

# Les matériaux de la transition énergétique : les attentes et les défis

*Jean-Paul Moulin est le directeur scientifique d'Arkema<sup>1</sup>, une entreprise par excellence de la chimie. Il nous explique comment les recherches sur les matériaux d'Arkema vont permettre aux industriels, et donc à notre société, d'avancer dans la transition énergétique et vers une société plus sobre en carbone.*

Les entreprises – et en premier lieu les grands groupes industriels – sont appelées à jouer un rôle majeur dans la transition énergétique et l'évolution vers des modes de production plus économes en ressources. C'est particulièrement vrai dans le domaine de la chimie, qui fournit les matières indispensables à tous les secteurs industriels en aval. Dans cette optique, Arkema va bien au-delà des exigences réglementaires et se fixe des objectifs volontaristes afin d'agir en industriel responsable, cultiver un dialogue ouvert et de proximité, et offrir des solutions durables portées par l'innovation.

Ainsi, le groupe Arkema met l'innovation durable au cœur de sa stratégie de croissance depuis sa création. Les cinq plateformes d'innovation, que sont l'allègement et le design des matériaux, les solutions pour l'électronique, les énergies nouvelles, la performance et l'isolation de l'habitat et la gestion des ressources naturelles, portent cette dynamique.

Depuis 2018, une démarche d'évaluation systématique du portefeuille de vente au regard de sa contribution aux Objectifs de Développement Durable de l'ONU a été mise en œuvre. Sur la base d'un taux de 50 % à fin 2020, l'objectif est d'atteindre

1. [www.arkema.com/france/fr](http://www.arkema.com/france/fr)

65 % des ventes à impact positif d'ici à 2030, et pour atteindre cet objectif stratégique, Arkema met en place des actions volontaires sur trois leviers principaux que sont l'amélioration continue des solutions, l'innovation durable portant sur les produits et les applications, ainsi que la promotion active des solutions à impacts positifs.

Dans cet esprit, les matériaux et solutions techniques développés pour répondre aux besoins de la transition énergétique doivent contribuer doublement en minimisant les émissions et l'utilisation de ressources rares dans leur conception et leur élaboration tout en ayant un impact positif dans leurs usages et leur fin de vie.

## 1 La transition énergétique

Afin de tendre vers une économie neutre en carbone, une transition rapide vers de nouveaux systèmes énergétiques est nécessaire. Cette transition va transformer

radicalement les modes de production, de distribution, de stockage et de consommation de l'énergie. Cela nécessitera une production d'électricité peu émettrice de CO<sub>2</sub>, une efficacité énergétique accrue et une décarbonation des transports, des bâtiments et de l'industrie.

L'Europe propose ainsi une stratégie portant à 60 GW la puissance éolienne offshore en 2030 contre 12 GW aujourd'hui, et 300 GW en 2050<sup>2</sup> (Figure 1).

On notera, parallèlement à l'augmentation de la capacité installée, l'augmentation de la puissance moyenne des éoliennes offshore, au-delà de 10 MW dès 2030, ce qui entraîne une augmentation de la taille des pales, qui atteignent plus de 100 mètres, avec des exigences en termes de production et de recyclage en fin de vie de ces immenses structures en matériaux composites.

2. European Commission, « An EU strategy to harness the potential of offshore renewable energy for a climate neutral future », 19/11/2020.

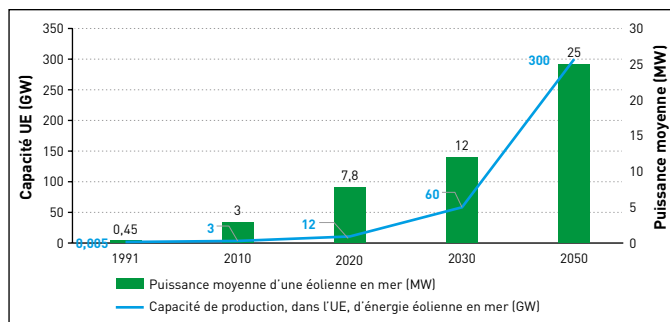


Figure 1

Stratégie de l'Union européenne sur les énergies renouvelables en mer. Vers 300 GW en 2050.

Par ailleurs, l'initiative commune « *Fuell Cell and Hydrogen Joint Undertaking* » (FCH JU) a publié sa feuille de route en janvier 2019 visant à produire 3,7 millions de voitures particulières à hydrogène, 500 000 utilitaires légers et 45 000 poids lourds et bus hydrogène d'ici à 2030<sup>3</sup>.

On voit, à travers ces deux exemples, que les énergies renouvelables (éoliennes et photovoltaïques), les batteries et l'hydrogène sont appelés à jouer un rôle de premier plan. Enfin, l'efficacité énergétique est bien évidemment un élément clé de cette transition.

L'isolation thermique, mais aussi la réutilisation de chaleur résiduelle locale dans des systèmes énergétiques intégrés

contribuent à la décarbonation de nos modes de vie et de nos industries.

## 2 Besoins et attentes pour les matériaux dans la transition énergétique

Ces objectifs ambitieux se traduisent par des attentes élevées en termes de performances techniques, économiques et de capacités d'industrialisation pour les équipements de production, de transport, de stockage et d'utilisation de l'énergie, et donc pour les matériaux mis en œuvre dans ces équipements.

D'ores et déjà, de nombreuses solutions matériaux sont développées pour répondre aux enjeux de la transition énergétique (Figure 2). Néanmoins, il est nécessaire d'aller encore plus loin dans l'analyse des besoins pour anticiper les changements rapides à l'œuvre et comment répondre

3. ADEME, Luc Bondineau. Prestataires : SPHERA, Cécile Querleu, Alexander Stoffregen ; GINGKO 21, Hélène Teulon, Analyse du Cycle de Vie relative à l'Hydrogène – Production d'Hydrogène et Usage en Mobilité Légère, septembre 2020.

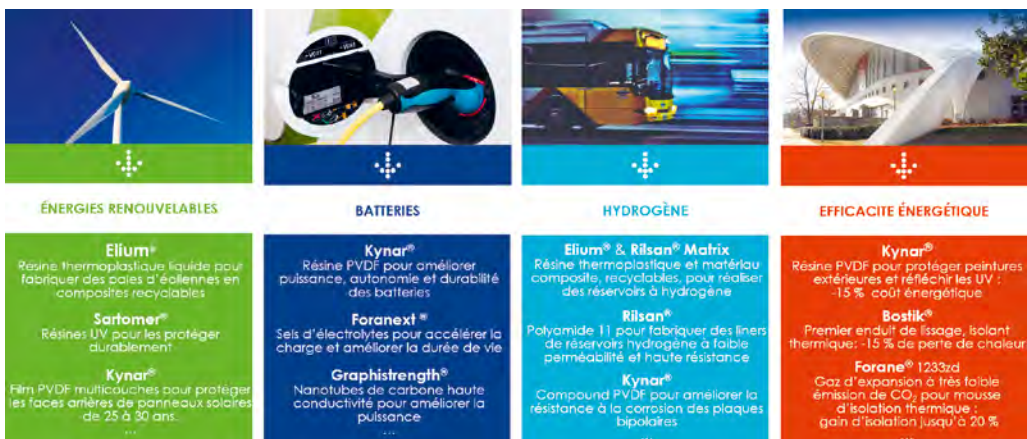


Figure 2

Les solutions matériaux pour la transition énergétique.

à des demandes en évolution permanente.

Comme souvent, dans le développement de nouveaux matériaux, le problème à résoudre est multifactoriel. En effet, il s'agit d'identifier les meilleures réponses à un faisceau de contraintes qui relèvent du cahier des charges technique mais aussi des réglementations, de l'équilibre économique, du niveau de maturité et des délais de mise sur le marché, et enfin de l'ensemble du cycle de vie. Un outil pratique couramment utilisé est le traditionnel triptyque QCD, « Qualité-Coût-Délais », qu'on complète souvent d'un bilan masse et recyclabilité ou cycle de vie pour juger de la pertinence d'une solution matériau proposée (Figure 3).

En termes de qualité et de performance matériau, les performances et exigences dépassent la traditionnelle amélioration continue attendue sur des fonctions établies. En effet, les dimensions, mais aussi les niveaux de pression, de température ou de conditions d'oxydation et vieillissement des applications liées aux nouveaux vecteurs

d'énergie sont souvent sans équivalent dans les systèmes énergétiques traditionnels.

Pour autant, les coûts doivent être maîtrisés afin de garantir un coût total à l'usage (le TCO, « Total Cost of Ownership ») comparable aux solutions existantes afin de permettre un accès le plus large possible à ces nouvelles solutions et donc des économies d'échelle pour un impact environnemental élevé.

En termes de délais, l'urgence climatique et la compétition mondiale accélèrent les besoins et conduisent à une montée en volume rapide sur des technologies en développement. 2030-2035 semble être l'horizon pour amener les nouvelles technologies de la transition énergétiques à un niveau de maturité permettant une large adoption.

Pour la mobilité, la maîtrise de la masse des véhicules ou des aéronefs est une condition nécessaire à la frugalité en énergie et ainsi pour limiter la taille, la masse et le coût des batteries, réservoirs et autres équipements embarqués nécessaires.

Enfin, au-delà du coût à l'usage, l'analyse du cycle de vie permet d'avoir une véritable évaluation du coût environnemental afin de tendre vers la neutralité en maximisant les possibilités de réemploi, de recyclage et d'usage de matériaux à faible empreinte.

Dans cette approche, certaines exigences peuvent paraître antagonistes. Néanmoins, nous allons voir à travers quelques exemples les possibilités de concilier les demandes et trouver des compromis pour atteindre les objectifs.

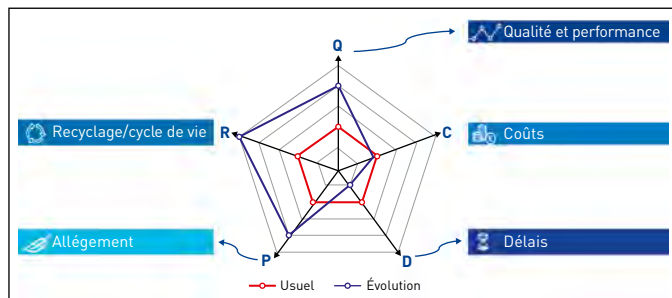


Figure 3

Diagramme QCD complété des axes poids-recyclabilité exprimant l'évolution nécessaire des matériaux adaptés à la transition énergétique.

### 3 Concilier performances techniques et économiques

L'utilisation de fibres de carbone de hautes performances est nécessaire pour réaliser des réservoirs d'hydrogène comprimés à 700 bars à un niveau de masse acceptable pour être embarqués à bord de véhicules comme les Toyota Mirai ou Hyundai Nexo. Néanmoins, comme le montrent diverses études menées par le « Department Of Energy » américain (DOE)<sup>4</sup> le coût de la fibre de carbone peut représenter de 50 à 70 % du coût du réservoir.

Des solutions sont développées où l'on maximise l'efficacité de la fibre de carbone bobinée pour la fabrication du réservoir en l'associant à une nouvelle résine thermoplastique polyphthalamide Rilsan®Matrix (Figure 4).

4. « Impact of lightweight design on energy consumption and cost effectiveness of alternative powertrain concepts », Martin Redelbach, Matthias Klötzke, Horst E. Friedrich ; Institute of Vehicle Concepts, German Aerospace Center (DLR), Stuttgart, Germany, Martin.Redelbach@dlr.de.

Une amélioration de la résistance à la rupture du ruban de 30 % est obtenue en améliorant le couple fibre/matrice et permet d'utiliser 20 à 25 % de fibres de carbone en moins pour la fabrication d'un réservoir permettant *in fine* de réduire son coût : moins de fibres, moins de temps de bobinage et élimination des étapes de cuisson des résines thermodurcissables utilisées traditionnellement. Par ailleurs, l'utilisation d'une matrice thermoplastique facilitera le recyclage du réservoir en fin de vie.

### 4 Accélérer l'adoption des nouveaux matériaux

Un des enjeux majeurs de la transition énergétique en cours est d'atteindre rapidement des niveaux élevés d'industrialisation et d'usage des nouvelles technologies afin d'en maximiser l'impact. Aussi, disposer de matériaux composites thermoplastiques recyclables est nécessaire pour la réalisation de nombreux éléments où la performance mécanique

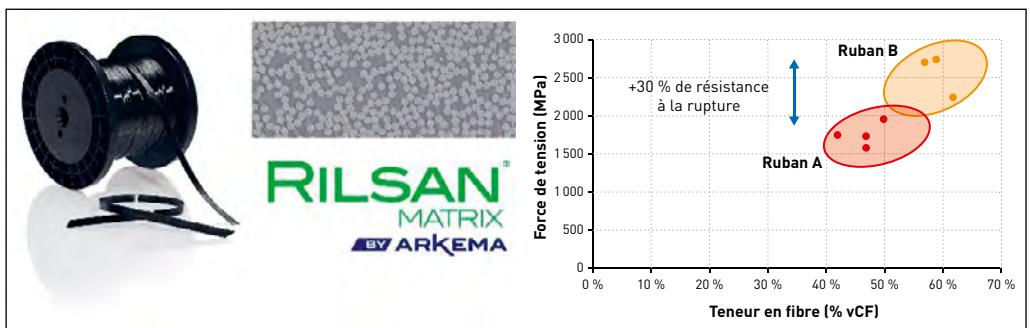


Figure 4

Rubans (tapes) fibres de carbone imprégnées Rilsan®Matrix et améliorations en contraintes à la rupture.

des matériaux composites est requise.

Les résines thermoplastiques liquides Elium® développés par Arkema permettent de substituer des résines thermodurcissables dans de nombreuses applications, mais plus encore, ouvrent la voie à des propriétés inédites et des procédés de transformation complémentaires comme la soudure ou le thermo-estampage. D'ores et déjà, Elium® est accessible pour des procédés d'infusion (pales d'éoliennes), de moulage type SMC ou RTM (boîtiers batteries), de pultrusion (profilés structurels, renforts pour béton...) ou d'enroulement filamentaire (avec initiation UV pour réservoirs sous pression) (Figure 5).

Cette adaptation à une large gamme de procédés de transformation ayant fait leurs preuves permet de réduire

les délais d'adoption et de formation nécessaires à l'utilisation de ces nouveaux matériaux composites recyclables, mais permet également d'utiliser des moyens capacitaires existants pour réduire les investissements.

## 5 Alléger pour une meilleure efficacité énergétique

L'effet de la masse sur la consommation des véhicules automobile a été très étudié ces dernières années. Une étude du DLR allemand de 2012<sup>5</sup> souligne déjà la meilleure efficacité des véhicules électriques par rapport aux véhicules thermiques diminuant l'impact du gain de masse sur la consommation.

5. <https://www.bloomberg.com/news/features/2020-02-05/wind-turbine-blades-can-t-be-recycled-so-they-re-piling-up-in-landfills>

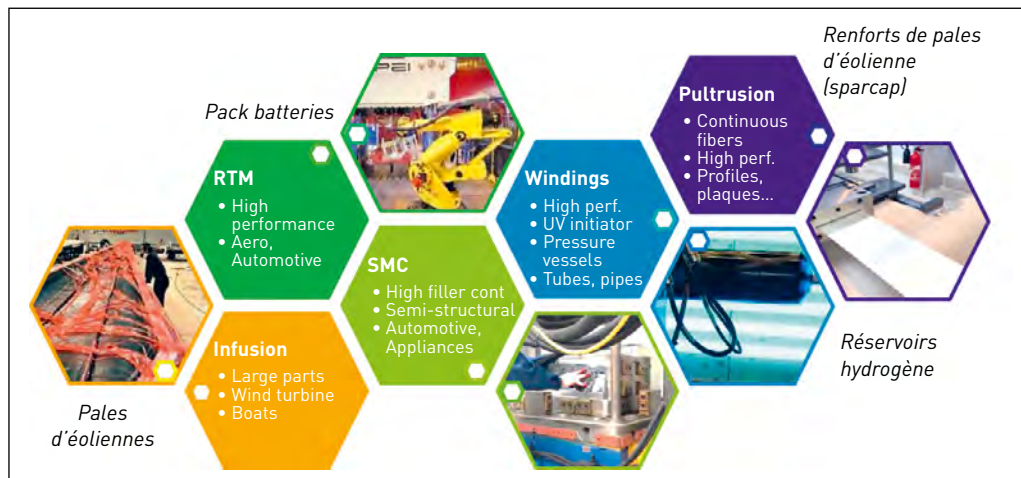


Figure 5

Procédés et applications types accessibles avec les résines thermoplastiques liquides Elium®.

SMC (sheet moulding compound) désigne la fabrication en composites à feuilles moulées adaptée aux grandes pièces ; RTM (resin transfer moulding) désigne un procédé de moulage par transfert de résine qui permet des états de surface de grande qualité.

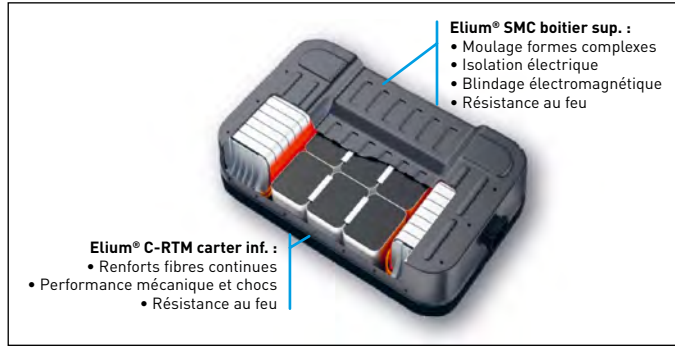


Pour autant, même avec des véhicules électriques optimisés, le gain énergétique sur la vie du véhicule est de 1 kWh par kilogramme gagné. Par ailleurs, à autonomie équivalente, des batteries de moindre capacité sont nécessaires (de l'ordre de 1 kWh pour 50 kg d'allègement). Enfin, d'autres gains induits sont à prendre en compte comme un dimensionnement moindre en crash et en raideur de caisse, et un meilleur confort ainsi que de meilleures performances en conduite.

Dès lors, des solutions composites thermoplastiques permettent d'alléger le véhicule, comme par exemple des packaging de batterie en composites fibres de verre et résines Elium® illustrés sur la

**Figure 6.**

Les réductions de masse typiquement atteignables en utilisant des fibres de verre ou de carbone vont de 30 à 50 % respectivement par rapport à des solutions en acier.



**Figure 6**

Utilisation de composites thermoplastiques Elium® pour les packagings de batteries.

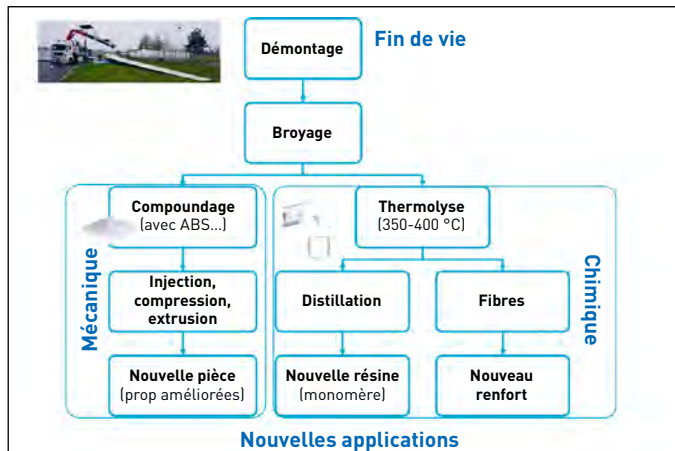
être mises en œuvre par infusion et permettre la fabrication de pales d'éoliennes recyclables. Le projet Zebra, conduit par l'IRT Jules Verne, a été lancé en 2020 afin de démontrer la faisabilité de pales d'éoliennes 100 % recyclables à l'échelle 1.

Le schéma de la **Figure 7** illustre les différentes possibilités offertes pour le recyclage de pales d'éoliennes.

## 6 Matériaux recyclés et bio-sourcés à iso-performance

Le recyclage des matériaux composites constitue d'ores et déjà un enjeu environnemental important. En effet, les éoliennes de première génération arrivent en fin de vie et les pales en composites thermoplastiques s'avèrent difficilement recyclables. Ainsi, aux États-Unis, ce sont 10 000 pales par an qui arrivent en fin de vie et qui sont mises en décharge.

Les résines Elium® thermoplastiques liquides peuvent



**Figure 7**

Recyclage des composites Elium® : voies mécanique et chimique.

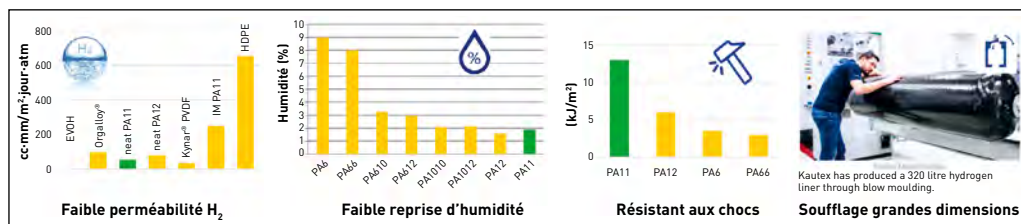


Figure 8

Propriétés du PA11 Rilsan® pour la réalisation de liners pour réservoirs hydrogène.

Deux voies sont investiguées : le recyclage mécanique par broyage des pales et l'incorporation dans de nouveaux composés ou le recyclage chimique où la résine est dépolymérisée, séparée des fibres et réutilisée comme monomère dans de nouveaux matériaux composites. (Figure 7)

Les matériaux bio-sourcés peuvent aussi offrir des performances de haut niveau pour satisfaire aux exigences les plus sévères des solutions adaptées à la transition énergétique. C'est le cas du polyamide 11 Rilsan® issu de l'huile de ricin qui permet la réalisation de liners pour réservoir hydrogène et qui allie une faible perméabilité à l'hydrogène, une faible reprise en eau, une haute résistance aux chocs à froid et des aptitudes à la mise en œuvre permettant la réalisation de liners en extrusion soufflage de plus de deux mètres (Figure 8).

## 7 Synthèse des besoins : un cycle de vie vertueux

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) est un outil indispensable pour s'assurer que les matériaux utilisés s'avèrent *in fine* vertueux

d'un point de vue environnemental et améliorent significativement le bilan pour un usage donné sans engendrer de nouvelles nuisances. C'est aussi un outil multicritères qui permet de bien peser les différents impacts et de prendre les meilleures décisions sur des sujets complexes.

À titre d'exemple, l'analyse du cycle de vie réalisée par l'ADEME en 2020<sup>6</sup> sur des véhicules à hydrogène (FCEV) comparés à des véhicules électriques (BEV) et diesel est riche d'enseignements.

Le premier, sans rapport avec les matériaux, montre qu'un véhicule FCEV n'est vertueux par rapport à un véhicule diesel que si l'hydrogène utilisé est issu d'électrolyse à partir d'énergie renouvelable et non pas de vaporeformage de méthane.

Un autre aspect concerne la production du véhicule où cette étude montre que les véhicules électriques ou hydrogènes souffrent d'impacts négatifs liés principalement aux batteries (métaux et terres rares), aux réservoirs d'hydrogène (fibres de carbone) et aux piles

6. 2019 DOE Hydrogen & Fuel Cells Program Review – Cassidy Houchins & coll.



à combustible (principalement platine). Néanmoins, les axes de progrès listés pour réduire l'impact recoupent les axes de développement des nouveaux matériaux et semblent atteignables à court terme. On listera ici :

- l'augmentation de la durabilité des équipements : des matériaux plus performants en termes de vieillissement pourront permettre de rouler plus de 300 000 kilomètres diminuant d'un tiers (par rapport à une durée de vie de 200 000 km) le besoin en ressources abiotiques pour le même usage ;
- la limitation de l'usage de matériaux à fort impact : des matrices pour composites plus performantes comme

Rilsan®Matrix ou Elium® permettent de réduire la quantité de fibres de carbone ; des liants ou électrolytes plus performants permettent de réduire les quantités de lithium pour les batteries ;

- l'allègement : comme nous l'avons vu plus haut, l'allègement du véhicule, c'est moins de consommation de matériaux, moins d'énergie pour transformer et fabriquer les véhicules et moins de consommation d'énergie en usage ;

- le recyclage : pour des véhicules hydrogènes, le recyclage et la réutilisation du platine et des fibres de carbone permet de diminuer de 50 % l'impact en ressource abiotique.

## Conclusion

Les besoins matériaux liés à la transition énergétique nous projettent au-delà du progrès et de l'amélioration continue pratiquée pour des applications matures et traditionnelles.

Les niveaux de performances à atteindre sont bien souvent inédits et correspondent à des exigences nouvelles aussi bien en termes de spécifications produits que de production industrielle (quantité et qualité). D'autre part, les exigences environnementales sont incontournables et nécessitent l'utilisation systématique d'outils type ACV pour faire les bons choix et ne pas nuire.

Par ailleurs, cette recherche de performances technique et environnementale doit se faire à coût maîtrisé pour favoriser une adoption la plus massive possible de ces nouvelles technologies vertueuses. Dès lors, de fortes capacités

de développement et d'industrialisation sont requises pour répondre aux enjeux de l'urgence climatique.

Enfin, un mode de travail collaboratif et agile est indispensable afin de développer les meilleures solutions en s'adaptant en permanence aux nouvelles avancées techniques et scientifiques.