour confronter en temps réel des données de fonctionnement de ces réseaux à un ensemble de stratégies de pilotage, et permettre de renforcer l'efficacité énergétique des bâtiments aux différentes échelles pertinentes : locaux privés, immeubles, quartiers, villes entières.
- Des travaux de R&D sont nécessaires pour trouver **des solutions de stockage thermique** (chaleur basse température et génération de froid), qui soient à la fois économiques et adaptées à la diversité des besoins. Des progrès sont plus particulièrement attendus en termes de densité d'énergie et de durée de stockage, à travers des matériaux à changement de phase ou des procédés thermochimiques, par exemple.
- **La cyber sécurité** doit être suffisamment développée pour assurer la résilience des bâtiments, et particulièrement celle des smart buildings.

CAPTAGE, S

D. CAPTAGE, STOCKAGE, ET UTILISATION DU CARBONE

D.1. BOIS ET FORÊTS

- D.1.1. **Le bois d'œuvre : un moyen efficace de stocker le carbone**
 - D.1.1.1. Impact des forêts sur le cycle du carbone
 - D.1.1.2. Les usages du bois en France
 - D.1.1.3. Défis et facteurs clés de succès pour les forêts
- D.1.2. **Recommandations concernant les forêts**

D.2. CAPTAGE, STOCKAGE ET VALORISATION DU CO₂ (CCUS)

- D.2.1. **Panorama des technologies pour le CCUS**
 - D.2.1.1. Solutions de captage
 - D.2.1.2. Solutions de stockage
 - D.2.1.3. Modes d'utilisation et de valorisation du carbone
 - D.2.1.4. Cas particulier du BECCS
- D.2.2. **Le CCUS, un game changer pour la décarbonation de l'industrie**
 - D.2.2.1. Impact du CCUS sur les émissions industrielles
 - D.2.2.2. Positionnement de la France dans la concurrence mondiale
- D.2.3. **Défis et facteurs clés de succès du CCUS**
- D.2.4. **Recommandations concernant le CCUS**

D1 BOIS ET FORÊTS

D.1.1. LE BOIS D'ŒUVRE : UN MOYEN EFFICACE DE STOCKER LE CARBONE

D.1.1.1. IMPACT DES FORÊTS SUR LE CYCLE DU CARBONE

La forêt est avec la prairie et les marécages l'un des milieux qui stocke le plus de carbone par hectare : les arbres mais surtout les sols forestiers retiennent de grandes quantités de CO₂.

Les forêts couvrent 31 % du territoire de la France métropolitaine, soit 17 millions d'hectares. La superficie et la densité des forêts françaises sont en augmentation. La quantité de carbone contenue dans les forêts croît donc chaque année, mais la capacité des forêts à emmagasiner du carbone supplémentaire diminue à mesure qu'elles se densifient et qu'elles approchent de leur point de saturation. Prélever davantage de bois dans les zones les plus denses permettrait de libérer de l'espace pour de jeunes arbres et de régénérer ainsi la capacité des forêts absorber du carbone.

Entre les arbres et le sol, les forêts permettent actuellement de compenser 4 % des émissions de gaz à effet de serre.

D.1.1.2. LES USAGES DU BOIS EN FRANCE

Chaque année, 40 millions de mètres cubes de bois sont récoltés et répartis en bois d'œuvre (50 %), bois industrie (27 %) et bois énergie (23 %). Le bois d'œuvre est un moyen de stockage du carbone à long terme, et son utilisation pour la construction de maisons est de plus en plus répandue. En revanche, utiliser du bois comme source d'énergie libère du CO₂. Dans les calculs réglementaires, ce déstockage n'est pas encore comptabilisé. Or, il faut une cinquantaine d'années pour reconstituer une forêt, donc ce qui est déstocké ne peut pas être re-stocké à court terme.

D.1.1.3. DÉFIS ET FACTEURS CLÉS DE SUCCÈS POUR LES FORÊTS

1- Fragilité des forêts et de la biodiversité face au changement climatique et aux ravageurs

- **La mortalité des arbres** a significativement augmenté ces dernières années à cause de divers facteurs tels que la sécheresse et les ravageurs (insectes, champignons et bactéries).
- **Le renouvellement des essences** est un enjeu majeur pour adapter les forêts à l'augmentation des températures.
- **La protection de la biodiversité** : les experts ne s'accordent pas pour savoir s'il vaut mieux nettoyer la forêt pour prévenir les incendies, au risque de limiter la biodiversité, ou s'il faut laisser la forêt se développer, au risque que les incendies détruisent totalement cette biodiversité.

2- Défis et facteurs clés liés à la filière bois

- **Les forêts françaises vieillissent** ce qui augmente leur densité, et les rend difficiles à exploiter.
- **Les forêts françaises sont à 75 % privées**, et souvent sur des parcelles qui peuvent être très petites, ce qui entraîne des difficultés d'exploitation et de commercialisation.
- **Les outils d'évaluation des stocks** : il manque des indicateurs fiables pour mesurer le bilan carbone des forêts, notamment le captage du CO₂ par les plantes et l'équilibre avec le sol. Ces outils sont cependant nécessaires pour éclairer l'arbitrage entre stockage et prélèvement.

D.1.2. RECOMMANDATIONS CONCERNANT LES FORÊTS

1- Exploitation du bois

- **Les grands arbres doivent d'abord être utilisés comme matériau**, ce qui permet de stocker du carbone. Puis, les résidus peuvent être utilisés comme bois de chauffe ou bien comme matière première pour la fabrication de biocarburants ou de bioproduits, en veillant à laisser une quantité suffisante de résidus sur le sol pour favoriser la repousse.
- **Les coupes doivent être réalisées de manière respectueuse des sols** pour préserver le carbone qui y est stocké. En effet, il est important de ne pas remuer profondément les sols afin de préserver à la fois le carbone et les nutriments nécessaires à une repousse forte.

2- Adaptation au changement climatique et protection de la biodiversité

- **Un renouvellement des espèces d'arbres est nécessaire** pour adapter les forêts à l'augmentation des températures. Le mélange des essences offre en outre une meilleure résistance face aux ravageurs que la monoculture.
- Les efforts de recherches engagés pour lutter contre les effets de la sécheresse et des ravageurs tout en préservant la biodiversité méritent d'être prolongés.

3- Métrique du carbone

- Développer des outils capables de quantifier précisément les capacités du sol à stocker les différents types de carbone.
- Élaborer des modèles permettant de mesurer le captage et le stockage du CO₂ par les plantes, ainsi que l'équilibre avec le sol, à l'échelle de temps de régénération de la forêt.
- Développer des outils pour mesurer l'évolution du puits de carbone en fonction du niveau de prélèvement.
- Faire évoluer les réglementations pour prendre en compte le carbone déstocké lors de la combustion du bois.

D2 CAPTAGE, STOCKAGE ET VALORISATION DU CO2 (CCUS)

L'industrie ne pourra pas s'affranchir totalement de l'émission de gaz à serre d'ici 2050, et les puits de carbone naturels ne suffiront probablement pas à compenser ces émissions. Des solutions technologiques existent pour capter et stocker le CO₂, mais ces solutions nécessitent des investissements importants. Un moyen d'amoindrir le coût de ces investissements consiste à valoriser le CO₂²⁶ capté en l'utilisant, par exemple, comme matière première pour fabriquer des carburants ou des plastiques, dans une logique d'économie circulaire. C'est pourquoi, il est d'usage de considérer les technologies de captage, de stockage et de valorisation du CO₂²⁷ comme un système global, et non comme une somme de technologies isolées. L'acronyme anglais CCUS, qui signifie Carbon Capture, Utilization and Storage, est couramment employé pour désigner ces technologies.

D.2.1. PANORAMA DES TECHNOLOGIES POUR LE CCUS

D.2.1.1. SOLUTIONS DE CAPTAGE

1- Captage du CO₂ dans les fumées industrielles

L'industrie rejette de grandes quantités de gaz dans l'atmosphère, sous la forme mélanges gazeux dont la concentration en gaz à effet de serre varie selon le type d'activité. Le CO₂ n'est qu'une composante de ces rejets. Les quantités totales de gaz rejetés sont trop importantes pour pouvoir être stockées et il est donc nécessaire de séparer le CO₂ des autres gaz en vue de son stockage.

Il existe différents procédés pour séparer le CO₂ contenu dans un mélange de gaz :

- **L'absorption** : on fait circuler le gaz dans un liquide de lavage qui dissout le CO₂ et laisse passer les autres composants du mélange.
- **L'adsorption - désorption** : le mélange de gaz est mis en contact avec un milieu adsorbant. Dans un premier temps, la pression ou la température augmente, et le CO₂ se fixe sur le milieu par adsorption. Puis, le reste du gaz est évacué. Pour finir, la pression ou la température baisse à nouveau, ce qui provoque la désorption du CO₂. Le gaz de sortie, fortement concentré en CO₂, est ensuite pompé en vue d'être stocké.
- **Les changements de phase** : la différence entre les températures de changement de phase permet de séparer les gaz du mélange par distillation ou condensation fractionnée.

2- Captage du CO₂ dans l'atmosphère

Une solution alternative au captage dans les fumées industrielles consiste à extraire le CO₂ contenu dans l'air ambiant. Cette solution, appelée Direct Air Capture (DAC), présente l'inconvénient de consommer beaucoup d'énergie par kilogramme de CO₂ capté.

²⁶ Ces solutions sont couramment désignées par l'acronyme CCS (Carbon Capture and Storage).

²⁷ Les solutions de captage et de valorisation du CO₂ sont couramment désignées par l'acronyme CCU (Carbon Capture and Utilization)

D.2.1.2. SOLUTIONS DE STOCKAGE

1- Stockage des fluides

Le stockage dans des réservoirs géologiques souterrains consiste à injecter du CO₂ sous forme de fluide supercritique dans des roches perméables (aquifères) ou d'anciens gisements d'hydrocarbures étanches.

2- Stockage des solides

Le carbone peut être stocké à l'état solide, en particulier sous **la forme de "charcoal" ou de "biochar"²⁸ obtenue par pyrolyse**. En raison de sa stabilité chimique et de son caractère non volatil, le carbone solide offre différentes possibilités de stockage, telles que le stockage dans les mines désaffectées, ou par incorporation dans les ouvrages (bétons au biochar, remblais, etc.). Par ailleurs, des études sont en cours pour déterminer l'impact du biochar, lorsque celui-ci est directement retourné à la terre (lors du labourage par exemple).

D.2.1.3. MODES D'UTILISATION ET DE VALORISATION DU CARBONE

Les utilisations possibles des gaz captés varient selon leur teneur en CO₂ :

- **La récupération assistée des hydrocarbures** : l'injection du CO₂ dans un réservoir souterrain contenant des hydrocarbures facilite leur extraction. En effet, dans un champ pétrolifère, le CO₂ supercritique agit comme un solvant et diminue la viscosité du pétrole. Dans un champ gazier, le méthane, qui est un gaz léger, est repoussé vers la surface par le CO₂ injecté, qui est un gaz plus lourd. Cette méthode permet d'accroître la récupération d'hydrocarbure tout en assurant le stockage du carbone.
- **La méthanation** est processus permettant de valoriser le CO₂ en le faisant réagir avec de l'hydrogène pour produire du méthane (CH₄).
- **La synthèse organique** : le CO₂ peut être utilisé comme

²⁸ Le biochar est une variante du charcoal obtenue à partir de la biomasse.

matière première pour fabriquer des produits organiques, comme des acides, des fertilisants ou des plastiques.

- **La production de carbonates solides** : le CO₂ capté peut être combiné avec des roches ou des minéraux, éventuellement issus de filière de recyclage, pour former des carbonates solides exploitables comme matériaux de construction.
- **Autres usages du dioxyde de carbone** : le CO₂ est utilisé pour le traitement des eaux, pour l'extinction des incendies, mais aussi comme agent d'extraction, comme fluide frigorigène, mais aussi comme gaz neutre pour l'emballage alimentaire sous atmosphère contrôlée.

D.2.1.4. CAS PARTICULIER DU BECCS

La bioénergie avec captage et stockage du carbone, couramment désignée par l'acronyme anglais BECCS, est un processus qui consiste à exploiter l'énergie de la biomasse et à capter puis stocker une partie du carbone émis pour qu'il ne retourne pas dans l'atmosphère. Après exploitation de la biomasse, le carbone capté peut notamment se présenter sous forme de CO₂, qui peut être stocké (cf § D.2.1.2) ou utilisé (cf. § D.2.1.3). Le BECCS présente l'avantage de pouvoir produire des émissions négatives, dans la mesure où une partie du carbone prélevé par la biomasse, lors de sa formation, est stockée, et ainsi durablement retirée de l'atmosphère.

L'impact environnemental et l'efficacité énergétique du BECCS dépendent fortement du type de biomasse exploitée et du procédé d'exploitation (combustion, fermentation, pyrolyse).

À ce jour, le développement du BECCS se heurte cependant à un ensemble de difficultés techniques et économiques, notamment la maîtrise technique encore imparfaite des procédés, le coût de ces procédés, leur rendement limité (les opérations de captage et de stockage réduisent encore ce rendement), ou la disponibilité de la biomasse (concurrence avec d'autres usages).

D.2.2. LE CCUS, UN GAME CHANGER POUR LA DÉCARBONATION DE L'INDUSTRIE

D.2.2.1. IMPACT DU CCUS SUR LES ÉMISSIONS INDUSTRIELLES

Pour atteindre la neutralité carbone, les quantités de CO₂ qu'il faudrait effacer chaque année dans le monde se comptent en gigatonnes, et il n'existe pas encore de solution pour l'utiliser à une telle échelle. Le stockage du CO₂ est donc inévitable. Les réservoirs épuisés et les aquifères offrent une capacité de stockage considérable, estimée à plusieurs milliers de gigatonnes.

Le coût constitue cependant un frein au déploiement de ce mode de décarbonation. L'IFPEN évalue à 120 € le coût de la tonne de CO₂ effacée par le procédé actuellement en cours

de démonstration sur le site d'Arcelor-Mittal à Dunkerque, ce montant incluant le captage, le transport, et le stockage. Par comparaison, le DAC, qui capte dans l'atmosphère du CO₂ beaucoup moins concentré que dans les rejets industriels, pourrait coûter de l'ordre de dix fois plus cher, ce qui en limite les perspectives de déploiement à court terme.

D.2.2.2. POSITIONNEMENT DE LA FRANCE DANS LA CONCURRENCE MONDIALE

La France est à l'avant-garde, avec de grands industriels de l'énergie engagés dans la chimie (TotalEnergies, Engie, Air Liquide), des centres de recherche publique couplés à l'industrie (IFPEN, CNRS, CEA), et de bonnes positions de propriété industrielle (brevets). Des travaux de recherches sont en cours pour élaborer des nouveaux matériaux pour le CCUS, comme par exemple les réseaux organo-métalliques hautement poreux (Metal-Organic Framework) qui pourraient être utilisés pour adsorber du CO₂.

D.2.3. DÉFIS ET FACTEURS CLÉS DE SUCCÈS DU CCUS

- **Le coût** : les technologies de captage existent, mais sont très onéreuses, notamment parce qu'elles consomment beaucoup d'électricité.
- **De nouvelles applications pour le CO₂** : à ce jour, les utilisations industrielles du CO₂ sont nombreuses, mais représentent des marchés qui sont limités en quantité si on les compare aux besoins de stockage, et a plus forte raison si l'on considère qu'un certain nombre de ces utilisations n'assurent pas la séquestration du CO₂ de manière durable. Il importe donc de développer de nouveaux débouchés industriels pour le CO₂ et en particulier dans les matériaux de construction (les carbonates sont une piste) et dans les plastiques.
- **Le stockage souterrain** : des interrogations subsistent concernant l'injectabilité du CO₂, la migration et la transformation du CO₂ dans la roche sur des centaines d'années, et les moyens de surveillance de l'évolution géologique du réservoir.
- **Le besoin d'hydrogène** : l'hydrogène est un intrant indispensable pour la méthanation, et plus généralement pour l'utilisation du carbone dans la production de molécules.

D.2.4. RECOMMANDATIONS CONCERNANT LE CCUS

- **Promouvoir la R&D et la recherche fondamentale** : la technologie de captage du carbone étant encore relativement nouvelle, il existe de nombreuses opportunités pour améliorer les performances et réduire les coûts. La recherche est amenée à contribuer à la mise au point de nouveaux matériaux, de

D2

nouvelles techniques de captage et de stockage du CO₂, ainsi que de nouveaux modèles d'affaires pour rendre le CCUS plus économique et plus efficace.

- **La mutualisation des systèmes de captage de carbone** entre différentes activités émettrices situées dans une même zone industrielle est un sujet de recherche qui mériterait d'être étudié comme piste de baisse des coûts.
- **Les différentes options offertes par le BECCS** méritent d'être explorées selon une approche systémique (incluant une étude d'impact), pour identifier les combinaisons de procédés les plus pertinentes du point de vue environnemental, énergétique et économique.
- **Le taux de captage** : les techniques de captage en cours de déploiement ne captent qu'une partie (environ la moitié) des gaz à effet de serre rejetés par l'industrie dans l'atmosphère. Il importe de poursuivre les travaux de R&D visant à améliorer ce taux, si l'on souhaite assurer le bouclage du cycle du carbone.
- **Matériaux de synthèse** : un axe de recherche prioritaire concerne l'utilisation du carbone pour fabriquer des matériaux solides destinés à une utilisation durable. Dans le contexte de la raréfaction des matières premières, deux sujets de R&D méritent un effort particulier : l'utilisation de CO₂ pour la production de carbonates solides exploitables comme matériaux de construction, d'une part, et l'utilisation de CO₂ pour fabriquer les plastiques de synthèse, et continuer à satisfaire les besoins après l'arrêt de l'utilisation des produits pétroliers, d'autre part.
- **Accompagner la réalisation de démonstrateurs** : des démonstrateurs sont nécessaires pour réduire les risques associés au déploiement du CCUS à grande échelle et pour déterminer les coûts réels de la mise en œuvre de la technologie.
- **La législation** sur le carbone est un game changer non technologique pour le développement de toutes les chaînes de valeur impliquées dans le CCUS. Les investissements dans le CCUS nécessitent une visibilité suffisante pour garantir une rentabilité à long terme.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Globalement, pour la France et l'Europe, la transition énergétique, qui demande d'énormes moyens, se heurte à un manque de capital humain et financier. Les bouleversements en cours risquent de favoriser les dominations asiatique et américaine, et, à côté des préoccupations nationales de balance des paiements et d'emploi, une réaction européenne est nécessaire.

Dans ce contexte, la France va devoir mieux définir sa position et l'affectation de son potentiel, y compris en R&D. Il faut être attentif à la compétitivité des diverses solutions : la technologie peut tout, encore faut-il qu'un business model – et pas seulement des perspectives de marché - permette aux investisseurs de se mobiliser. Il conviendra de travailler avec les parties prenantes pour favoriser leur appropriation des solutions, en assurant une bonne intégration dans les écosystèmes locaux. Enfin il faut rappeler les enjeux d'approvisionnement en minerais, métaux, et eau.

Le paysage industriel est en pleine évolution. La production d'énergie, les véhicules, les carburants de synthèse (un arbitrage s'impose entre carburants liquide, gazeux, hydrogène), le CCUS, la "chimie verte", les circuits intégrés et l'électronique de puissance vont être l'affaire de grands groupes. Plusieurs d'entre eux ont en France des forces importantes de R&D et de production, et sont également très présents à l'étranger. Ils pourront s'appuyer sur un tissu de startups innovantes.

Il est important que la recherche publique soit couplée avec ces groupes, et consacre davantage de forces au progrès des technologies dominantes. Quelques grands laboratoires comptent parmi les meilleurs, mais la recherche académique se disperse beaucoup et n'a pas la culture de la propriété industrielle.

La recherche publique doit faire évoluer ses méthodes et tenir compte des nouvelles capacités offertes par les modèles et la simulation, qui permettent une prise plus directe sur les lignes pilotes et les installations de l'industrie. Et, comme le font les Cifre, le doctorat doit former davantage aux interactions avec les entreprises.

Dans une récente analyse comparative mondiale relative aux technologies critiques²⁹, sur la base des articles les plus cités, on ne trouve pas de laboratoire ou d'institut français dans les groupes de tête (sauf pour l'énergie nucléaire, les circuits intégrés et les capteurs quantiques). Selon cette analyse, les meilleurs laboratoires sont aussi ceux qui attirent le plus les talents. Globalement - sans appliquer indistinctement cette recommandation à tous les laboratoires -, notre recherche publique doit être confrontée à une exigence plus élevée. Paradoxalement, on peut se demander si, dans son financement, on n'a pas trop augmenté la part des appels à projets. Résoudre les problèmes de fond que posent les technologies critiques demande un effort continu, dans le cadre d'une vision stratégique. Cet effort ne devrait-il pas être soutenu par davantage de financement récurrent accordé aux meilleures équipes, ou par un allongement substantiel de la durée des financements par les AAP ? Les laboratoires communs entre les entreprises et les équipes

²⁹ Australian Strategic Policy Institute: "Who is leading the critical technology race?"

académiques sont d'ailleurs un excellent moyen d'assurer le partage de la vision, la continuité des travaux et la stabilité des équipes.

Les principales sources d'énergie décarbonées seront l'hydroélectrique, le nucléaire, le photovoltaïque, les éoliennes. La méthanisation des déchets, l'hydrogène natif, la géothermie sont également des sources significatives.

Rapatrifier une partie significative de la production de cellules photovoltaïques en France, et même en Europe, est un défi qui demanderait des investissements massifs et serait très difficile à relever. La rupture que constituerait le dépôt direct sur verre n'a de chances que si l'on obtient des couches homogènes sur de grandes surfaces et stables pendant des dizaines d'années. L'éolien, en particulier offshore, est un secteur où notre pays dispose d'avantages compétitifs tant au niveau des ressources que du tissu industriel, mais ils ne joueront pleinement leur rôle que dans une dizaine d'années, avec l'installation des plates-formes flottantes.

Tout cela doit être considéré dans l'affectation des forces de R&D, et plus largement dans l'équilibre du mix énergétique français, compte tenu de notre capacité nucléaire, dont le développement est l'une des priorités, urgente face à la croissance de la consommation d'électricité.

Photovoltaïque et éolien posent le problème croissant de stabilité du réseau, car l'électricité se stocke difficilement. Toutefois, il peut être réduit par la flexibilité des réseaux : d'où l'importance de la R&D sur les batteries, les convertisseurs de puissance, et l'effacement de la demande.

L'électrification va être la voie principale : il faut anticiper et maîtriser la croissance de la consommation d'électricité, augmenter les capacités de production, de transport et de distribution, convertir des processus industriels (avec un fort impact sur la structure des chaînes de valeur).

Le numérique est un outil indispensable : modélisation, simulation, objets intelligents, pilotage interactif et décentralisé. Il faut développer des outils de simulation multi-systèmes, multi-échelles, multi-énergies. L'utilisation de données satellitaires offre des opportunités nouvelles.

Avec le développement des réseaux et des interactions numériques, il va falloir beaucoup travailler sur la cyber-sécurité. Plus largement, la sécurité des nouveaux objets et procédés technologiques est un enjeu majeur ; c'est en particulier le cas pour les batteries et l'hydrogène.



33, rue Rennequin - 75017 Paris
Tél. : 01 55 35 25 50

www.anrt.asso.fr