

LA *GREEN TECH*: QUAND LES ENTREPRISES APPORTENT DES SOLUTIONS À LA CRISE CLIMATIQUE

Novembre 2023

ASTERÉS
études, recherche & conseil économique



ARBEVEL



Sébastien Lalevée

Directeur général
de la financière
Arbevel

Quelques semaines avant la victoire de Deepmind/AlphaGo sur Lee Sedol en 2016, les experts de l'IA expliquaient qu'il faudrait encore des années avant un tel succès. Peu de gens anticipaient Chat GPT il y a à peine 1 an... Les ingrédients communs de ces succès mal anticipés ? **Beaucoup de capitaux, d'intelligence et des initiatives privées.**

Ces mêmes ingrédients sont aujourd'hui à l'œuvre pour un développement économique plus durable, le choix de la décroissance mondiale étant un choix utopique vu les diversités de niveau de développement et les réalités géopolitiques.

Les États, les entreprises et les citoyens ont leur rôle à jouer, mais la situation est complexe, car inédite et plus pressante chaque jour, nécessitant des décisions de rupture et un changement de paradigme. Seules les entreprises et les entrepreneurs disposent d'un ADN capable de gérer une telle situation, à condition que le cadre légal et les infrastructures soient mis en place par les États, qui doivent s'adapter rapidement à des réalités industrielles, des ressources contraintes et des opinions publiques mobilisées.

**« Seules les entreprises et les entrepreneurs
disposent d'un ADN capable de gérer une telle
situation »**

Les sources du développement durable sont protéiformes et multiples et doivent avant tout être analysées selon leurs efficacités globales, au-delà du ressenti des citoyens et leurs impacts médiatiques. Au-delà des énergies renouvelables et du transport propre, facilement identifiés aujourd'hui, l'efficacité énergétique, un urbanisme optimisé, le développement de l'économie circulaire, mais aussi l'usage des outils digitaux, de l'IA utilisant les données publiques existantes sont des sources extraordinaires d'économie de CO₂ à PIB constant. L'éducation est évidemment un levier fondamental, à condition d'éviter les simplifications et le dogmatisme.

L'enjeu est d'éviter la création, puis le rejet, de milliards de tonnes de CO₂. Aidons les sociétés comme *Française de l'Énergie*, qui capte du grisou et permet d'éviter des émissions de méthane dans l'atmosphère ; ce gaz a un pouvoir de réchauffement quatre-vingt fois supérieur à celui du CO₂. La start-up *Kayrros* permet, à l'aide d'images satellites et d'IA, d'identifier les fuites de méthane des usines ou des pipelines. Quand on réalise que les cinquante plus grandes fuites annuelles correspondent à la totalité du coût carbone du transport aérien, on doit s'interroger sur ce qui est le plus facile à modifier. Ces deux exemples illustrent l'impact que les entreprises peuvent produire avec peu de ressources. Il y a des centaines d'exemples comme ceux-là à travers le monde.

Quand le sage montre la lune, l'idiot regarde le doigt. Regardons la lune

La décarbonation de l'économie constitue l'un des défis majeurs de cette première partie du XXI^e siècle. La responsabilité qui pèse sur nos épaules est lourde : les choix que nous faisons aujourd'hui vont décider du destin de l'humanité pour les siècles à venir. Souhaitons-nous rester passifs au risque de causer des dommages climatiques irréversibles ? Souhaitons-nous contraindre la population au risque de mettre en danger la démocratie ? Ou souhaitons-nous faire avancer de concert la prospérité avec l'écologie ?

Nous sommes persuadés qu'une économie décarbonée dans un monde désirable est possible. Les scénarios les plus réalistes à nos yeux ne sont en effet pas les plus frugaux. Qu'y a-t-il de réaliste dans un scénario qui repose sur l'avènement d'un homme nouveau qui ne correspond en rien aux attentes de la majorité de la population ? À côté, le « pari technologique » n'en est pas un : comme cela est détaillé dans cette étude, les technologies nécessaires à l'atteinte de la neutralité carbone à horizon 2050 progressent et se déploient très rapidement. L'enjeu est de parvenir à les passer à l'échelle et les déployer à temps.

« Le meilleur service que la France et l'Europe peuvent rendre au monde entier est d'inventer les technologies qui alimenteront la croissance verte de demain. »

Les efforts qu'il reste à réaliser sont considérables et ne doivent pas être sous-estimés. Ce n'est probablement pas en « laissant faire » que le défi sera relevé. Mais ce n'est pas non plus seulement d'en haut que les solutions vont tomber. Le rôle des pouvoirs publics est d'inciter, orienter, voire soutenir, et ce sont les entreprises qui, partout dans le monde, développent des solutions technologiques et trouvent des business models, comme l'illustre cette étude. Face à un tel défi, ne pas faire appel à la créativité du secteur privé serait une terrible erreur. Bien sûr, croire que la neutralité carbone peut être atteinte sans questionner un minimum certains modes de consommation est une illusion : le recours à la sobriété dans certains cas précis apparaît raisonnable et inévitable.

Enfin, n'oublions pas que l'enjeu est mondial. Est-ce réaliste de croire à un tournant décroissant en Inde ou à l'avènement d'une « Chine frugale » ? La question écologique ne peut faire abstraction de cette réalité géopolitique. Le meilleur service que la France et l'Europe peuvent rendre au monde entier est d'inventer les technologies qui alimenteront la croissance verte de demain.



Nicolas Bouzou

Fondateur du cabinet Asterès

LUTTER CONTRE LE CHANGEMENT CLIMATIQUE : UNE INDISPENSABLE MOBILISATION DES TECHNOLOGIES	11
Le changement climatique : une cause et des réponses humaines	12
Les entreprises : un rôle crucial pour développer et déployer les green tech	14
Méthode : analyser des technologies vertes développées par des entreprises	18
HYDROGÈNE ET CAPTAGE CARBONE : POUR CONTINUER À PRODUIRE	21
L'hydrogène par électrolyse : un nouveau vecteur d'énergie verte	22
Captage du carbone : la solution pour les usines impossibles à décarboner	26
RECYCLAGE : MÉTAMORPHOSER LES DÉCHETS EN RESSOURCES	31
Recyclage textile : quand la chimie valorise le fond des placards	32
Recyclage plastique : vers une revalorisation des déchets à l'infini	36
Traitement des eaux usées : déployer des circuits de réutilisation à grande échelle	41
L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE : COLLECTER, ANALYSER, OPTIMISER	45
De l'IA dans tous les bâtiments : vers la fin du grand gaspillage énergétique ?	46

La France doit encore réduire de 324 Mt éqCO₂ ses émissions de GES d'ici 2050.

Le réchauffement climatique résulte des activités humaines qui rejettent des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. En 2021, 54,6 Gt éqCO₂ ont été émises par l'économie mondiale, dont 415 Mt éqCO₂ par l'économie française. Pour atteindre la neutralité carbone en 2050, la France doit diminuer ses émissions de 12 Mt éqCO₂ par an, contre 11 Mt éqCO₂ en 2022. La France ne peut également pas se passer d'investir dans l'adaptation à un monde dont le climat sera inévitablement plus chaud. Actuellement, les investissements verts en France s'élèvent à 84 Mds€ par an, public et privé confondus, et France stratégie estime que 66 Mds€ supplémentaires devraient être investis chaque année, dont 33 Mds€ par des acteurs privés¹.

L'atteinte de la neutralité carbone à horizon 2050 implique un rythme de progrès et de déploiement des technologies extrêmement rapide.

Concernant les technologies requises pour les objectifs de décarbonation intermédiaires, à horizon 2030, la grande majorité des technologies vertes sont déjà matures et l'enjeu est avant tout un enjeu de déploiement². Le déploiement des

technologies vertes dans le monde s'est accéléré ces dernières années mais certaines technologies peinent encore à atteindre leurs objectifs de déploiement – c'est le cas notamment de l'éolien en France³. Concernant les technologies requises pour la décarbonation totale à horizon 2050, une part significative des technologies est encore en cours de développement et les entreprises doivent jouer un rôle important dans l'intensification des investissements pour passer ces technologies à l'échelle commerciale. L'importance accordée à la technologie dans la lutte contre le changement climatique relève d'un choix de société : certains miseront davantage sur les changements de comportement (« sobriété ») et d'autres sur le progrès technologique. Le point de vue de cette étude est résolument technophile sans être naïf : l'objectif est d'analyser une sélection de technologies en cours de développement ou d'adoption et d'évaluer le rôle que ces technologies peuvent potentiellement jouer dans la lutte contre le changement climatique à horizon 2050.

Les six technologies analysées dans cette étude ont le potentiel de contribuer pour 11% à l'atteinte de la neutralité carbone d'ici 2050 en France et de diminuer de 8% l'empreinte carbone des Français.

¹ Les acteurs privés comprennent les ménages et les entreprises. Jean Pisani-Ferry et Selma Mahfouz, « Les incidences économiques de l'action pour le climat » (France Stratégie, mai 2023), <https://www.strategie.gouv.fr/publications/incidences-economiques-de-laction-climat>.

² Laura Cozzi et al., « Net Zero Roadmap - A global pathway to keep the 1,5°C Goal in Reach (2023 update) » (Agence internationale de l'Énergie,

septembre 2023), <https://www.AIE.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach>.

³ « Les soutiens à l'éolien terrestre et maritime » (Cour des comptes, 17 octobre 2023), <https://www.ccomptes.fr/fr/publications/les-soutiens-leolien-terrestre-et-maritime>.

Six technologies ou ensembles de technologies ont été sélectionnées afin d'être analysées chacune en profondeur, le but étant d'illustrer l'apport du secteur privé et de l'innovation dans la lutte contre le changement climatique (voir le tableau ci-dessous). Ces technologies sont pour la plupart à un stade de maturité situé entre la phase de démonstration commerciale et l'adoption par le marché : une étape cruciale, le passage à l'échelle étant souvent semé d'imprévus. Ces technologies peuvent contribuer à la résolution de la crise climatique *via* la baisse des émissions de CO₂ (-48 Mt éqCO₂ à horizon 2050 d'après les calculs d'Asterès) et l'amélioration de l'efficacité énergétique (96 TWh d'énergie économisés dans le bâtiment grâce à l'IA) et contribuer à l'adaptation à la sécheresse *via* la réutilisation de l'eau. Ces résultats sont obtenus avec des taux de déploiement entre 2022 et 2050 situés entre 7% et 15% selon les technologies. Ces taux sont ambitieux mais restent inférieurs au rythme de déploiement des batteries de véhicules électriques entre 2010 et 2020 (70%), des panneaux photovoltaïques (24%) ou encore de la Ford T entre 1910 et 1920 (34%). Notons toutefois qu'il s'agit d'un rythme de déploiement moyen et le rythme de déploiement actuel des principales technologies analysées dans cette étude est probablement plus faible en raison de leur manque de maturité. Ceci implique que leur rythme de déploiement sur les dix dernières années devrait être plus élevé que la moyenne entre aujourd'hui et 2050.

La transition énergétique constitue en réalité une multitude de transitions industrielles, à la fois technologiques, organisationnelles et économiques

De ces six technologies analysées, ressortent certaines conclusions saillantes sur le déploiement des *green tech*. Premièrement le tissu industriel constitue le moteur de l'innovation et des technologies, la transition environnementale doit ainsi être aussi pensée comme une transition industrielle. Deuxièmement, les technologies déployées peuvent être à fort contenu de R&D, avec des innovations assez radicales comme le captage carbone, ou relever plus de l'organisation des services, avec des techniques déjà existantes comme pour le retraitement et la réutilisation des eaux usées. Les réponses techniques aux enjeux climatiques ne sont pas à opposer entre des *low tech* et des *deep tech* mais plutôt à unifier dans un arsenal varié d'applications techniques. Troisièmement, ce nouvel arsenal technologique s'applique à des problématiques à chaque fois spécifiques et engendre un peu partout de nouveaux partages de la valeur. La transition énergétique n'est pas donc une mutation unique, d'une source d'énergie vers l'autre, mais plutôt une multitude de transformations à la fois techniques, organisationnelles et économiques.

Synthèse du niveau de maturité actuel, du marché et de l'impact environnemental à horizon 2050 des technologies étudiées

Technologie	TRL	Volume (2050)	TCAM (2022 – 2050)	Parts de marché (2050)	Impact env. (2050)
Hydrogène	6 – 9	2,8 Mt	15%	9%	- 20 Mt éqCO ₂
CCUS	6 – 11	14,7 Mt	14%*	-	-15 Mt éqCO ₂
Recyclage textile	7 – 11	0,4 Mt	7%	57%	-9 Mt éqCO ₂
Recyclage plastique	1 – 11	2,9 Mt	7%	51%	-3 Mt éqCO ₂
Réutilisation de l'eau	8 – 11	1,6 Md m ³	13%	19%	- Stress hydrique
IA appliquée aux bâtiments	9 – 11	4 100 M de m ²	8%	100%	- 96 TWh

*Le « technology-readiness level est un indicateur de la maturité d'une technologie, sur une échelle de 1 à 11 (voir 1.3.2, p. 25)

Note : pour le CCUS, le taux de croissance annuel moyen a été calculé entre 2028 à 2050 puisqu'aucun site n'est actuellement en activité en France

À l'occasion de la sixième édition des Rencontres de l'Avenir organisées conjointement par Asterès et la ville de Saint-Raphaël, Asterès a réalisé, en partenariat avec la Financière Arbevel, une étude sur les technologies vertes.

Les collaborateurs d'Arbevel ont contribué à la réflexion et le document a été rédigé par Guillaume Moukala Same et Charles-Antoine Schwerer, économistes chez Asterès et les encadrés sur les sociétés par Arbevel. Les sources de l'ensemble des données utilisées sont disponibles dans l'étude. Les propos tenus ici n'engagent que le cabinet ASTERES.



LUTTER CONTRE LE CHANGEMENT CLIMATIQUE : UNE INDISPENSABLE MOBILISATION DES TECHNOLOGIES

Partie 1 - Contexte

LE CHANGEMENT CLIMATIQUE : UNE CAUSE ET DES RÉPONSES HUMAINES

Cause : une accumulation exceptionnelle dans l'atmosphère de gaz à effet de serre émis par l'Homme.

Le réchauffement climatique résulte des activités humaines qui rejettent des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. L'effet de serre désigne le « phénomène naturel par lequel les gaz présents dans l'atmosphère retiennent une partie de la chaleur émise » par la Terre⁴. Les GES émis par les activités humaines sont le dioxyde de carbone (CO₂, 74% des émissions), le méthane (CH₄, 17%), le protoxyde d'azote (N₂O, 6%) et les gaz fluorés (F-gaz, 2%)⁵. Comme ces gaz ont des potentiels de réchauffement global (PRG) différents, les scientifiques ont défini une unité de mesure unique afin de les comparer et mesurer les

émissions, la tonne équivalent CO₂ (t éqCO₂). La concentration de GES dans l'atmosphère a fortement augmenté depuis le milieu du XVIII^e siècle : la concentration en CO₂ est par exemple passée de 280 ppm en 1750 à 419 ppm en 2023, soit une hausse de 50%⁶, atteignant un niveau inédit dans l'histoire de la planète (voir graphique ci-dessous). Selon le GIEC, le réchauffement climatique a déjà atteint +1,1°C sur la dernière décennie par rapport l'ère préindustrielle (1850 – 1990) et pourrait à la fin du siècle dépasser +4°C si rien n'est fait, ou être limité à +1,5°C dans le meilleur des scénarios⁷.

+1,1°C

**Le réchauffement climatique sur la dernière
décennie par rapport l'ère préindustrielle
(1850 – 1990), selon le GIEC.**

⁴ « Effet de serre », Klimaat | Climat, consulté le 19 octobre 2023, <https://climat.be/changements-climatiques/causes/effet-de-serre>.

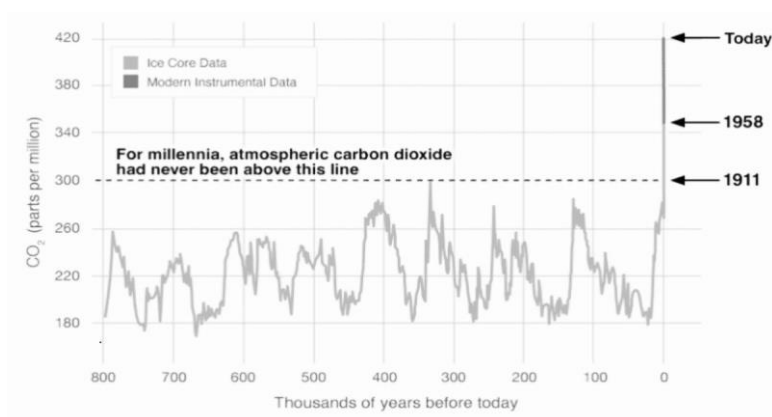
⁵ Hannah Ritchie, Pablo Rosado, et Max Roser, « Greenhouse gas emissions », *Our World in Data*, 28 septembre 2023, <https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions>.

⁶ « Gaz à effet de serre », Klimaat | Climat, consulté le 19 octobre 2023, <https://climat.be/changements-climatiques/causes/gaz-a-effet-de-serre>; NASA Global Climate Change, « Carbon Dioxide Concentration | NASA Global Climate Change »,

Climate Change: Vital Signs of the Planet, consulté le 19 octobre 2023, <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide>.

⁷ Katherine Calvin et al., « IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (Eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. », First (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 25 juillet 2023), <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.

Évolution de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère



Source : NASA⁸

Réponses possibles : atténuation, adaptation et géo-ingénierie

Il existe trois approches différentes à la lutte contre le changement climatique : l'atténuation, l'adaptation et la géo-ingénierie. L'atténuation consiste à limiter le degré de réchauffement en réduisant les émissions de GES et/ou en retirant directement le GES de l'atmosphère, l'adaptation à apprendre à vivre dans un monde plus chaud et la géo-ingénierie à manipuler le climat pour refroidir la température à la surface de la Terre. Ces approches sont complémentaires : étant donné la trajectoire actuelle, l'atténuation ne suffira pas à revenir au climat préindustriel et l'humanité devra s'adapter à un nouveau climat, ou trouver des moyens de revenir en arrière. L'atténuation reste toutefois l'approche la plus sûre et le sujet principal des négociations internationales – l'Accord de Paris vise notamment à contenir le réchauffement en dessous de +2°C. Cette étude s'intéressera donc particulièrement à cet aspect, bien que certaines technologies

jouent un rôle dans l'adaptation sont considérées. En revanche les technologies de géo-ingénierie ne sont pas analysées dans cette étude.

Le rôle de la technologie : un choix de société

La technologie est indispensable dans l'atténuation du changement climatique et sa place relève d'un choix de société. Les émissions de GES peuvent être réduites de deux manières : soit en produisant mieux grâce au progrès technique (« croissance verte ») soit en produisant moins (« sobriété »). Les plans proposés par les diverses organisations nationales ou internationales pour atteindre la neutralité carbone à horizon 2050 se distinguent par l'équilibre trouvé entre ces deux approches. Le scénario 1 de l'ADEME, dit « génération frugale », explore par exemple la possibilité d'une transition qui s'appuierait essentiellement sur la sobriété et marginalement sur le progrès technique⁹. À

⁸ Change, « Carbon Dioxide Concentration | NASA Global Climate Change ».

⁹ Notons qu'il ne s'agit pas du scénario proposé par l'ADEME mais simplement d'un des quatre scénarios explorés. « Transition(s) 2050 » (ADEME, 2021), <https://www.ademe.fr/les-futurs-en-transition/>.

l'inverse, la stratégie net zéro de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) repose à 96% sur la technologie, dont des technologies encore en développement, et seulement à 4% sur la sobriété¹⁰. Le Plan de transformation de l'économie française (PTEF) du Shift Project et la stratégie nationale bas carbone (SNBC) du gouvernement constituent des scénarios intermédiaires en proposant de recourir à des technologies de rupture tout en fournissant des efforts importants de sobriété¹¹. *In fine*,

tous ces scénarios s'appuient au moins un minimum sur le déploiement de technologies disponibles actuellement (solaire, éolien, voitures électriques) et de rupture (notamment l'hydrogène produit par électrolyse, dont la présence est commune à tous les scénarios analysés). C'est sur ces technologies de rupture qu'Asterès met l'accent dans cette étude. Concernant la sobriété, seul le scénario le plus extrême exploré par l'ADEME n'y a pas recours¹².

LES ENTREPRISES : UN RÔLE CRUCIAL POUR DÉVELOPPER ET DÉPLOYER LES *GREEN TECH*

Émissions de GES : La France se situe à 324 Mt éqCO₂ de la neutralité carbone.

Les émissions de GES doivent encore diminuer de 324 Mt éqCO₂ en France pour atteindre la neutralité carbone et continuent d'augmenter dans le monde. Les émissions mondiales de GES ont rebondi à 54,6 Gt éqCO₂ en 2021, après une chute pendant la crise sanitaire¹³. La France représentait 0,8% des émissions mondiales de GES en 2021 avec 415

Mt éqCO₂. En 2022, les émissions de GES ont baissé de 11 Mt éqCO₂ par rapport à l'année précédente en France, atteignant 404 Mt éqCO₂¹⁴. Cette baisse est plus importante que celles observées les années précédentes mais encore insuffisante. Pour atteindre la neutralité carbone à horizon 2050, les émissions de GES de la France doivent encore diminuer jusqu'à atteindre 80 Mt éqCO₂¹⁵, ce qui représente une baisse moyenne de 12 Mt éqCO₂ par an. Les activités décarbonées en premières sont généralement les plus faciles à décarboner, ce qui signifie que plus les

¹⁰ Cozzi et al., « Net Zero Roadmap - A global pathway to keep the 1,5°C Goal in Reach (2023 update) ».

¹¹ « Crise(s), climat : plan de transformation de l'économie française », The Shift Project, consulté le 19 octobre 2023, <https://theshiftproject.org/crises-climat-plan-de-transformation-de-leconomie-francaise/>; « Stratégie nationale bas-carbone - la transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone » (Ministère de la Transition écologique et solidaire, mars 2020), <https://www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc>.

¹² Baptisé « pari réparateur », ce scénario est très risqué puisqu'il consiste à « dépenser d'énormes quantités d'énergie pour extraire le CO₂ ambiant » selon l'ADEME.

¹³ Ritchie, Rosado, et Roser, « Greenhouse gas emissions ».

¹⁴ « Acter l'urgence - engager les moyens » (Haut Conseil pour le Climat, juin 2023).

¹⁵ À 80 Mt, les émissions de CO₂ seraient égales à la capacité d'absorption par les puits de carbone. « Stratégie nationale bas-carbone - la transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone ».

émissions baissent, plus la poursuite de cette baisse nécessite d'efforts technologiques, politiques et sociétaux. Notons enfin que les émissions de GES d'un pays ne prennent pas en compte les émissions dites « importées », contrairement à l'empreinte carbone. D'après le Service des données et études statistiques (SDES), l'empreinte carbone était de 604 Mt eqCO_2 en France en 2021, soit 1,5 fois plus élevée que les émissions du pays¹⁶. En maintenant ce ratio constant, Asterès estime à 588 Mt eqCO_2 l'empreinte carbone des Français en 2022.

Progrès : les entreprises travaillent au passage à l'échelle des technologies.

Une part significative des technologies vertes nécessaires à la neutralité carbone est encore en cours de développement ou d'adoption et les entreprises jouent un rôle important dans leur passage à l'échelle commerciale. En 2023, 44% des technologies qui contribueront

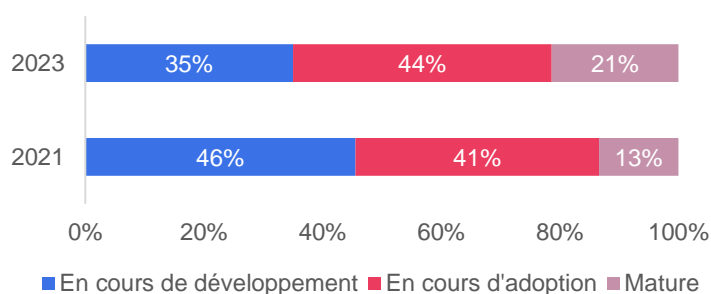
au net zéro en 2050 selon la stratégie de l'AIE sont en cours d'adoption par le marché, 35% en cours de développement (soit à l'état de prototype ou au stade de démonstration) et 21% déjà matures. D'importants progrès ont déjà été réalisés en seulement deux ans, notamment grâce aux investissements des entreprises : en 2021, 46% de ces mêmes technologies étaient encore au stade de prototype ou de démonstration et seulement 13% étaient déjà matures (voir graphique ci-dessous)¹⁷. Un quart des technologies qui étaient encore en développement en 2021 sont donc passées au stade de la commercialisation et un cinquième des technologies qui étaient en cours d'adoption ont atteint la maturité. Les technologies vertes sont également de moins en moins coûteuses et de plus en plus performantes. Selon l'AIE, les coûts d'une sélection de technologies vertes incluant les panneaux photovoltaïques (PV), les éoliennes, les pompes à chaleur et les batteries ont chuté de près de 80% entre 2010 et 2022. En parallèle, la performance de chacune de ces technologies s'est améliorée et les besoins en matière première pour leur fabrication a diminué.

¹⁶ « L'empreinte carbone de la France de 1995 à 2021 », Données et études statistiques pour le changement climatique, l'énergie, l'environnement, le logement, et les transports, consulté le 26 octobre 2023, [https://www.statistiques.developpement-](https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lempreinte-carbone-de-la-france-de-1995-2021)

[durable.gouv.fr/lempreinte-carbone-de-la-france-de-1995-2021](https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lempreinte-carbone-de-la-france-de-1995-2021).

¹⁷ Cozzi et al., « Net Zero Roadmap - A global pathway to keep the 1,5°C Goal in Reach (2023 update) ».

Maturité en 2021 et 2023 des technologies qui contribueront à la réduction des émissions de CO₂ mondiales à horizon 2050, selon la stratégie net zéro de l'AIE.



Source : AIE

Déploiement : les entreprises accélèrent pour s'aligner sur les ambitions mondiales.

Les entreprises ont accéléré le déploiement de leurs technologies ces trois dernières années. D'après l'AIE, le taux de déploiement moyen des technologies vertes a plus que doublé entre 2019 et 2023¹⁸, passant à 20% et alignant l'économie mondiale sur la trajectoire net zéro. Les batteries de véhicules électriques se déploient notamment à un rythme inédit en temps de paix (+70% par an, voir graphique ci-dessous). En toute logique, cette accélération du déploiement des technologies vertes devrait se traduire rapidement par un ralentissement voire une baisse des émissions mondiales de GES.

L'indicateur global que constitue le CTDI ne doit toutefois pas occulter les spécificités régionales et sectorielles. Le déploiement des technologies vertes reste en effet inégalement réparti géographiquement, les progrès majeurs ayant été réalisés dans les pays développés et en Chine. En outre, la situation varie selon la technologie : alors que le déploiement des panneaux photovoltaïques est aligné sur la feuille de route de l'AIE, les annonces de projets concernant l'éolien sont encore très insuffisantes en raison d'une offre qui peine à suivre la demande¹⁹. En France, le développement de l'éolien est également freiné au bout de la chaîne par la réglementation, comme le souligne un récent rapport de la Cour des comptes²⁰.

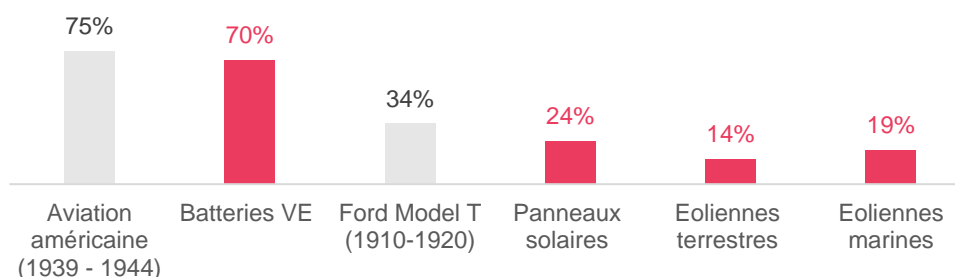
¹⁸ Le degré de déploiement des technologies vertes est mesuré par l'Indice de développement des technologies vertes (CTDI) calculé par l'AIE. Un indice de 100 signifie que l'objectif intermédiaire à horizon 2030 est atteint. L'indice devrait dépasser

le niveau 30 en 2023 d'après l'AIE. Le taux de déploiement moyen présenté dans le texte correspond à la croissance de cet indice. Cozzi et al.

¹⁹ Cozzi et al.

²⁰ « Les soutiens à l'éolien terrestre et maritime ».

Déploiement annuel moyen des technologies vertes entre 2010-2020 comparé à certaines transitions technologiques historiques.



Source : AIE

Note : il s'agit de la croissance annuelle moyenne du déploiement de la technologie sur la période donnée. Le déploiement est mesuré selon la technologie en puissance installée ou en unité.

Investissements : les acteurs privés doivent encore fournir un effort annuel supplémentaire de 32 Mds€ en France.

Les acteurs privés doivent participer à l'intensification des investissements verts en France et dans le monde. Dans le monde, les investissements dans les énergies vertes sont estimés à 1 600 milliards de dollars en 2022²¹. Selon l'AIE, 2 900 milliards de dollars supplémentaires devraient être investis chaque année à horizon 2030 afin de mettre l'économie mondiale sur la trajectoire de la neutralité carbone, soit presque un triplement des investissements²². En France, les investissements verts sont estimés à 84

milliards d'euros en 2021, public et privé confondus²³. Selon France Stratégie, 66 milliards d'euros supplémentaires devraient être investis chaque année à horizon 2030 (dont près de la moitié par les acteurs privés), soit presque un doublement de l'effort d'investissement²⁴. Que ce soit en France ou dans le monde, les investissements verts sont maintenant supérieurs aux investissements fossiles : pour chaque dollar investi dans les énergies fossiles en 2023 dans le monde, 1,8 dollar est investi dans les énergies vertes d'après l'AIE ; et pour chaque euro investi dans le fossile en 2021 en France, 1,4 euro était investi en faveur du climat. Notons que les données françaises et mondiales, outre les ratios, ne sont pas exprimées dans la même devise, ne recouvrent pas le même périmètre et ne sont donc pas comparables.

²¹ Cozzi et al., « Net Zero Roadmap - A global pathway to keep the 1,5°C Goal in Reach (2023 update) ».

²² Cozzi et al.

²³ « Édition 2022 du Panorama des financements climat » (Institute for Climate Economics (I4CE), 13

octobre 2022), <https://www.i4ce.org/publication/edition-2022-panorama-financements-climat/>.

²⁴ Pisani-Ferry et Mahfouz, « Les incidences économiques de l'action pour le climat ».

MÉTHODE : ANALYSER DES TECHNOLOGIES VERTES DÉVELOPPÉES PAR DES ENTREPRISES

Sélection : 6 technologies pouvant contribuer à la lutte contre le changement climatique.

Les technologies étudiées dans cette étude n'ont pour la plupart pas encore atteint la maturité, ont un potentiel d'atténuation ou d'adaptation non négligeable, et sont principalement développées par le secteur privé. Premièrement, Asterès a prêté une attention particulière aux technologies dites « de rupture », dans lesquelles les entreprises doivent encore investir pour les porter à maturité et les déployer à l'échelle. Deuxièmement, Asterès s'est intéressé aux technologies ayant la capacité à contribuer de manière non négligeable à la lutte contre le changement climatique, que ce soit en contribuant à la baisse des émissions carbone ou à l'adaptation à un climat plus chaud. Enfin, Asterès a exclu du champ de son étude les technologies principalement portées par des acteurs publics, comme l'énergie nucléaire. Les six technologies retenues sont l'hydrogène par électrolyse, le captage, stockage et l'utilisation du carbone (CCUS), le recyclage textile, le recyclage plastique, la réutilisation de l'eau et l'application de l'intelligence artificielle au bâtiment. L'étude ne prétend pas à l'exhaustivité et la sélection d'un nombre limité de technologies vise simplement à illustrer le rôle des entreprises dans la résolution de la crise climatique – sans

pour autant sous-estimer le rôle des pouvoirs publics pour rendre possible l'avènement de ces technologies.

Maturité : présentation de l'indicateur « TRL ».

Asterès utilise l'indicateur du TRL pour estimer la maturité des technologies étudiées. Originellement développé par la NASA, le TRL (« *technology readiness level* »), qui peut être traduit comme « niveau de maturité technologique », est une échelle allant de 1 à 9 ou 1 à 11 selon les institutions visant à mesurer la maturité d'une technologie, de la formulation des principes fondamentaux à sa commercialisation. L'échelle utilisée par la Commission européenne, qui évalue le degré de maturité des technologies sur une échelle de 1 à 9, diffère de celle utilisée par l'AIE, qui évalue le degré de maturité des technologies sur une échelle de 1 à 11 (voir tableau ci-dessous). Après analyse, Asterès considère que l'AIE décompose le dernier niveau (TRL 9) en trois niveaux (TRL 9, 10 ou 11). Dans cette étude, Asterès préférera l'échelle de l'AIE pour sa précision accrue. L'échelle de l'AIE capture notamment la maturité économique avec l'introduction de la notion de compétitivité. Les TRLs estimés selon l'échelle de la Commission européenne seront convertis par Asterès le cas échéant.

Différents degrés de maturité (TRL) selon l'échelle de l'AIE.

Stade	TRL	Description
Concept	1	Principes fondamentaux définis
	2	Concept et application formulés
	3	Solutions à prototyper
Premier prototype	4	Prototype en conditions de test
Large prototype	5	Composants éprouvés dans des conditions de déploiement
	6	Prototype éprouvé à échelle dans des conditions de déploiement
Démonstration	7	Prototype fonctionnant dans les conditions attendues
	8	Démonstration commerciale
Début de l'adoption	9	Solution disponible sur le marché, doit encore évoluer pour rester compétitive
	10	Solution commercialisée et compétitive mais devant être mieux intégrée
Mature	11	Croissance prédictible

Mapping : non exhaustif et centré sur le marché français et européen.

Le mapping proposé par Asterès est non-exhaustif et centré principalement sur les acteurs des marchés français et européen. Asterès réalise pour chaque technologie une cartographie qui consiste à identifier les principaux acteurs de l'écosystème et leurs caractéristiques (notamment l'âge de l'entreprise et sa position sur la chaîne de valeur). Pour cette cartographie, Asterès s'appuie sur la littérature existante et les informations disponibles en ligne. Asterès ne prétend pas à l'exhaustivité et une importance particulière est accordée aux acteurs présents sur le marché français ou européen.

Volume : estimation du marché à horizon 2050.

Le volume du marché à horizon 2050 provient, selon la technologie, d'une estimation de la littérature ou de la propre estimation d'Asterès. Pour l'hydrogène et le CCUS, Asterès s'appuie sur le scénario 3 du rapport « Transition(s) 2050 » de l'ADEME²⁵ qui mise sur la technologie pour préserver les modes de vie actuels. Ce scénario a été retenu car en phase avec l'esprit résolument technophile de cette étude. Pour la réutilisation des eaux usées, Asterès s'appuie sur une donnée de Veolia²⁶. Enfin, pour le recyclage (textile et plastique) et les bâtiments intelligents, Asterès réalise ses propres projections. À un horizon aussi lointain que 2050 et dans un domaine aussi important que

²⁵ « Transition(s) 2050 ».

²⁶ « La REUT pour recycler l'eau usée et limiter la consommation d'eau douce », Veolia France,

consulté le 12 octobre 2023, <https://www.veolia.fr/reuse-technologie-maitrisee>.

la transition écologique, les volumes estimés restent particulièrement tributaires des choix de politiques publiques futurs et de la trajectoire décidée collectivement. Les volumes calculés dans cette étude ne doivent donc pas être interprétés comme des prévisions mais comme des scénarios possibles dans des conditions définies. Le choix de présenter le marché en volume plutôt qu'en valeur s'explique par les incertitudes qui demeurent concernant les coûts des technologies à horizon 2050.

Les autres effets bénéfiques potentiels sont mentionnés mais n'ont pu être chiffrés.

Impact environnemental : émissions de CO₂ évitées, efficacité énergétique ou adaptation.

Un impact environnemental est calculé par Asterès le cas échéant. Pour le CCUS et la réutilisation de l'eau, les volumes correspondent aux impacts environnementaux : le volume de CO₂ capté correspond aux émissions évitées et le volume d'eau réutilisé correspond au volume d'eau économisé. Pour les bâtiments intelligents, l'impact est d'abord estimé en termes d'économies d'énergie puis traduit en émissions de GES évitées (en éqCO₂). Pour l'hydrogène et le recyclage (textile et plastique), un impact environnemental en termes d'émissions de GES évitées est calculé. Ces émissions évitées sont rapportées à l'objectif de réduction des émissions françaises à horizon 2050 (324 Mt éqCO₂) quand il s'agit d'émissions évitées en France (hydrogène, CCUS, bâtiments) et à l'empreinte carbone française quand il s'agit d'émissions évitées en majorité dans le reste du monde.

HYDROGÈNE & CAPTAGE CARBONE : POUR CONTINUER À PRODUIRE

Partie 2

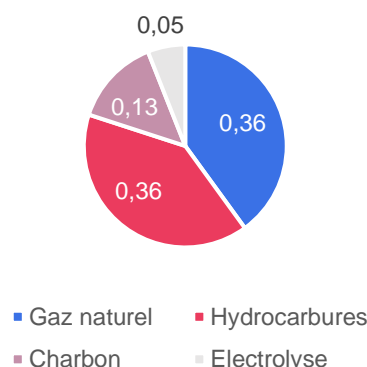
HYDROGÈNE PAR ÉLECTROLYSE : UN NOUVEAU VECTEUR D'ÉNERGIE VERTE

Présentation : un gaz qui n'émet que de l'eau et dont la production peut être décarbonée grâce à l'électrolyse.

L'hydrogène, de sa formule chimique « H₂ », est un gaz dont la combustion n'émet que de l'eau. L'hydrogène pourrait ainsi contribuer à décarboner un grand nombre de secteurs : la mobilité (batterie hydrogène pour les voitures et poids lourds, carburants synthétiques pour l'aviation et le fret maritime), l'industrie (remplacement du gaz dans la production de chaleur et les procédés industriels), ou encore le chauffage résidentiel (en remplacement du gaz). Historiquement, l'hydrogène est produit à partir d'énergies fossiles par des processus très émetteurs en CO₂ (gazéification du charbon, vaporeformage), mais les progrès dans l'électrolyse de l'eau, une technique qui consiste à décomposer les molécules d'eau (H₂O) en deux molécules distinctes (l'oxygène O et l'hydrogène H₂), ont ouvert la perspective d'un hydrogène décarboné ou « vert » (à condition que le mix électrique soit également décarboné). À l'heure actuelle, environ 50 000 tonnes d'hydrogène sont produites par électrolyse en France, ce qui représente 6% de la consommation annuelle

(voir graphique ci-dessous)²⁷. Notons que l'hydrogène existe également à l'état naturel (hydrogène blanc) mais que la connaissance des gisements disponibles est encore limitée.

Production d'hydrogène en France, par procédé (en Mt)



Source : Sia Partners

Note : il s'agit de la production annuelle structurelle, ces données ne correspondent pas à une année précise.

²⁷ Charlotte de Lorgeril, Gautier Laveissière, et Théo Fayolle, « La filière hydrogène-énergie en France » (Sia Partners, février 2020),

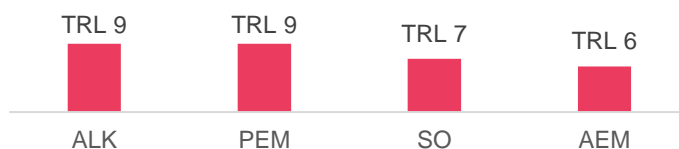
<https://www.sia-partners.com/fr/publications/publications-de-nos-experts/la-filiere-hydrogene-energie-en-france>.

Maturité : les entreprises doivent maintenant améliorer la compétitivité et déployer leurs technologies.

Les technologies d'électrolyse de l'eau développées par les entreprises arrivent à maturité. On distingue quatre technologies de l'électrolyse de l'eau : l'électrolyse alcaline (ALK), l'électrolyse à membrane échangeuse de protons (PEM), l'électrolyse à membrane

échangeuse d'anions (AEM) et l'électrolyse à oxyde solide (SO)²⁸. Les technologies les plus matures sont l'électrolyse ALK et l'électrolyse PEM avec des TRLs (voir 1.3.2) estimés à 9 par l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE)²⁹, ce qui signifie que les technologies commencent à être adoptées mais doivent encore évoluer pour devenir plus compétitives. L'électrolyse AEM et l'électrolyse SO sont des technologies prometteuses toujours en développement, avec des TRLs estimés respectivement à 6 et 7 (voir graphique).

TRL des différentes technologies d'électrolyse de l'eau



Source : AIE

Mapping : présence d'entreprises historiques et de start-ups.

La filière hydrogène est l'occasion pour les acteurs traditionnels de se réinventer et pour de nouvelles entreprises d'émerger. Parmi les acteurs du marché des électrolyseurs on peut citer Siemens et Air Liquide avec la création d'une coentreprise en 2022, ainsi que Nucera, co-entreprise du groupe allemand Thyssenkrupp et du producteur italien de cathodes DeNora. On peut également mentionner l'entreprise française McPhy ou encore l'entreprise britannique Ceres Power,

issue de la recherche universitaire et qui mise sur l'électrolyse SO. En ce qui concerne la production d'hydrogène, on retrouve les acteurs traditionnels, Air Liquide, Linde, TotalEnergies, Engie ou encore EDF avec filiale Lhyfe, et des acteurs spécialisés comme H2V. Enfin, le transport et le stockage de l'hydrogène est généralement géré par les mêmes acteurs que ceux qui le produisent. Notons que l'entreprise McPhy est présente en amont (fabrication d'électrolyseurs) et en aval de la chaîne de valeur (distribution et stockage).

²⁸ Greg De Temmerman et al., « Transitioning towards low-carbon hydrogen production » (Zenon), consulté le 6 octobre 2023,

<https://www.zenonresearch.org/insights/the-hydrogen-series-part-1>.

²⁹ De Temmerman et al.

Fabrication d'équipement

Production et distribution



Les exemples de McPhy, de Nucera, de Ceres Power, de Lhyfe et de GTT

MC PHY est un des acteurs de référence de la production et de la distribution d'électrolyseurs de technologie alcaline sous pression (choisie pour sa flexibilité adaptée aux énergies renouvelables), ainsi que de stations-services hydrogène, principalement à destination des poids lourds. Le groupe a signé 45 MW et 40 stations et a été retenu comme fournisseur favori sur 148 MW et 56 stations. MC PHY a investi dans une usine à Belfort qui devrait atteindre à terme une capacité de production d'électrolyseurs de 1 GW par an.

NUCERA est une joint-venture entre ThyssenKrupp et DeNora qui produit des électrolyseurs Alcaline et Chlore-Alcali de grande puissance, permettant de stocker l'hydrogène produit à partir de sources renouvelables à grande échelle et l'intégrer à des projets industriels. D'importants contrats ont été signés, notamment un contrat de référence avec NEOM, qui cherche à produire plus de 650 tonnes d'hydrogène vert par jour, ce qui requiert une capacité de 2 GW.

CERES POWER est un développeur britannique de piles à combustible à oxyde solide, pour la production d'électricité décentralisée, à base d'hydrogène ou de gaz naturel, afin de décarboner les villes, les usines, ou encore les data centers. CERES propose également des électrolyseurs fonctionnant avec le même procédé. Son modèle de développement consiste à signer des accords de licence, sans investir directement dans les installations.

LHYFE est un producteur et fournisseur d'hydrogène vert et renouvelable, permettant d'éviter des émissions de carbone et de produire ou livrer l'énergie à échelle industrielle à proximité des besoins de l'industrie ou à des fins de mobilité dans des stations-services. Les unités de production sont conçues, installées et opérées par LHYFE ; elles peuvent être onshore, sur site, ou offshore.

GTT a mis en place un système de confinement de type membrane pour l'hydrogène liquéfié et a reçu des approbations pour la conception préliminaire d'un hydrogénier, navire de transport d'hydrogène.

Les informations sur les sociétés cotées ont été rédigées par Arbevel et ne tiennent pas lieu de conseil boursier.

Marché à horizon 2050 : une demande qui pourrait atteindre 2,8 Mt d'hydrogène.

La demande d'hydrogène vert pourrait tripler à horizon 2050 pour atteindre 2,8 Mt, dans un scénario favorisant la « croissance verte ». Cette évolution correspond à un rythme d'adoption entre 2022 et 2050 de 15% par an en moyenne. Bien que les utilisations potentielles de l'hydrogène soient très nombreuses, l'hydrogène est en concurrence avec d'autres technologies pour décarboner l'économie (CCS, batteries électriques, électrification, bioénergies)³⁰. L'arbitrage entre ces différentes technologies doit être réalisé, pour chaque usage, selon les caractéristiques techniques, économiques et environnementales de chacune. Asterès retient le scénario 3 du rapport « Transition(s) 2050 » de l'ADEME³¹, baptisé « technologies vertes », le plus en phase avec l'esprit résolument technophile de cette étude. Dans ce scénario, 38% de l'hydrogène servirait à la production de méthanol, 26% au stockage d'électricité (« *power-to-gas* »), 14% à la production d'acier, 13% à la mobilité, 6% à la

+9%

La part que l'hydrogène représenterait dans la consommation finale d'énergie à horizon 2050.

production d'engrais et 3% à la production d'huile végétale hydrotraitée. Environ la moitié de l'hydrogène consommé serait importé, contrairement à aujourd'hui, et l'hydrogène représenterait 9% de la consommation finale d'énergie.

Impact environnemental à horizon 2050 : 20,1 Mt éqCO₂ évitées.

Le développement de l'hydrogène permettrait d'éviter l'émission de 20,1 Mt éqCO₂ à horizon 2050, soit une contribution pour 6,2% à l'atteinte de la neutralité carbone³². Pour réaliser cette estimation, Asterès fait l'hypothèse que l'hydrogène se substitue au gaz naturel dans l'industrie, aux centrales à gaz pour le *power-to-gas* (la logique étant que le stockage évite le recours à des énergies facilement pilotables), et au diesel dans la mobilité (y compris pour l'huile végétale hydrotraitée). Pour les énergies carbonées, les données sur les émissions carbone sur tout le cycle de vie proviennent de la base carbone de l'ADEME, et d'un article de l'ADEME pour l'hydrogène³³.

-20,1 Mt éqCO₂

Le potentiel de décarbonation de l'hydrogène à horizon 2050.

³⁰ « Hydrogène bas-carbone : quels usages pertinents à moyen terme dans un monde décarboné ? » (Carbone 4, octobre 2022), https://www.carbone4.com/files/Carbone_4_Etu_de_Hydrogene.pdf.

³¹ Les 93,9 TWh estimés par l'ADEME ont été convertis par Asterès sur la base d'une équivalence 1 Mt hydrogène = 33,3 TWh « Transition(s) 2050 ».

³² Pour rappel, les émissions de CO₂ doivent être réduites de 324 Mt d'ici 2050.

³³ « Qu'est-ce que l'hydrogène décarboné exactement ? », ADEME Infos, consulté le 6 octobre 2023, <https://infos.ademe.fr/magazine-avril-2021/dossier/quest-ce-que-lhydrogene-decarbone-exactement/>.

CAPTAGE DU CARBONE : LA SOLUTION POUR LES USINES IMPOSSIBLES À DÉCARBONER

Présentation : capter le CO₂ émis pour le stocker ou le réutiliser.

Le « CCUS » fait référence à un ensemble de technologies visant à capter le carbone dans l'air pour le stocker ou le valoriser. Le carbone peut être capturé en sortie d'usine ou directement dans l'air (on parle de « DAC », pour « *Direct Air Capture* »). Il existe trois techniques pour le captage en sortie d'usine : le captage « postcombustion » en utilisant un solvant pour extraire le CO₂ des fumées industrielles, le captage « précombustion » en décomposant le combustible initial pour ensuite extraire le CO₂ à l'aide d'un solvant et enfin le captage en « oxy-combustion » en réalisant la combustion en présence d'oxygène plutôt qu'à l'air³⁴. Le taux de captage est actuellement d'environ 90% et pourrait à l'avenir se rapprocher de 100%³⁵. Dans le cas du captage atmosphérique, l'air ambiant est entraîné par des ventilateurs et le CO₂ est filtré par un matériau spécifique. Le carbone est ensuite transporté *via* des pipelines jusqu'au lieu où il sera stocké sous forme dense dans des bassins sédimentaires, dans un ancien gisement d'hydrocarbures ou en mer (CCS), ou utilisé comme intrant pour la production d'hydrocarbures ou la carbonatation du béton (CCU). Le CCUS peut

ainsi être utilisé pour décarboner l'industrie et la production d'électricité, tout en poursuivant l'exploitation des sites et centrales actuels. Le CCUS est notamment une alternative à l'électrolyse pour la production d'hydrogène vert (on parle alors d'hydrogène bleu). Enfin, la CCUS peut servir à éliminer le CO₂ de l'air (DAC) pour équilibrer les émissions inévitables ou techniquement difficiles à réduire. En 2022, on comptait une trentaine d'installations dans le monde, pour une capacité de captage de 42,5 Mt de CO₂, et aucune en France – le projet K6, en cours de développement et avec une capacité de captage de 0,8 Mt, devrait être opérationnel en 2028³⁶.

Maturité : les entreprises doivent continuer d'investir dans la compétitivité des technologies, dans la plupart des secteurs

La maturité des technologies de CCUS varie grandement selon l'étape du processus, le secteur d'application et la technologie précise. Pour le transport et le stockage du CO₂, la technologie est mature, avec des TRL de respectivement 10 et 11. Pour le captage,

³⁴ Florence Delprat-Jannaud, « La Capture et Le Stockage Du Carbone, Comment Ça Marche ? », The Conversation, 23 octobre 2022, <http://theconversation.com/la-capture-et-le-stockage-du-carbone-comment-ca-marche-192673>.

³⁵ « Zero-Emission Carbon Capture and Storage in Power Plants Using Higher Capture Rates –

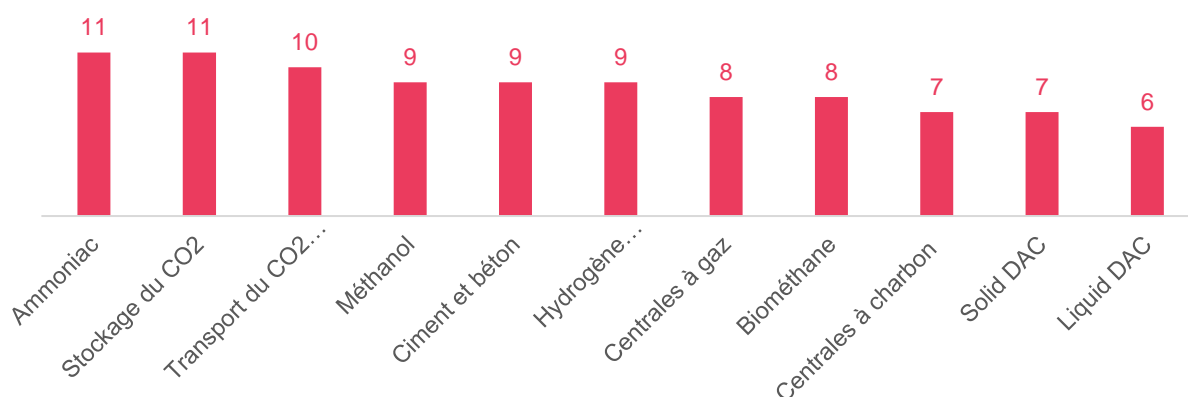
Analysis », AIE, consulté le 9 octobre 2023, <https://www.AIE.org/articles/zero-emission-carbon-capture-and-storage-in-power-plants-using-higher-capture-rates>.

³⁶ Matt Steyn et al., « Global Status of CCS 2022 » (Global CCS Institute, 2022),

le niveau de maturité dépend du secteur et de la technologie précise. La technologie est éprouvée dans le secteur de l'ammoniac, avec un TRL à 11, et commence à être adoptée dans la production de méthanol, de ciment et béton et d'hydrogène, avec des TRLs à 9, et doit donc encore gagner en compétitivité. Dans les

autres secteurs, les technologies les plus avancées sont encore en cours de développement (TRL < 9). Notons que les technologies les plus avancées de capture du CO₂ dans l'air (DAC) sont actuellement au stade de prototype, soit des TRLs 6 à 7.

TRL des CCUS selon l'étape du procédé ou le secteur.



Source : AIE

Note : il existe, pour un même secteur, plusieurs technologies CCUS étudiées. Nous ne considérons ici que la technologie la plus avancée dans les secteurs sélectionnés.

Mapping : des entreprises historiques qui se réinventent et de nouvelles qui émergent.

Comme pour l'hydrogène, le CCUS est l'occasion pour les acteurs traditionnels de se réinventer et pour de nouvelles entreprises d'émerger. Sur le segment du captage, on retrouve des acteurs traditionnels du secteur de l'énergie tels qu'Air Liquide et

TotalEnergies ou ExxonMobil, ainsi que des entreprises spécialisées comme Aker Carbon Capture, Carbon Clean Solutions ou Axens. Le segment du transport et du stockage est entrepris par des groupes spécialisés comme Geostock, Equinor et on retrouve les entreprises présentes sur le captage, Axens et ExxonMobil. En ce qui concerne l'utilisation du CO₂, notons la présence par exemple de LanzaTech, qui transforme le carbone en biocarburant.



L'exemple d'Aker Carbon Capture

AKER CARBON CAPTURE est une société norvégienne qui développe des unités de captage de CO₂. La société a commencé à travailler sur ses solutions dès 2005 pour une commercialisation à partir de 2009. Elle a aujourd'hui un portefeuille de projets à travers l'Europe, majoritairement en Scandinavie, et aux Etats-Unis. L'ensemble de ses projets doivent permettre de capturer 10 Mt de CO₂ par an à horizon 2025. Récemment, la société s'est vu attribuer un projet de CCUS à grande échelle par Orsted, leader mondial des énergies renouvelables. Ce projet va représenter un contrat d'une valeur totale d'environ 200 m€ pour la fourniture d'équipements de captage de carbone.

Les informations sur les sociétés cotées ont été rédigées par Arbevel et ne tiennent pas lieu de conseil boursier.

Marché et impact environnemental à horizon 2050 : Près de 15 MT éqCO₂ captées.

Le volume de CO₂ capté en sortie d'usine pourrait atteindre 14,7 Mt éqCO₂ en 2050 soit une contribution pour 4,5% à l'atteinte de la neutralité carbone, dans un scénario de transition favorable à la « croissance verte ». Cette évolution suppose un rythme de déploiement de 14,1% par an en moyenne à

partir de l'ouverture du premier site en 2028. Malgré son application potentielle à toute l'industrie, le recours au CCUS est limité par les capacités de stockage du CO₂ sur le territoire. Le CCUS est aussi plus ou moins coûteux selon le secteur et pas toujours l'alternative la plus pertinente une fois pris en compte ce facteur

+14% par an

Le rythme de déploiement des technologies CCUS requis à partir de 2028 en France pour atteindre 14,7 Mt de CO₂ capturé en 2050.

économique. En prenant en compte ces facteurs, l'ADEME confine le rôle du CCS dans son scénario « technologies vertes » aux émissions incompressibles liées aux procédés industriels et à la consommation d'énergies fossiles (hauts-fourneaux), qui représentent 10 Mt de CO₂ à horizon 2050³⁷. Le CCU

représenterait dans ce scénario 4,4 Mt de CO₂, notamment avec le développement de la conversion du méthanol en oléfines, une matière utilisée dans les industries plasturgique, pharmaceutique, cosmétique, électronique, aéronautique et textile.³⁸

³⁷ « Transition(s) 2050 ».

³⁸ « Transition(s) 2050 ».

RECYCLAGE : LA MÉTAMORPHOSE DES DÉCHETS EN RESSOURCES

Partie 3

RECYCLAGE TEXTILE FIBRE-À-FIBRE : QUAND LA CHIMIE VALORISE LE FOND DES PLACARDS

Présentation : la conversion des déchets textiles en nouvelles fibres textiles réutilisables.

Le recyclage textile fibre à fibre (« *fiber-to-fiber* ») fait appel à un ensemble de technologies permettant de réutiliser les fibres textiles issues de déchets pour produire de nouveaux textiles. On parle de recyclage en « boucle fermée ». Le recyclage en « boucle ouverte » (pour produire d'autres produits, hors textiles), n'est pas considéré ici. On distingue trois méthodes de recyclage du textile en boucle fermée : le recyclage mécanique utilise la coupe et le broyage pour ramener le textile à l'état de fibres réutilisables, le recyclage thermomécanique

utilise la pression et l'énergie thermique pour faire fondre les textiles synthétiques et les ramener à l'état de polymères et le recyclage chimique qui décompose le textile en polymères ou monomères³⁹. La différence fondamentale entre le recyclage mécanique et le recyclage chimique est que le second peut restaurer la qualité de la matière première, alors que la qualité des fibres obtenues avec le recyclage mécanique est dictée par la qualité des déchets entrants (« *what goes in comes out* »). Ces méthodes sont adaptées à un plus ou moins grand nombre de fibres textiles et offrent des arbitrages différents entre le coût énergétique du recyclage et la qualité de la matière première obtenue (voir tableau ci-dessous). En 2021, 60 990 tonnes de textile ont été recyclées en France, soit 9% des 688 000 tonnes de déchets textiles générés.

³⁹ Notons que le recyclage thermo-chimique, qui transforme les déchets textiles en gaz de synthèse pour l'industrie, n'est pas considéré ici car peu adapté à une application en boucle fermée. Tom Duhoux et al., « Study on the Technical, Regulatory, Economic and Environmental Effectiveness of Textile Fibres Recycling » (Commission européenne, 2021),

<https://data.europa.eu/doi/10.2873/828412>; Saskia Hedrich et al., « Scaling textile recycling in europe - turning waste into value » (McKinsey & Company, 14 juillet 2022), <https://www.mckinsey.com/industries/retail/our-insights/scaling-textile-recycling-in-europe-turning-waste-into-value>.

Principales caractéristiques des trois méthodes de recyclage textile en boucle fermée.

Recyclage	Intensité énergétique	Type de fibres textiles	Dégradation
Mécanique classique	Faible	Toutes	30% à 40%
Mécanique « doux »	-	Toutes	10% à 15%
Thermomécanique	Moyenne	Synthétiques	<30%
Chimique	Élevée	Coton, MMCF, synthétiques	Aucune

Maturité : les entreprises doivent encore passer à l'échelle les techniques non conventionnelles.

Certaines technologies de recyclage textile sont matures et bien installées sur le marché et d'autres sont encore en développement par les entreprises. Le recyclage textile mécanique « classique » est une technologie mature éprouvée commercialement et dont le TRL peut être estimé au niveau 11, soit le niveau maximal⁴⁰. Les nouvelles techniques de recyclage mécanique comme le recyclage mécanique « doux », qui visent à améliorer la qualité des fibres textiles obtenues, sont encore en développement. Leur TRL est ainsi estimé à 7⁴¹. Le recyclage textile thermomécanique était encore au stade de la

démonstration en 2021 selon McKinsey⁴² et aurait dû atteindre la maturité en 2022 ou 2023 selon l'analyse de la Commission européenne⁴³. Asterès considère donc que cette technologie est aujourd'hui au début de son adoption, soit à un TRL 9. Enfin, les technologies de recyclage textile chimiques étaient encore au stade de la démonstration commerciale en 2021 selon McKinsey, alors que la Commission européenne considère que certaines sont déjà matures depuis une décennie (notamment la dépolymérisation des fibres PA6) et que d'autres devraient le devenir d'ici 2023 à 2025 (dépolymérisation des fibres PET et procédés de mise en pâte). Asterès considère donc que le TRL des technologies de recyclage textile chimique est compris entre 7 et 11 selon la technologie.

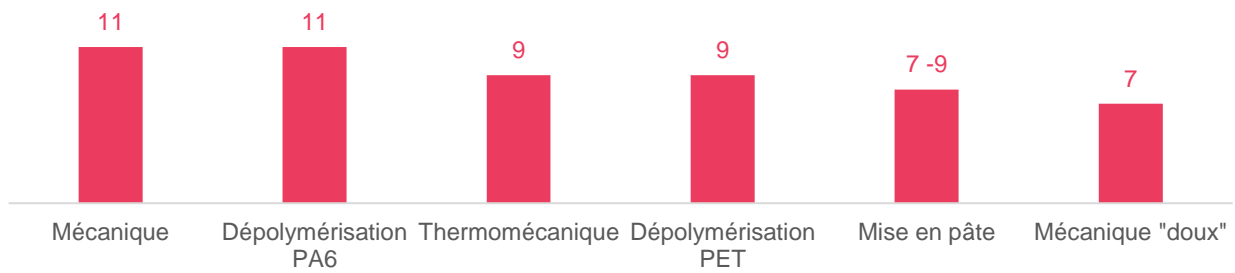
⁴⁰ Estimation d'Asterès d'après la description faite dans Hedrich et al., « Scaling textile recycling in europe - turning waste into value ».

⁴¹ Selon la Commission européenne. Duhoux et al., « Study on the Technical, Regulatory, Economic and Environmental Effectiveness of Textile Fibres Recycling ».

⁴² Hedrich et al., « Scaling textile recycling in europe - turning waste into value ».

⁴³ Duhoux et al., « Study on the Technical, Regulatory, Economic and Environmental Effectiveness of Textile Fibres Recycling ».

TRL des technologies de recyclage textile.



Sources : Commission européenne, McKinsey

Mapping : un effort des entreprises historiques et émergentes.

La plupart des entreprises dans le recyclage textile sont des productrices de fibres ou polymères recyclés et sont les détentrices de la technologie. Certains acteurs sont toutefois spécialisés dans la fabrication d'équipements, comme Cormatex et Dell'Orco & Villani. Parmi tous les acteurs recensés, un seul, Nova Fides, va jusqu'à la production de produits finis à partir des déchets recyclés. Dans le recyclage mécanique, la plupart des entreprises sont des

acteurs traditionnels du textile cherchant à se réinventer, comme notamment Antex, DSTG ou Cormatex. On compte également quelques « jeunes pousses », comme Recover et Purfi qui développent le recyclage mécanique « doux ». De même, dans le recyclage chimique, on trouve de nouveaux acteurs innovants comme Renewcell, Ambercycle ainsi que des acteurs déjà installés depuis plusieurs dizaines d'années qui continuent d'innover, comme Lenzing ou Aquafil.



L'exemple de Renewcell

RENEWCELL est une société suédoise qui développe une solution de recyclage textile-textile. À partir de déchets textiles, la société utilise un procédé chimique pour produire une nouvelle pulpe textile au nom déposé Circulose. La société est un des premiers acteurs innovants du secteur à passer à l'échelle industrielle, avec pour objectif de produire 60 kt de Circulose d'ici 2024, puis 120 kt à horizon 2025 (à comparer à une consommation estimée de 110 Mt de fibre textile par an). La société est soutenue financièrement par H&M qui détient 10% du capital. Elle a réalisé plusieurs collections capsules avec des marques de renom comme Tommy Hilfiger, Filippa K, Zara, ou Levi's. Cette solution permet de répondre aux enjeux et besoins croissants de verdissement de cette industrie qui devrait consommer 25% du budget carbone à horizon 2050, qui est responsable de la majeure partie du rejet des microplastiques dans les océans.

Les informations sur les sociétés cotées ont été rédigées par Arbevel et ne tiennent pas lieu de conseil boursier.

Marché à horizon 2050 : 440 000 tonnes de textile recyclées en boucle fermée.

Le volume de textile recyclé pourrait être multiplié par sept à horizon 2050 pour atteindre 440 000 tonnes. Cette évolution correspond à un rythme de déploiement moyen de 7,3% par an entre 2022 et 2050. Les Français produisent près de 690 000 tonnes de déchets textiles, dont 16% sont réutilisés sur le territoire ou exportés. Seulement 9% sont recyclés et le reste, soit la grande majorité, est incinéré ou éliminé⁴⁴. En faisant l'hypothèse d'une stabilité du volume de déchets produits *par capita*, Asterès a estimé à environ 750 000 tonnes le volume de déchets textiles en 2050. La réutilisation étant prioritaire sur le recyclage, Asterès considère que 84% de ce volume sera disponible pour le recyclage. Asterès considère que 70% du textile disponible pourra être recyclé en boucle

fermée grâce aux technologies présentées⁴⁵. Si on fait l'hypothèse que les déchets aujourd'hui éliminés ou incinérés le sont car en trop mauvais état pour être recyclés, cela signifie que le progrès technologique permettra le recyclage de 374 000 tonnes de déchets textiles supplémentaires d'ici 2050, ce qui représente 85% du volume recyclé total. Dans ce scénario, le textile recyclé représenterait 57% du marché textile en France. Ces estimations reposent sur l'hypothèse d'un taux de collecte de 100%.

Impact environnemental : 9 Mt éqCO₂ évitées et des externalités positives sur l'eau.

La substitution du textile recyclé au textile vierge éviterait l'émission de 8,8 Mt éqCO₂ en 2050, soit 1,5% de l'empreinte carbone des

⁴⁴ Recomposition par Asterès à partir des données de Refashion et l'ADEME. « Rapport d'activité 2021 » (Refashion, s. d.), ; « L'industrie textile dans le monde » (ADEME, s. d.),

https://librairie.ademe.fr/cadic/4367/lrdml_expo_affiche_a2_conception_version_def.pdf.

⁴⁵ Hedrich et al., « Scaling textile recycling in europe - turning waste into value ».

Français en 2022, en plus d'avoir un impact bénéfique sur la consommation et la pollution de l'eau. Une tonne de textile vierge émet en moyenne 26 tonnes d'éqCO₂ sur tout le cycle de vie, d'après un calcul d'Asterès basé sur les données de l'Agence pour l'environnement et de l'ADEME⁴⁶. Comparé à un textile vierge, un textile recyclé émet sur tout le cycle de vie 85% à 95% d'éqCO₂ en moins pour le recyclage mécanique, 80% à 90% d'éqCO₂ en moins pour le recyclage mécanique « doux », 70% à 80% d'éqCO₂ en moins pour le recyclage thermomécanique et 60% à 70% d'éqCO₂ en moins pour le recyclage chimique⁴⁷. Faute d'avoir pu estimer la ventilation par technologie du volume recyclé à horizon 2050, Asterès retient le chiffre médian de - 77,5%, sachant que les technologies applicables aux plus vastes types de fibres sont le recyclage

57%

La part du textile consommé qui pourrait être d'origine recyclée en 2050 si les technologies arrivent à maturité à temps.

mécanique et le recyclage chimique. Au-delà des émissions de GES, le développement du recyclage textile permettrait également de réduire la consommation d'eau (la technologie PurFi affiche par exemple une réduction de 99% de la consommation d'eau par rapport à une fibre synthétique⁴⁸, sachant que la fabrication d'un jean requiert 9 000 litres d'eau⁴⁹) et la pollution de l'eau (l'industrie textile est responsable de 20% de la pollution des eaux industrielles dans le monde⁵⁰ et les textiles synthétiques rejettent 240 000 tonnes de microplastiques⁵¹).

RECYCLAGE PLASTIQUE : VERS UNE REVALORISATION DES DÉCHETS À L'INFINI

Présentation : recycler les déchets plastiques pour produire de nouveaux plastiques moins polluants.

Le recyclage textile plastique en boucle fermée fait appel à un ensemble de technologies permettant de restaurer les

polymères ou monomères issus de déchets pour produire de nouveaux plastiques. Comme pour le recyclage textile, les technologies de recyclage plastique en boucle fermée peuvent être regroupées en trois catégories (mécanique, thermomécanique, et chimique) mais dans le cas du plastique le recours au recyclage thermomécanique semble peu répandu, si bien que l'on oppose généralement le recyclage mécanique au

⁴⁶ « Production et déchets textiles : les impacts sur l'environnement (infographies) | Actualité | Parlement européen », 29 décembre 2020, <https://www.europarl.europa.eu/news/fr/headlines/society/20201208STO93327/production-et-dechets-textiles-les-impacts-sur-l-environnement-infographies> ; « L'industrie textile dans le monde ».

⁴⁷ Hedrich et al., « Scaling textile recycling in europe - turning waste into value ».

⁴⁸ « PurFi - A Circular Fiber Company », PurFi, consulté le 10 octobre 2023, <https://purfiglobal.com>.

⁴⁹ « L'industrie textile dans le monde ».

⁵⁰ « Production et déchets textiles ».

⁵¹ « L'industrie textile dans le monde ».

recyclage chimique. Le recyclage thermomécanique existe également (gazéification, pyrolyse) mais son application en boucle fermée semble limitée⁵². L'enjeu aujourd'hui pour le recyclage plastique est le même que pour le recyclage textile, c'est-à-dire dépasser les limites du recyclage mécanique (la dégradation progressive des polymères⁵³ et l'incapacité à traiter les déchets contaminés ou mixtes) en développant le recyclage chimique, à ceci près que la capacité à traiter les déchets contaminés ou mixtes est primordiale dans le cas des emballages plastiques. En 2020, 391 000 tonnes de plastique ont été recyclées en France, soit 16% des 2,4 Mt de déchets plastiques générés⁵⁴.

Maturité : les entreprises doivent encore faire progresser le recyclage chimique.

Les technologies du recyclage mécanique sont à l'échelle commerciale et les

technologies du recyclage chimique sont encore en développement par les entreprises. Le recyclage mécanique est la technologie la plus mature et la méthode avec laquelle est recyclé la plupart du plastique aujourd'hui. Asterès considère donc que son TRL est compris entre 10 et 11⁵⁵. La maturité du recyclage chimique varie selon la technologie précise. Le TRL de la dissolution serait compris entre 1 et 4 selon plusieurs sources, soit encore au stade de concept⁵⁶, mais d'après les recherches d'Asterès au moins un prototype serait actuellement en activité⁵⁷, ce qui correspond au TRL 7. La dépolymérisation (solvolysé) est la technologie de recyclage chimique du plastique la plus mature. Selon plusieurs sources, le TRL de cette technologie serait situé entre 5 et 7, soit au stade de prototype⁵⁸, mais d'après les recherches d'Asterès certaines entreprises disposent déjà d'une installation de démonstration à l'échelle industrielle⁵⁹, ce qui correspond au TRL 8. En ce qui concerne le recyclage thermomécanique, les technologies sont

⁵² Les hydrocarbures récupérés peuvent certes en partie permettre de produire du nouveau plastique mais également des carburants selon les consultants de Sia Partners. « Economie circulaire : le recyclage chimique des plastiques », 4 octobre 2023, <https://www.sia-partners.com/fr/publications/publications-de-nos-experts/economie-circulaire-le-recyclage-chimique-des-plastiques>.

⁵³ Le plastique serait recyclable jusqu'à sept fois avant que les polymères soient trop dégradés. Martyna Solis et Semida Silveira, « Technologies for chemical recycling of household plastics – A technical review and TRL assessment », *Waste Management* 105 (15 mars 2020): 128-38, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.01.038>.

⁵⁴ Source Eurostat.

⁵⁵ « Economie circulaire »; A. E. Schwarz et al., « Plastic recycling in a circular economy; determining environmental performance through an LCA matrix model approach », *Waste*

Management 121 (15 février 2021): 331-42, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.12.020>.

⁵⁶ « Sustainable Plastics Strategy » (European Technology Platform for Sustainable Chemistry, décembre 2020) ; Schwarz et al., « Plastic recycling in a circular economy; determining environmental performance through an LCA matrix model approach ».

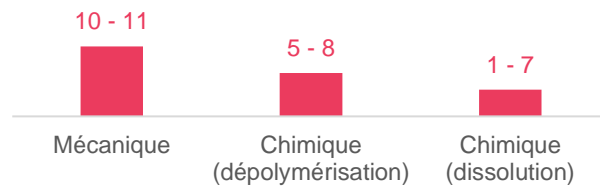
⁵⁷ vnetadmin, « Polystyvert inaugure la toute première usine de recyclage de polystyrène par dissolution au monde », *Polystyvert* (blog), 22 août 2018, <https://polystyvert.com/fr/polystyvert-inaugure-la-toute-premiere-usine-de-recyclage-de-polystyrene-par-dissolution-au-monde/>.

⁵⁸ Schwarz et al., « Plastic recycling in a circular economy; determining environmental performance through an LCA matrix model approach »; « Sustainable Plastics Strategy ».

⁵⁹ « About Overview | Loop Industries », consulté le 11 octobre 2023, <https://www.loopindustries.com/en/about>.

rarement abordées dans la littérature et aucune donnée n'a pu être collectée.

TRL des technologies de recyclage plastique.



Mapping : des entreprises historiques et émergentes qui coopèrent.

Le recyclage mécanique est assuré par les acteurs traditionnels et les start-ups investissent dans le recyclage chimique. Dans le recyclage mécanique, on retrouve les acteurs traditionnels de la gestion de déchets tels que Veolia et Suez ou de l'industrie pétrochimique comme Indorama Ventures ou Borealis. Certains acteurs sont spécialisés dans la fourniture d'équipements, comme Erema – notons que certaines machines mécaniques peuvent également servir à préparer les

déchets pour le recyclage chimique. Les acteurs qui innovent dans les procédés chimiques sont, à la connaissance d'Asterès, généralement des jeunes pousses, comme Loop Industries qui développe une technologie de dépolymérisation ciblant le plastique PET, Ioniqa qui met au point une technique de dépolymérisation magnétique, Carbios qui mise sur la dépolymérisation grâce à des enzymes spécifiques ou encore Polystyvert qui développe une technologie de recyclage du polystyrène par dissolution. Les acteurs « traditionnels » et « innovants » sont généralement amenés à coopérer, comme l'illustrent les partenariats entre Loop Industries et Suez⁶⁰ ou entre Carbios et Indorama Ventures⁶¹.

⁶⁰ « Suez, loop industries et SK Geo Centric annoncent l'implantation en France de l'usine de production de plastiques PET de qualité vierge », consulté le 11 octobre 2023, <https://www.loopindustries.com/cms/suez-loop-industries-et-sk-geo-centric-annoncent-limplantationa-saint-avold-en-france-dans-la->

[region-grand-est-de-lusine-de-production-de-plastiques-pet-de-qualite/?lang=fr](https://www.loopindustries.com/cms/suez-loop-industries-et-sk-geo-centric-annoncent-limplantationa-saint-avold-en-france-dans-la-region-grand-est-de-lusine-de-production-de-plastiques-pet-de-qualite/?lang=fr).

⁶¹ « Carbios et Indorama Ventures confirment leur partenariat pour la construction en France de la première usine de biorecyclage de PET », *Carbios* (blog), 1 juin 2023, <https://www.carbios.com/fr/carbios-et-indorama-ventures-confirment-leur-partenariat/>.

Recyclage mécanique



Recyclage chimique



Les exemples de Carbios et Agilyx.

CARBIOS a mis au point un procédé de bio recyclage du PET, à partir de la découverte d'enzymes agissant sur la molécule, et cherche à devenir le leader mondial du PET recyclé, marché attendu en doublement d'ici 2050. Son modèle économique consiste à licencier la technologie et à partager avec Novozymes des redevances liées à la vente des enzymes, ainsi que des redevances sur les ventes du produit final recyclé par les clients. Une première usine pilote a été construite par le groupe, avec un financement du fabricant de PET Indorama et des subventions de l'État.

AGILYX fait le choix du recyclage chimique par pyrolyse, réduisant le polymère en monomère et peut de ce fait traiter tous les types de plastiques. Un partenariat est en place avec Technip FMC. Son modèle consiste également à prélever des redevances à différents stades (ingénierie, construction, production) en laissant les clients faire les investissements. Une usine est opérationnelle dans l'Oregon, détenue à 50% par AmSty, spécialisée dans le polystyrène avec 3,3 kt par an de production. Une autre est en construction, d'une taille similaire. À travers sa filiale Cyclix, le groupe a entrepris de fédérer l'approvisionnement en plastiques usagés et d'organiser la filière. Exxon a pris 25% du capital de la filiale.

Les informations sur les sociétés cotées ont été rédigées par Arbevel et ne tiennent pas lieu de conseil boursier.

Marché à horizon 2050 : 2,9 Mt de plastique recyclées.

Le volume de plastique recyclé pourrait être multiplié par sept à horizon 2050 pour

atteindre 2,9 Mt. Cette évolution correspond à un rythme de déploiement moyen de 7,4% entre 2022 et 2050. En se basant sur les projections de l'OCDE, Asterès a estimé que la production de déchets plastiques devrait croître de 0,7% par an en France, passant de

2,4 Mt à 2,9 Mt⁶². Contrairement aux vêtements, le plastique ne peut être réutilisé et le recyclage en boucle fermée constitue donc la solution privilégiée pour le traitement des déchets plastiques – les autres alternatives étant l’incinération avec valorisation énergétique ou l’enfouissement. Asterès fait l’hypothèse qu’à horizon 2050 les progrès dans le recyclage chimique rendront possible le recyclage en boucle fermée de tous types de plastiques. Si on fait l’hypothèse que les déchets aujourd’hui enfouis, incinérés ou non traités le sont car en trop mauvais état pour être recyclés, cela signifie que le progrès technologique permettra le recyclage de 2,5 Mt tonnes de déchets plastiques supplémentaires d’ici 2050, ce qui représenterait 84% du volume recyclé total. *In fine*, le plastique recyclé représenterait 51% du plastique utilisé à horizon 2050. Ces estimations reposent sur l’hypothèse d’un taux de collecte de 100%.

51%

La part du plastique consommé qui pourrait être d’origine recyclée en 2050 si les technologies arrivent à maturité à temps.

Impact environnemental à horizon 2050 : près de 3 Mt éqCO₂ évitées et des externalités positives.

La substitution du plastique recyclé au plastique vierge éviterait l’émission de 2,6 Mt éqCO₂ en 2050, soit 0,4% de l’empreinte carbone des Français en 2022. Une tonne de plastique vierge (PET ou PEHD) émet entre 1,3 et 1,5 tonnes d’éqCO₂ sur son cycle de vie, d’après une étude menée par l’ADEME⁶³. D’après cette même étude, le plastique actuellement recyclé en France émet 70% à 89% moins d’éqCO₂ sur tout le cycle de vie que le plastique vierge. L’impact environnemental du recyclage plastique chimique est encore peu connu mais les entreprises les plus à la pointe, comme Loop Industries, affichent des taux de réduction des émissions de GES de l’ordre de 60%⁶⁴, ce qui serait cohérent avec les performances du recyclage chimique dans le textile. En faisant l’hypothèse que la part des déchets actuellement non recyclés correspond à la part qui serait recyclée par des processus chimiques en 2050, alors on peut estimer à 63% l’impact moyen du recyclage plastique à cet horizon. Au-delà de l’empreinte carbone, la meilleure gestion des déchets plastiques permet de lutter contre la pollution terrestre et marine (22 millions de tonnes de plastique ont été rejetées dans l’environnement en 2019, dont 6,1 Mt dans les cours d’eau, les lacs et les océans)⁶⁵.

⁶² « Global plastic waste set to almost triple by 2060, says OECD », consulté le 11 octobre 2023, <https://www.oecd.org/environment/global-plastic-waste-set-to-almost-triple-by-2060.htm>.

⁶³ « Evaluation environnementale du recyclage en France selon la méthodologie de l’analyse de cycle de vie » (ADEME, s. d.), [https://presse.ademe.fr/wp-](https://presse.ademe.fr/wp-content/uploads/2017/05/FEDEREC_ACV-du-Recyclage-en-France-VF.pdf)

[content/uploads/2017/05/FEDEREC_ACV-du-Recyclage-en-France-VF.pdf](https://presse.ademe.fr/wp-content/uploads/2017/05/FEDEREC_ACV-du-Recyclage-en-France-VF.pdf).

⁶⁴ « Environmental Impact | Loop Industries », consulté le 11 octobre 2023, <https://www.loopindustries.com/en/technology/environmental-impact>.

⁶⁵ « Flourish | Data Visualisation & Storytelling », Flourish, consulté le 11 octobre 2023, <https://public.flourish.studio/story/1132728/>.

TRAITEMENT DES EAUX USÉES : DÉPLOYER DES CIRCUITS DE RÉUTILISATION À GRANDE ÉCHELLE

Présentation : filtrer les eaux usées traitées pour les réutiliser.

La réutilisation des eaux usées traitées (REUT) fait appel à diverses technologies de filtrations de l'eau. En France, la quasi-totalité des eaux usées sont rejetées dans le milieu naturel après avoir été traitées. Pour être réutilisées, les eaux usées doivent passer par des étapes de filtration et de désinfection supplémentaires. On distingue trois classes de filtration : la filtration « grossière » sur tamis qui élimine les matières d'une taille comprise entre 10 et 50 micromètres, la filtration granulaire qui élimine les matières comprises entre 1 et 5 micromètres et la filtration membranaire (ou « ultrafiltration ») qui élimine les matières d'une taille comprise entre 20 et 30 nanomètres (dont certains virus et bactéries)⁶⁶. Le choix de la technologie dépend de l'usage qui est ensuite fait de l'eau filtrée. En théorie toutes les eaux usées pourraient être réutilisées pour n'importe quel usage, les technologies les plus à la pointe permettant aujourd'hui d'aller jusqu'à produire de l'eau potable à partir d'eaux usées. Aujourd'hui en France, environ 50 millions de m³ d'eau sont réutilisés chaque

année, soit 0,6% du gisement d'eaux usées traitées, contre 8% en Italie et 14% en Espagne⁶⁷.

Maturité : des technologies éprouvées et des entreprises qui innovent de manière incrémentale.

Les technologies de filtration des eaux usées traitées sont dans l'ensemble parfaitement maîtrisées et les entreprises continuent d'innover pour améliorer leur performance. La filtration membranaire, soit le système le plus poussé des trois systèmes de filtration, est disponible sur le marché depuis le début des années 1980⁶⁸. On peut en conclure que les trois systèmes de filtration de l'eau sont des technologies matures et estimer leur TRL à 11. Les acteurs du secteur continuent cependant d'innover pour proposer des technologies plus performantes et plus efficaces. Les membranes de nanofiltration à fibres creuses (« *hollow fiber nanofiltration* ») constituent par exemple une alternative moins coûteuse, moins énergivore et plus écologique (moindre recours aux produits chimiques) aux membranes de nanofiltration

⁶⁶ « La REUT pour recycler l'eau usée et limiter la consommation d'eau douce ».

⁶⁷ « L'eau en France : ressource et utilisation – Synthèse des connaissances en 2022 », Données et études statistiques pour le changement climatique, l'énergie, l'environnement, le logement, et les transports, consulté le 12 octobre 2023, <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/leau-en-france-ressource-et->

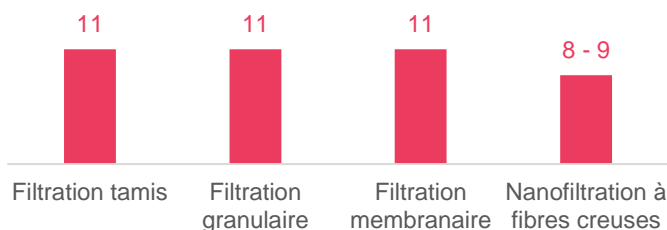
[utilisation-synthese-des-connaissances-en-2022;](#) « La REUT pour recycler l'eau usée et limiter la consommation d'eau douce ».

⁶⁸ Tim Sewerin et al., « Advances and Applications of Hollow Fiber Nanofiltration Membranes: A Review », *Membranes* 11, n° 11 (novembre 2021): 890, <https://doi.org/10.3390/membranes11110890>.

à enroulement en spirale (« *spiral wound nanofiltration* ») ⁶⁹. Cette technologie commence à arriver à maturité, avec une vingtaine de projets pilotes en Europe et au moins cinq installations à l'échelle⁷⁰. Asterès

considère donc que son TRL est compris entre 8 et 9. Il semble donc que l'enjeu pour le développement de la REUT en France se trouve moins du côté de la technologie que des politiques publiques.

TRL d'une sélection de technologies de filtration de l'eau.



Mapping : des entreprises historiques présentes aux côtés de start-ups innovantes.

L'écosystème de la filtration de l'eau se compose d'entreprises historiques et d'entreprises émergentes et innovantes. Les deux principaux acteurs de la filtration de l'eau en France sont Véolia et Suez. D'autres

entreprises, comme Xylem, fournissent des machines et équipements pour le traitement des eaux usées. Parmi les jeunes pousses proposant des solutions innovantes, nous pouvons citer NX Filtration, 3E Memtech, ou encore Pentair X-Flow qui développent des technologies de nanofiltration membranaire à fibres creuses. D'autres entreprises, comme Ekopak, proposent des innovations service (« water-as-a-service »).



⁶⁹ Wendy A. Jonkers, Emile R. Cornelissen, et Wiebe M. de Vos, « Hollow Fiber Nanofiltration: From Lab-Scale Research to Full-Scale Applications », *Journal of Membrane Science* 669 (mars 2023):

121234, <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2022.121234>.

⁷⁰ Jonkers, Cornelissen, et de Vos.

Les exemples d'Ekopak et NX Filtration

EKOPAK fournit sur les sites industriels des unités de retraitement par procédé physico-chimique, biologique, tertiaire ou membranaire (« water-as-a-service »), permettant de traiter les eaux de rejet industriel et les réutiliser en boucle fermée. Les équipements sont assemblés dans des containers, connectés aux installations industrielles des clients.

NX FILTRATION offre des membranes de nanofiltration, d'ultrafiltration et de microfiltration qui permettent des économies d'énergie et de produits chimiques pour recycler les eaux usées pour des usages industriels ou des utilisations d'eau potable.

Les informations sur les sociétés cotées ont été rédigées par Arbevel et ne tiennent pas lieu de conseil boursier.

Marché et impact environnemental à horizon 2050 : 1,6 milliard de m³ d'eaux usées réutilisées et une économie d'eau potable.

19%

La part des eaux usées traitées qui pourraient être réutilisées à horizon 2050.

Le volume d'eaux usées réutilisées pourrait presque tripler d'ici 2050 pour atteindre 1,6 milliard de m³, contribuant à la baisse du stress hydrique. Il s'agit du volume « potentiellement exploitable » selon Véolia⁷¹. Cette évolution implique un rythme de déploiement moyen de 13% par an entre 2022 et 2050. Ce volume d'eaux serait essentiellement réservé au nettoyage des rues et des canalisations des réseaux publics (hydrocurage), au lavage des véhicules, à l'irrigation agricole à la lutte contre les incendies ou encore à l'arrosage des espaces sportifs, et viendrait ainsi se substituer à l'eau potable ou à des prélèvements dans la nature. *In fine*, ce serait 19% des eaux usées traitées

qui seraient réutilisées. Cette économie d'eau serait particulièrement bienvenue dans les périodes de forte sécheresse et pourrait ainsi diminuer le stress hydrique. En effet, si le volume annuel d'eau douce renouvelable et disponible (111 m³) est largement supérieur aux prélèvements annuels (31 m³), c'est généralement lorsque les besoins sont les plus importants que l'apport en eau renouvelable est le plus faible, c'est-à-dire en été⁷². En outre, dans le cas des stations d'épuration situées en bord de mer, la réutilisation des eaux usées évite leur gaspillage en les rejetant dans la mer – ce qui constitue une perte d'eau douce.

⁷¹ « La REUT pour recycler l'eau usée et limiter la consommation d'eau douce ».

⁷² « L'eau en France ».

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE : COLLECTER, ANALYSER, OPTIMISER

Partie 4

DE L'IA DANS TOUS LES BÂTIMENTS : VERS LA FIN DU GRAND GASPILLAGE ÉNERGÉTIQUE ?

Présentation : utiliser l'IA pour optimiser la consommation énergétique des bâtiments.

Couplée aux objets connectés, l'intelligence artificielle (IA) constitue un outil puissant d'efficacité énergétique dans le bâtiment.

L'IA est un algorithme complexe qui étudie un grand nombre d'observations pour découvrir des liens entre les variables. La puissance de cette technologie repose sur sa capacité à étudier un grand nombre de variables et à capturer des relations complexes. Dans le bâtiment, l'IA peut être utilisée pour analyser en temps réel les données internes au bâtiment générées par les compteurs (eau, gaz, électricité, réseaux chaud/froid), les capteurs d'ambiance (température, humidité, occupation, humidité, bruit), ainsi que les données externes pouvant influencer la vie du bâtiment (météo, services publics, trafic). Le système de gestion peut être plus ou moins automatisé : l'IA peut ne constituer qu'un outil au service du gestionnaire de bâtiment, ou assurer une gestion automatisée du bâtiment. Asterès estime que le taux d'adoption de l'IA dans le bâtiment était en 2022 de 12%⁷³. En principe, toutes les propriétés peuvent bénéficier de l'IA en modernisant leur équipement.

⁷³ Accenture prévoit sur la base d'entretiens et du Gartner Global Hype Cycle que le taux d'adoption devrait passer de 5% en 2015 à 30% en 2030 dans

Maturité : les entreprises commencent à conquérir le marché.

L'intelligence artificielle appliquée aux bâtiments est une technologie mature au début de son adoption. De nombreuses entreprises fournissent déjà des services de gestion de bâtiment basés sur l'IA voire une automatisation complète de certaines fonctions. Asterès considère donc que le TRL de cette technologie est compris entre 9 et 11.

Mapping : des entreprises traditionnelles et des acteurs émergents.

L'écosystème de l'IA appliquée aux bâtiments comprend à la fois des entreprises traditionnelles et des acteurs émergents. On distingue au moins trois types d'acteurs sur le marché : les entreprises traditionnelles du secteur de l'énergie et du bâtiment comme EDF (Dalkia), Siemens, Schneider Electric, Vinci, John Controls, ABB ou encore Legrand qui élargissent leurs offres pour inclure des solutions basées sur l'IA, les fabricants de machines et équipements industriels comme HMS Networks qui se développent dans la communication des bâtiments et enfin les

les pays de l'OCDE. « #SMARTer2030 - ICT solutions for 21st century challenges » (Accenture Strategy, s. d.)

acteurs émergents comme Metron, iQspot, Deepki, Wattsense, Dabbel ou BrainBox AI.



Marché à horizon 2050 : près de 4 100 millions de m² de surface.

Asterès estime que la surface totale des bâtiments utilisant l'IA pourrait être multipliée par huit d'ici 2050, pour atteindre environ 4 100 millions de m². Cette évolution suggère un rythme d'adoption moyen de 8% par an entre 2022 et 2050. D'après le scénario 3 de l'ADEME, le parc de logement en 2050 serait composé de 34 millions de résidences principales (représentant environ 3 091 millions de m²⁷⁴) et d'un parc tertiaire de 999 millions de m² de surface chauffée⁷⁵. Les résidences secondaires ne sont pas prises en compte dans ce calcul. Étant donné le taux d'adoption actuel, il reste à convertir en bâtiments intelligents 88% du parc, ce qui représente plus de 3 600 millions de m² de surface.

⁷⁴ Dans l'hypothèse où la surface moyenne d'un logement en France est de 90,2 m² (source Insee)
⁷⁵ « Transition(s) 2050 ».

Impact environnemental : économie de 96 TWh d'énergie et 1,7 MT éqCO₂.

L'adoption de l'IA par toutes les résidences principales et bâtiments commerciaux permettrait d'économiser 96 TWh d'énergie, évitant l'émission de 1,7 Mt éqCO₂ et contribuant pour 0,5% à la neutralité carbone. Les économies d'énergie réalisées grâce à l'IA varient selon le bâtiment et les offres du marché. D'après une méta-analyse, les économies d'énergie permises par l'intelligence artificielle peuvent aller de 7% à

37%

Contribution potentielle de l'IA aux économies d'énergie dans le bâtiment à horizon 2050.

68%⁷⁶, et certains acteurs du marché

⁷⁶ Da-sheng Lee, Yan-Tang Chen, et Shih-Lung Chao, « Universal workflow of artificial intelligence for energy saving », *Energy Reports* 8 (1 novembre

rapportent des économies d'énergie comprises entre 15% et 40%⁷⁷. Pour cette analyse, Asterès a retenu les résultats obtenus par l'entreprise française iQspot, soit des économies d'énergie de 16%⁷⁸. Ce chiffre a été retenu car ces résultats peuvent être obtenus « sans travaux » et sont donc les plus susceptibles d'être universalisables à l'ensemble du parc français. Dans cette hypothèse, la technologie contribuerait pour

37% aux économies d'énergies réalisées entre 2023 et 2050 dans le bâtiment. Les émissions de GES évitées ont ensuite été calculées en faisant l'hypothèse que l'énergie serait autrement d'origine électrique en se basant sur une empreinte carbone du mix électrique à horizon 2050 de 18 kgéqCO₂/MWh⁷⁹.

L'exemple de Kayrros

KAYRROS propose aux régulateurs, investisseurs et entreprises d'accéder à des mesures indépendantes d'émissions de gaz à effet de serre, sur l'ensemble des chaînes d'approvisionnement en énergie, sur toute la planète, à partir d'images satellites et d'IA. Les régulateurs peuvent surveiller les pollueurs de manière indépendante, les investisseurs comparer l'empreinte des différents opérateurs, et les entreprises contrôler leurs émissions directes et indirectes sur l'ensemble de leurs chaînes d'approvisionnement. Les mesures de Kayrros, fondées sur des méthodes rigoureusement scientifiques, sont un élément clé du cadre de l'ONU Integrity Matters Framework.

Les informations sur les sociétés cotées ont été rédigées par Arbevel et ne tiennent pas lieu de conseil boursier.

2022); 1602-33,
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.12.066>.

⁷⁷ « Décarbonisez et optimisez vos bâtiments grâce à l'IA pour les CVC », consulté le 13 octobre 2023, <https://brainboxai.com/fr/>.

⁷⁸ « iQspot • La valorisation immobilière par l'efficacité énergétique temps-réel », iQspot, consulté le 13 octobre 2023, <https://iqspot.fr/>.

⁷⁹ Estimation d'Asterès à partir des scénarios de RTE sur le mix électrique à horizon 2050.

BIBLIOGRAPHIE

« About Overview | Loop Industries ». Consulté le 11 octobre 2023. <https://www.loopindustries.com/en/about>.

« Acter l'urgence - engager les moyens ». Haut Conseil pour le Climat, juin 2023.

ADEME Infos. « Qu'est-ce que l'hydrogène décarboné exactement ? » Consulté le 6 octobre 2023. <https://infos.ademe.fr/magazine-avril-2021/dossier/quest-ce-que-lhydrogene-decarbone-exactement/>.

Calvin, Katherine, Dipak Dasgupta, Gerhard Krinner, Aditi Mukherji, Peter W. Thorne, Christopher Trisos, José Romero, et al. « IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (Eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. » First. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 25 juillet 2023. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.

Carbios. « Carbios et Indorama Ventures confirment leur partenariat pour la construction en France de la première usine de biorecyclage de PET », 1 juin 2023. <https://www.carbios.com/fr/carbios-et-indorama-ventures-confirment-leur-partenariat/>.

Change, NASA Global Climate. « Carbon Dioxide Concentration | NASA Global Climate Change ». Climate Change: Vital Signs of the Planet. Consulté le 19 octobre 2023. <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide>.

Cozzi, Laura, Timur Gül, Araceli Fernandez, et Thomas Spencer. « Net Zero Roadmap - A global pathway to keep the 1,5°C Goal in Reach (2023 update) ». Agence internationale de l'Energie, septembre 2023. <https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-0c-goal-in-reach>.

De Temmerman, Greg, Thomas Boigontier, Julien Lamarque-Lacoste, Manon de la Motte Saint Pierre, et Anouck Dubois. « Transitioning towards low-carbon hydrogen production ». Zenon. Consulté le 6 octobre 2023. <https://www.zenonresearch.org/insights/the-hydrogen-series-part-1>.

« Décarbonisez et optimisez vos bâtiments grâce à l'IA pour les CVC ». Consulté le 13 octobre 2023. <https://brainboxai.com/fr/>.

Delprat-Jannaud, Florence. « La Capture et Le Stockage Du Carbone, Comment Ça Marche ? » The Conversation, 23 octobre 2022. <http://theconversation.com/la-capture-et-le-stockage-du-carbone-comment-ca-marche-192673>.

Données et études statistiques pour le changement climatique, l'énergie, l'environnement, le logement, et les transports. « L'eau en France : ressource et utilisation – Synthèse des connaissances en 2022 ». Consulté le 12 octobre 2023. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/leau-en-france-ressource-et-utilisation-synthese-des-connaissances-en-2022>.

Données et études statistiques pour le changement climatique, l'énergie, l'environnement, le logement, et les transports. « L'empreinte carbone de la France de 1995 à 2021 ». Consulté le 26 octobre 2023. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lempreinte-carbone-de-la-france-de-1995-2021>.

Duhoux, Tom, Edwin Maes, Martin Hirschnitz-Garbers, Karolien Peeters, et Maarten Christis. « Study on the Technical, Regulatory, Economic and Environmental Effectiveness of Textile Fibres Recycling ». Commission européenne, 2021. <https://data.europa.eu/doi/10.2873/828412>.

« Economie circulaire : le recyclage chimique des plastiques », 4 octobre 2023. <https://www.sia-partners.com/fr/publications/publications-de-nos-experts/economie-circulaire-le-recyclage-chimique-des-plastiques>.

« Édition 2022 du Panorama des financements climat ». Institute for Climate Economics (I4CE), 13 octobre 2022. <https://www.i4ce.org/publication/edition-2022-panorama-financements-climat/>.

« Environmental Impact | Loop Industries ». Consulté le 11 octobre 2023. <https://www.loopindustries.com/en/technology/environmental-impact>.

« Evaluation environnementale du recyclage en France selon la méthodologie de l'analyse de cycle de vie ». ADEME, s. d. https://presse.ademe.fr/wp-content/uploads/2017/05/FEDEREC_ACV-du-Recyclage-en-France-VF.pdf.

Flourish. « Flourish | Data Visualisation & Storytelling ». Consulté le 11 octobre 2023. <https://public.flourish.studio/story/1132728/>.

« Global plastic waste set to almost triple by 2060, says OECD ». Consulté le 11 octobre 2023. <https://www.oecd.org/environment/global-plastic-waste-set-to-almost-triple-by-2060.htm>.

Hedrich, Saskia, Jonathan Janmark, Nikolai Langguth, Karl-Hendrik Agnus, et Moa Strand. « Scaling textile recycling in europe - turning waste into value ». McKinsey & Company, 14 juillet 2022. <https://www.mckinsey.com/industries/retail/our-insights/scaling-textile-recycling-in-europe-turning-waste-into-value>.

« Hydrogène bas-carbone : quels usages pertinents à moyen terme dans un monde décarboné ? » Carbone 4, octobre 2022. https://www.carbone4.com/files/Carbone_4_Etude_Hydrogene.pdf.

IEA. « Zero-Emission Carbon Capture and Storage in Power Plants Using Higher Capture Rates – Analysis ». Consulté le 9 octobre 2023. <https://www.iea.org/articles/zero-emission-carbon-capture-and-storage-in-power-plants-using-higher-capture-rates>.

iQspot. « iQspot • La valorisation immobilière par l'efficacité énergétique temps-réel ». Consulté le 13 octobre 2023. <https://iqspot.fr/>.

Jonkers, Wendy A., Emile R. Cornelissen, et Wiebe M. de Vos. « Hollow Fiber Nanofiltration: From Lab-Scale Research to Full-Scale Applications ». *Journal of Membrane Science* 669 (mars 2023): 121234. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2022.121234>.

Klimaat | Climat. « Effet de serre ». Consulté le 19 octobre 2023. <https://climat.be/changements-climatiques/causes/effet-de-serre>.

Klimaat | Climat. « Gaz à effet de serre ». Consulté le 19 octobre 2023. <https://climat.be/changements-climatiques/causes/gaz-a-effet-de-serre>.

Lee, Da-sheng, Yan-Tang Chen, et Shih-Lung Chao. « Universal workflow of artificial intelligence for energy saving ». *Energy Reports* 8 (1 novembre 2022): 1602-33. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.12.066>.

« Les soutiens à l'éolien terrestre et maritime ». Cour des comptes, 17 octobre 2023. <https://www.ccomptes.fr/fr/publications/les-soutiens-leolien-terrestre-et-maritime>.

« L'industrie textile dans le monde ». ADEME, s. d. https://librairie.ademe.fr/cadic/4367/lrdml_expo_affiche_a2_conception_version_def.pdf.

Lorgeril, Charlotte de, Gautier Laveissière, et Théo Fayolle. « La filière hydrogène-énergie en France ». Sia Partners, février 2020. <https://www.sia-partners.com/fr/publications/publications-de-nos-experts/la-filiere-hydrogene-energie-en-france>.

Pisani-Ferry, Jean, et Selma Mahfouz. « Les incidences économiques de l'action pour le climat ». France Stratégie, mai 2023. <https://www.strategie.gouv.fr/publications/incidences-economiques-de-laction-climat>.

« Production et déchets textiles : les impacts sur l'environnement (infographies) | Actualité | Parlement européen », 29 décembre 2020. <https://www.europarl.europa.eu/news/fr/headlines/society/20201208STO93327/production-et-dechets-textiles-les-impacts-sur-l-environnement-infographies>.

PurFi. « PurFi - A Circular Fiber Company ». Consulté le 10 octobre 2023. <https://purfiglobal.com>.

« Rapport d'activité 2021 ». Refashion, s. d.

Ritchie, Hannah, Pablo Rosado, et Max Roser. « Greenhouse gas emissions ». *Our World in Data*, 28 septembre 2023. <https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions>.

Schwarz, A. E., T. N. Ligthart, D. Godoi Bizarro, P. De Wild, B. Vreugdenhil, et T. van Harmelen. « Plastic recycling in a circular economy; determining environmental performance through an LCA matrix model approach ». *Waste Management* 121 (15 février 2021): 331-42. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.12.020>.

Sewerin, Tim, Maria G. Elshof, Sonia Matencio, Marcel Boerrigter, Jimmy Yu, et Joris de Grooth. « Advances and Applications of Hollow Fiber Nanofiltration Membranes: A Review ». *Membranes* 11, n° 11 (novembre 2021): 890. <https://doi.org/10.3390/membranes11110890>.

« #SMARTer2030 - ICT solutions for 21st century challenges ». Accenture Strategy, s. d.

Solis, Martyna, et Semida Silveira. « Technologies for chemical recycling of household plastics – A technical review and TRL assessment ». *Waste Management* 105 (15 mars 2020): 128-38. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.01.038>.

Steyn, Matt, Jessica Oglesby, Turan Guloren, Alex Zapantis, et Ruth Gebremedhin. « Global Status of CCS 2022 ». Global CCS Institute, 2022.

« Stratégie nationale bas-carbone - la transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone ». Ministère de la Transition écologique et solidaire, mars 2020. <https://www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc>.

« Suez, loop industries et SK Geo Centric annoncent l'implantation en France de l'usine de production de plastiques PET de qualité vierge ». Consulté le 11 octobre 2023. <https://www.loopindustries.com/cms/suez-loop-industries-et-sk-geo-centric-annoncent-limplantation-saint-avold-en-france-dans-la-region-grand-est-de-lusine-de-production-de-plastiques-pet-de-qualite/?lang=fr>.

« Sustainable Plastics Strategy ». European Technology Platform for Sustainable Chemistry, décembre 2020.

The Shift Project. « Crise(s), climat : plan de transformation de l'économie française ». Consulté le 19 octobre 2023. <https://theshiftproject.org/crises-climat-plan-de-transformation-de-leconomie-francaise/>.

« Transition(s) 2050 ». ADEME, 2021. <https://www.ademe.fr/les-futurs-en-transition/>.

Veolia France. « La REUT pour recycler l'eau usée et limiter la consommation d'eau douce ». Consulté le 12 octobre 2023. <https://www.veolia.fr/reuse-technologie-maitrisee>.

vnetadmin. « Polystyvert inaugure la toute première usine de recyclage de polystyrène par dissolution au monde ». *Polystyvert* (blog), 22 août 2018. <https://polystyvert.com/fr/polystyvert-inaugure-la-toute-premiere-usine-de-recyclage-de-polystyrene-par-dissolution-au-monde/>.

ASTERES ETUDES & CONSEIL

81 rue Réaumur,

75002 PARIS 01 44 76 89 16

contact@asteres.fr