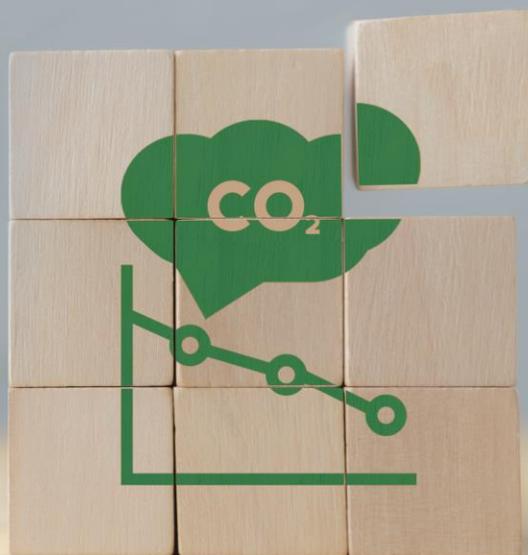


# Annexe 2

## Bas carbone circulaire

### Fiches domaines et ressources



# Annexe 2 – Fiches domaines

D1 - Véhicules électriques

D2 - Véhicules hydrogène

D3 - Électrolyseurs

D4 - Pompe à chaleur

D5 - Nucléaire

D6 - Eolien terrestre

D7 - Eolien en mer

D8 - Solaire photovoltaïque

D9 - Réseaux électriques

D10 - Réseaux de chaleur

D11 - Géothermie profonde

D12 - Biomasse solide

D13 - Biomasse gazeuse

D14 - Bâtiments - neuf

D15 - Bâtiments - rénovation performante

# D1 - VÉHICULES ÉLECTRIQUES



## À RETENIR

**SNBC** : comment se passer de pétrole dans la mobilité ? A l'horizon 2050, les voitures électriques pourraient représenter 95% du parc automobile français, soit 36 millions de véhicules.

**Enjeu ressources** : la forte demande en ressource minière des véhicules électriques, accompagnée de leur forte croissance, risque d'amener à des pénuries (Cobalt) ou des conflits (Lithium). Le lithium des batteries n'est actuellement quasiment pas recyclable.

**Solutions circulaires** : mettre en place un plan actif sur le recyclage des ressources stratégiques, y compris de la recherche et développement pour rendre le lithium des batteries recyclable.

## DESCRIPTION, RISQUES ET ENJEUX

### 1. Importance du domaine pour une France bas carbone

Les véhicules électriques permettront de décarboner les transports routiers, historiquement captifs aux carburants fossiles. La bascule vers la mobilité électrique, associée à une électricité décarbonée, permet de réduire de 22 MtCO<sub>2</sub>/an à partir de 2035<sup>(1)</sup>, ce qui nécessitera un parc de véhicules de plus de 7 millions en 2030 (contre 215 000 actuellement) et des ventes de véhicules neufs entre 1.2 et 1.7 M par an, à partir de 2030 (scénario Crescendo médian construit par RTE<sup>(1)</sup>).

A cela, il faudra ajouter l'utilisation des batteries pour les usages stationnaires (système électrique, industriel, résidentiel). Ces batteries seront indispensables pour assurer l'équilibre entre l'offre et la demande avec une part de 35% d'électricité intermittente<sup>(1)</sup>.

### 2. Technologies, ressources et enjeux

Les deux composants d'un véhicule électrique nécessitant des ressources critiques sont situés dans le moteur à aimant permanent et les batteries<sup>(2)</sup>. Les batteries, de type LFP, NMC et NCA, se partagent actuellement le marché.

La criticité en matière de ressources porte en premier lieu sur le cobalt, puis dans un second ordre sur le lithium et le nickel. Les véhicules électriques utilisent également du cuivre, de l'aluminium, du silicium et de l'acier mais dans une moindre mesure de criticité. Le cobalt utilisé pour les cathodes des batteries pose surtout des problèmes éthiques à cause des pratiques de minage.

Les technologies actuelles atteignent leurs limites physiques, notamment du point de vue des ressources. Un allègement de la contrainte sur le cobalt est possible mais impliquerait une augmentation de celle sur le nickel. Un défi de la recherche est alors de trouver des approches innovantes sur les batteries chimiques.

## SYNTHÈSE DE LA CRITICITÉ

	INDEX GLOBAL	Réserves Disponibles, Volumes	Monopole extraction et transformation	Ressource stratégique & conflits d'usage	Substituabilité	Recyclabilité	Impacts sociaux et environnementaux
LITHIUM	4,2	4	4	5	4	3	5
COBALT	4,2	4	5	4	3	3	5
CUIVRE	3,5	4	3	4	4	1	5
GRAPHITE	3,3	3	5	3	1	5	3
ALUMINIUM	2,8	4	2	3	3	1	4
NICKEL	2,8	2	3	3	4	2	3
ACIER	2,0	1	2	1	4	1	3
TOTAL DOMAINE	3,2	3,1	3,4	3,3	3,3	2,2	4

(1) [RTE 2021a], RTE, Futurs énergétiques 2050, Octobre 2021

(2) [EU 2020b], EU, Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU, Septembre 2020



## SOLUTIONS CIRCULAIRES & RECOMMANDATIONS

### 0. Éviter

**Diminuer le parc de véhicules par l'économie de fonctionnalité.** Développer la mobilité comme service plutôt que la propriété des véhicules. Développer les services de covoiturage et de multimodalité pour faciliter les déplacements, et limiter la croissance du parc automobile.

En milieu urbain et périurbain, basculer vers les petits véhicules électriques qui requièrent quelques kg de batteries au lieu de plusieurs centaines de kg : triporteurs en milieu professionnel, voiturettes type Citroën AMI, vélos à assistance électrique ou transports en commun (train, métro, bus), qui ne sont utilisés actuellement que par 24 % des français pour se rendre à leur travail<sup>(1)</sup>. Ce chiffre a tendance à augmenter dans les zones très urbanisées.

### 1. Réduire

**Réduire le poids des véhicules.**

**Favoriser des technologies de batteries moins consommatrices en ressources,** par exemple les batteries LFP, qui permettent d'éliminer le cobalt et le nickel, et de réduire la consommation en lithium, par rapport aux batteries NMC, largement utilisées aujourd'hui<sup>(2)</sup>. Des investissements plus conséquents en R&D sont nécessaires à l'émergence de technologies alternatives (nouvelles, ou amélioration de celles existantes) moins consommatrices en ressources critiques.

**Augmenter la durée de vie des batteries** pour réduire le nombre de remplacement. Les batteries LFP permettent d'atteindre 2000 cycles de charges/décharges sans perte de performance, alors que les batteries NMC les atteignent difficilement<sup>(2)</sup>. Ici encore, il faut investir pour fabriquer des batteries à moindre coût pouvant atteindre un nombre soutenu de cycles, comme les batteries LTO (titanate de lithium) qui peuvent dépasser les 20 000 cycles.

**Reconditionner/réparer les batteries** en changeant les cellules (anodes et cathodes) défectueuses, afin d'éviter de fabriquer de nouvelles batteries, et de jeter des cellules qui seraient encore fonctionnelles. Par exemple, le projet Re-factory de Renault a pour objectif d'atteindre 20 000 réparations d'ici 2030<sup>(3)</sup>.

### 2. Réutiliser et réemployer

**Favoriser la deuxième vie stationnaire :** donner une seconde vie à des batteries qui ne sont plus assez performantes pour la mobilité automobile ou légère. Les utiliser en usage « stationnaire » à la maison, en appui à l'autoconsommation ou positionnées dans les réseaux de basse tension électrique couplées à des énergies renouvelables (éolien, photovoltaïque). Cela permet d'encaisser de forts flux d'énergie à des moments de la journée (fort ensoleillement), pour les redistribuer à d'autres moments en soirée ou le matin.

### 3. Recycler

**Garantir le recyclage de tous les véhicules.** Depuis 2015, les réglementations européennes imposent 95% de réutilisation et de réemploi pour tous les véhicules<sup>(4)</sup>.

**Instaurer une collecte et un tri des batteries,** comme l'association d'entreprises SARPI et Solvay pour créer un écosystème circulaire, afin de réutiliser les matières critiques des batteries, et d'en produire de nouvelles.

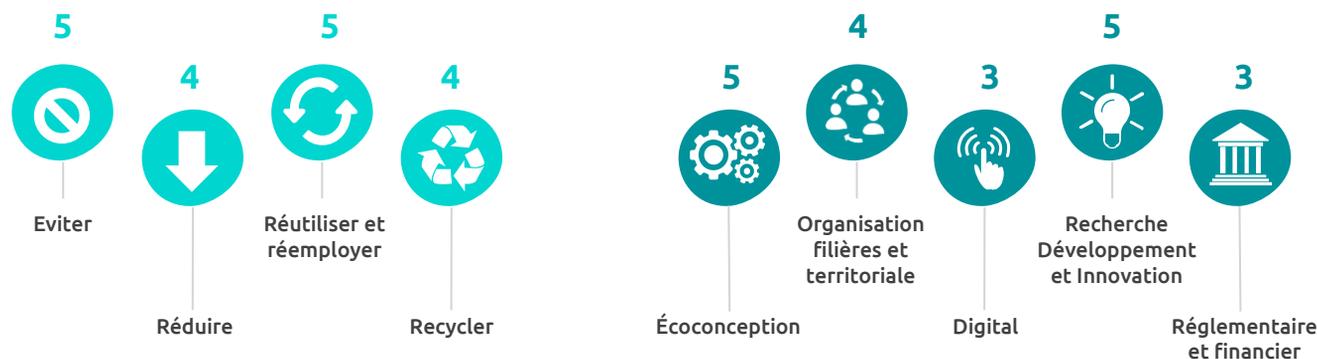
**Recycler les composants des batteries,** comme le constructeur Renault qui a annoncé la création d'un consortium avec Veolia et Solvay, pour extraire et purifier les métaux des batteries et réinjecter les matières récupérées dans la fabrication de nouvelles batteries<sup>(3)</sup>.

**Inclure dans les produits neufs** plus de métaux issus du recyclage. Sur proposition de règlement de la Commission européenne, il est question de niveaux minimums de cobalt, de plomb, de lithium ou de nickel issus de la valorisation des déchets dans les nouvelles batteries.

### 4. Solutions amont/aval

**Investir dans les potentiels miniers disponibles** afin de sécuriser les approvisionnements français et de **limiter la dépendance** envers les autres pays.

## SYNTHÈSE DES LEVIERS & EFFORTS CIRCULAIRES NÉCESSAIRES



(1) [INSEE] [La voiture reste majoritaire pour les déplacements domicile-travail, même pour de courtes distances](#), 2021

(2) [IEA 2021a], IEA, [The Role of Critical Materials in Clean Energy Transitions](#), Mai, 2021

(3) [RENAULT GROUP], [Groupe Renault, Veolia et Solvay : les batteries d'aujourd'hui seront celles de demain](#), 2021

(4) [SENAT], [Définition et implications du concept de voiture propre](#), 2022

# D2 - VÉHICULES HYDROGÈNE ET PILES À COMBUSTIBLE



## À RETENIR

- SNBC** : les transports routiers seront amenés à consommer entre 8 et 30 TWh d'hydrogène en 2050.
- Enjeu ressources** : éviter la dépendance envers un petit nombre d'acteurs : elle augmente le risque d'élévation des prix et de pénurie en ressources.
- Solutions circulaires** : investir dans les potentiels miniers disponibles et mettre en place des boucles de réemploi et de recyclage sur les piles à combustible.

## DESCRIPTION, RISQUES ET ENJEUX

### 1. Importance du domaine pour une France bas carbone

Les véhicules hydrogène, au même titre que les véhicules électriques, ont pour vocation de décarboner les transports avec des émissions directes nulles de CO<sub>2</sub> et de particules fines. Alors appelé à remplacer les combustibles fossiles, l'hydrogène représentera une consommation comprise entre 8 et 30 TWh dans la mobilité<sup>(1)</sup>.

### 2. Technologies, ressources et enjeux

Même avec des batteries de plus en plus performantes, l'électricité reste compliquée à stocker en raison des pertes de capacité et de charge des batteries sur la durée. Les véhicules hydrogène peuvent donc se substituer aux véhicules électriques puisqu'ils ne stockent pas de l'électricité dans des batteries mais de l'hydrogène, à haute pression, dans des réservoirs sans perte de capacité. Cet hydrogène est ensuite envoyé vers des piles à combustible, appareils électrochimiques, qui font réagir l'hydrogène (stocké) et l'oxygène (présent dans l'air extérieur) pour former de l'eau et créer de l'électricité.

Deux modèles de véhicules hydrogène (Nexo et Mirai) sont disponibles en France, mais ne représentent qu'une part infime du marché. Si les véhicules hydrogènes sont encore peu représentés dans le parc automobile aujourd'hui, ils connaîtront un développement accru durant la prochaine décennie.

Différentes technologies de piles à combustible sont en amélioration continue. Les piles à combustible PEM (Polymer Electrolyte Membrane) sont les plus couramment utilisées, notamment dans les deux seuls modèles disponibles en France. Cette technologie est la plus adaptée pour l'automobile grâce à une grande densité de puissance et à une basse température d'utilisation par rapport aux autres technologies : piles à combustible PA (Phosphoric Acid), piles à combustible A (Alkaline), piles à combustible MC (Molten Carbonate), piles à combustible SO (Solid Oxide) et piles à combustible DM (Direct-Methanol)<sup>(3)</sup>.

Selon l'ADEME, le rendement de la chaîne de l'hydrogène (fabrication, stockage et transformation en électricité de l'hydrogène) s'élève à 22% pour une utilisation à 700 bars, alors que pour un véhicule électrique ce rendement atteint 70%<sup>(2)</sup>. Certaines technologies augmentent le rendement de la chaîne de l'hydrogène jusqu'à 30%, mais ce niveau reste relativement bas par rapport à celui des batteries<sup>(2)</sup>. Ainsi, les technologies de l'hydrogène doivent encore évoluer pour augmenter leur efficacité.

Consommatrices de ressources variées (cuivre, aluminium, acier, nickel, platinoïde, terres rares et graphite), les piles à combustible nécessitent en moyenne 10 fois plus de platinoïdes que les véhicules diesel<sup>(3)</sup>, tandis que l'extraction de la ressource est concentrée à plus de 68% en Afrique du Sud<sup>(4)</sup>. Certains matériaux sont particulièrement critiques comme les terres rares et le graphite en raison du contrôle établi par un petit nombre d'acteurs, majoritairement la Chine, sur la chaîne d'approvisionnement. La concentration des acteurs sur les ressources peut se révéler risquée. En effet, il suffit qu'un seul des pays producteurs entre en crise économique, ou politique, pour rompre la chaîne d'approvisionnement (pénurie) et amener à une forte inflation.

## SYNTHÈSE DE LA CRITICITÉ

	INDEX GLOBAL	Réserves Disponibles, Volumes	Monopole extraction et transformation	Ressource stratégique & conflits d'usage	Substituabilité	Recyclabilité	Impacts sociaux et environnementaux
PLATINOÏDES	3,7	4	5	4	5	1	3
TERRES RARES	3,8	1	5	5	3	4	5
CUIVRE	3,5	4	3	4	4	1	5
GRAPHITE	3,3	3	5	3	1	5	3
ALUMINIUM	2,8	4	2	3	3	1	4
NICKEL	2,8	2	3	3	4	2	3
ACIER	2,0	1	2	1	4	1	3
TOTAL DOMAINE	3,1	2,7	3,6	3,3	3,4	2,1	3,7

(1) [RTE 2021a], RTE, Futurs énergétiques 2050, Octobre 2021

(2) [ADEME 2020d], ADEME, Rendement de la chaîne hydrogène - Cas du "Power-to-H2-to-Power", Janvier 2020

(3) [EU 2020b], EU, Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU, Septembre 2020

(4) [INEC 2022] Rapport Figure 20 – Concentration des pays acteurs dans l'extraction et la première transformation des ressources minérales



SOLUTIONS CIRCULAIRES & RECOMMANDATIONS

0. Eviter

Encourager l'économie de fonctionnalité par le développement de la mobilité comme service plutôt que la propriété des véhicules. Il est également possible de favoriser les mobilités légères (vélos, trottinettes électriques) ou les transports en commun (train, métro, bus), qui ne sont utilisés actuellement que par 24% des français pour se rendre à leur travail<sup>(1)</sup>. Ce chiffre a tendance à augmenter dans les zones très urbanisées. Le déploiement des services de covoiturage est également une solution pour faciliter les déplacements, et limiter la croissance du parc automobile.

Privilégier les technologies hydrogène dans les secteurs où elles apportent un réel avantage : les véhicules hydrogène peuvent stocker plus d'énergie que les véhicules électriques. Ils jouissent donc d'une meilleure autonomie qui, associé à un ravitaillement pratique, permet de réduire le temps de transport des marchandises. Il est donc préférable d'utiliser l'hydrogène pour le transport de marchandises plutôt que de généraliser son utilisation dans des véhicules individuels qui pourront opter pour des technologies de batteries électriques.

Équilibrer la technologie hydrogène et électrique à batterie dans la mobilité pour limiter la pression sur une technologie et ses ressources spécifiques.

1. Réduire

Favoriser des technologies de piles à combustible moins consommatrices en ressource comme c'est le cas de la pile à combustible alcaline pour les platinoïdes.

Augmenter la durée de vie des piles à combustible pour en réduire le nombre nécessaire en circulation. Les piles à combustible ont actuellement une durée de vie de 5000 heures. Le projet IMMORTAL, coordonné par le CNRS, réunit les sociétés Bosch, Johnson Matthey, FPT Industrial et AVL pour augmenter la durée de vie des piles à combustible à 30 000 heures<sup>(2)</sup>.

Reconditionner/réparer les piles à combustible pour allonger leur durée de vie et limiter la consommation de piles à combustible neuves.

Ecoconcevoir les piles à combustible pour faciliter leur maintenance et leur réparabilité afin de baisser les coûts de réparation, d'allonger leur durée de vie et de limiter la consommation de piles à combustible neuves.

2. Réutiliser et réemployer

Favoriser la deuxième vie stationnaire : donner une seconde vie aux piles à combustible qui ne sont plus assez performantes pour les transports. Les utiliser en usage « stationnaire » à la maison en appui à l'autoconsommation ou les positionner dans des applications consommatrices de petites quantités d'hydrogène.

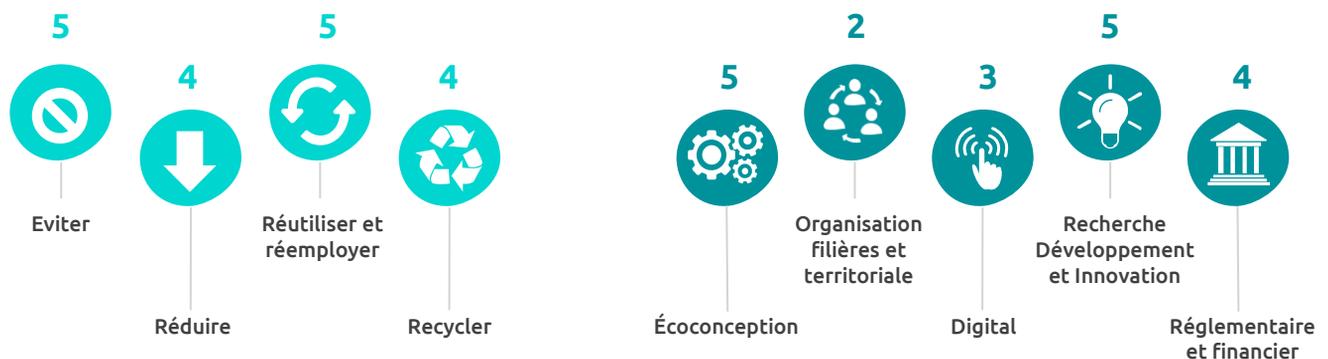
3. Recycler

Recycler les ressources au sein des véhicules et des piles à combustible : actuellement, elles ne sont pas ou très peu recyclées. Le projet BReCycle<sup>(3)</sup>, mené par l'institution Fraunhofer, a pour objectif de parvenir à un haut degré de récupération des matières employées.

4. Solutions amont/aval

Renforcer la stratégie d'approvisionnement au niveau français et européen pour diversifier les fournisseurs et limiter les risques d'élévation des prix.

SYNTHÈSE DES LEVIERS & EFFORTS CIRCULAIRES NÉCESSAIRES

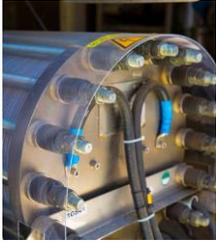


(1) [INSEE] [La voiture reste majoritaire pour les déplacements domicile-travail, même pour de courtes distances](#), 2021

(2) [H2 MOBILE] [IMMORTAL: un projet pour allonger la durée de vie des piles à combustible](#), 2021

(3) [H2 MOBILE] [BReCycle: vers un recyclage efficace des piles à combustible](#), 2020

## D3 - ÉLECTROLYSEURS



## À RETENIR

**SNBC** : 12% à 25% de la consommation d'électricité sera dédiée à la fabrication d'hydrogène par électrolyse en 2050.

**Enjeu ressources** : éviter la dépendance envers un petit nombre d'acteurs : elle augmente le risque d'élévation des prix et de pénurie en ressources.

**Solutions circulaires** : investir dans les potentiels miniers disponibles et mettre en place des boucles de réemploi et de recyclage sur les électrolyseurs. Privilégier les technologies hydrogène dans les secteurs où elles sont inévitables ou très bénéfiques.

## DESCRIPTION, RISQUES ET ENJEUX

## 1. Importance du domaine pour une France bas carbone

Aujourd'hui, l'hydrogène utilisé dans l'industrie est majoritairement produit à partir de combustibles fossiles comme le gaz naturel. Dans un mix électrique bas-carbone, se tourner vers la fabrication d'hydrogène à partir d'électrolyseur 100% électrique réduirait les émissions nationales de près de 9 MtCO<sub>2</sub>eq/an<sup>(1)</sup>.

D'après RTE, la production de l'hydrogène bas-carbone par électrolyse consommera entre 50 TWh et 170 TWh, ce qui représentera entre 12% et 25% de la consommation d'électricité française en 2050<sup>(1)</sup>.

## 2. Technologies, ressources et enjeux

L'électrolyseur produit de l'hydrogène à partir de l'électrolyse de l'eau : un courant électrique décompose l'eau en dihydrogène (H<sub>2</sub>) et en dioxygène (O<sub>2</sub>). Le dihydrogène est ensuite comprimé, puis stocké à haute pression afin d'être utilisé comme un vecteur énergétique.

L'hydrogène sera voué à être développé massivement dans le secteur de l'énergie, en particulier dans la propulsion. Néanmoins, l'industrie est aujourd'hui la première consommatrice d'hydrogène pour un usage matière comme le raffinage ou la fabrication de produits chimiques. Par exemple, la production d'ammoniac représente près de 45% des usages actuels<sup>(2)</sup>. D'autres utilisations sont envisagées, pour des usages stationnaires, comme le stockage des énergies renouvelables intermittentes et les groupes électrogènes de secours.

Quelques technologies d'électrolyseurs sont déjà disponibles sur le marché. La plus répandue est l'électrolyse alcaline qui bénéficie d'une grande maturité industrielle pour son utilisation depuis les années 1920. Deux autres technologies, plus récentes, ont vu le jour conjointement à l'arrivée des piles à combustible : les électrolyseurs PEM (Proton Exchange Membrane) et les électrolyseurs SOEC (Solid Oxyde Electrolysis Cell). Si ces technologies ne sont pas au même niveau de maturité que l'alcaline, leur performance semble prometteuse.

Les électrolyseurs sont constitués d'une grande variété de ressources (cuivre, aluminium, acier, nickel, platinoïdes, terres rares et graphite). Toutes ces ressources ne présentent pas d'enjeu géologique : leurs réserves seront suffisantes pour répondre à la demande jusqu'à 2050. Cependant, certaines d'entre elles sont classées critiques par l'UE principalement à cause du contrôle exercé par une poignée d'acteurs sur la chaîne d'approvisionnement. L'Afrique du Sud régit 68% de l'extraction des platinoïdes et la Chine possède 62% du marché des terres rares<sup>(3)</sup>. Il suffit qu'un seul des pays producteurs entre en crise économique ou politique, pour rompre la chaîne d'approvisionnement (pénurie) et amener à une forte inflation.

## SYNTHÈSE DE LA CRITICITÉ

	INDEX GLOBAL	Réserves Disponibles, Volumes	Monopole extraction et transformation	Ressource stratégique & conflits d'usage	Substituabilité	Recyclabilité	Impacts sociaux et environnementaux
PLATINOÏDES	3,7	4	5	4	5	1	3
TERRES RARES	3,8	1	5	5	3	4	5
CUIVRE	3,5	4	3	4	4	1	5
GRAPHITE	3,3	3	5	3	1	5	3
ALUMINIUM	2,8	4	2	3	3	1	4
NICKEL	2,8	2	3	3	4	2	3
ACIER	2,0	1	2	1	4	1	3
TOTAL DOMAINE	3,1	2,7	3,6	3,3	3,4	2,1	3,7

(1) [RTE 2021a], RTE, Futurs énergétiques 2050, Octobre 2021

(2) [FRANCE HYDROGENE], [Production et consommation de l'hydrogène](#), 2020

(3) [INEC 2022] Rapport Figure 20 – Concentration des pays acteurs dans l'extraction et la première transformation des ressources minérales

## SOLUTIONS CIRCULAIRES &amp; RECOMMANDATIONS

**0. Éviter**

**Encourager l'économie de fonctionnalité** par le développement de la mobilité comme service plutôt que la propriété des véhicules. Il est également possible de favoriser les mobilités légères (vélos, trottinettes électriques) ou les transports en commun (train, métro, bus), qui ne sont utilisés actuellement que par 24 % des français pour se rendre à leur travail<sup>(1)</sup>. Ce chiffre a tendance à augmenter dans les zones très urbanisées. Le déploiement des services de covoiturage est également une solution pour faciliter les déplacements, et limiter la croissance du parc automobile. Cette solution permettrait de réduire la quantité d'hydrogène produite, et donc d'éviter la fabrication d'électrolyseurs.

**Privilégier les technologies hydrogène dans les secteurs où elles sont inévitables ou très bénéfiques** : l'hydrogène n'est pas substituable dans la fabrication industrielle de certaines matières comme l'ammoniac<sup>(2)</sup>. Au contraire, des alternatives existent dans l'automobile avec les batteries électriques. Les technologies de propulsion hydrogène, qui jouissent d'une meilleure autonomie et d'un ravitaillement pratique, doivent être privilégiées pour le secteur des transports de marchandises, afin de réduire les durées d'acheminement.

**Équilibrer la technologie hydrogène et électrique à batterie dans la mobilité** pour limiter la pression sur les ressources nécessaires dans la fabrication des électrolyseurs et la production d'hydrogène.

**1. Réduire**

**Favoriser des technologies d'électrolyseurs moins consommatrices en ressources** : selon l'AIE, les électrolyseurs alcalins n'utilisent aucune matière critique comme les platinoïdes présents dans les électrolyseurs PEM<sup>(3)</sup>.

**Augmenter la durée de vie des électrolyseurs** et ainsi en réduire le nombre nécessaire en circulation. Les électrolyseurs PEM durent moins longtemps que les alcalins<sup>(3)</sup>.

**Reconditionner/réparer les électrolyseurs** pour allonger leur durée de vie et limiter la consommation de nouveaux électrolyseurs.

**Ecoconcevoir les électrolyseurs pour faciliter leur maintenance et leur réparabilité** afin de baisser les coûts de réparation, d'allonger leur durée de vie et de limiter la consommation d'électrolyseurs neufs.

**2. Réutiliser et réemployer**

**Réemployer autant que possible les matériaux**, notamment l'acier et le béton.

**3. Recycler**

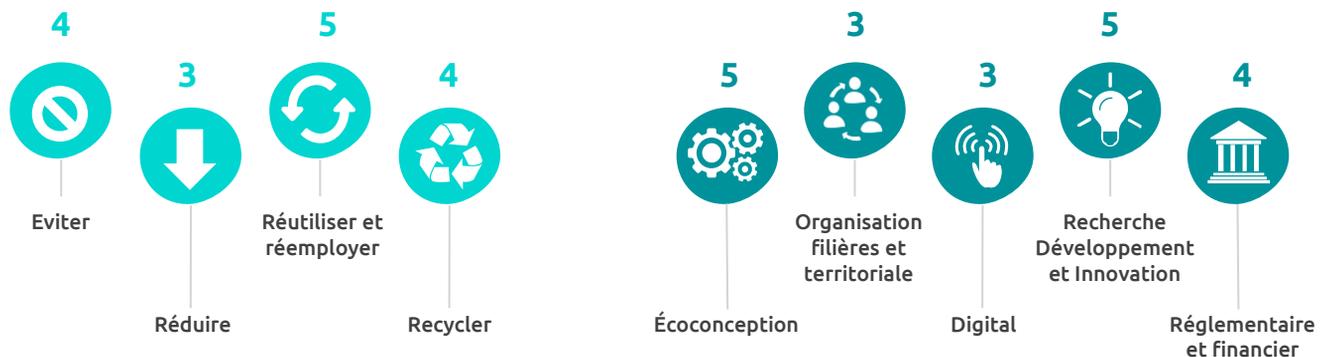
**Recycler les différentes ressources** qui se trouvent au sein des électrolyseurs (cuivre, aluminium, acier, nickel, platinoïdes, terres rares et graphite).

**4. Solutions amont/aval**

**Renforcer la stratégie d'approvisionnement au niveau français et européen** pour diversifier les fournisseurs et limiter les risques d'élévation des prix.

**Renforcer l'intégration de la chaîne de valeur** (producteurs, réparateurs...).

## SYNTHÈSE DES LEVIERS &amp; EFFORTS CIRCULAIRES NÉCESSAIRES



(1) [INSEE] [La voiture reste majoritaire pour les déplacements domicile-travail, même pour de courtes distances](#), 2021

(2) [L'ELEMENTARIUM] [Ammoniac](#)

(3) [IEA 2021a], IEA, The Role of Critical Materials in Clean Energy Transitions, Mai 2021

# D4 - POMPE À CHALEUR



## À RETENIR

**SNBC** : les pompes à chaleur chaufferont environ la moitié du parc résidentiel et tertiaire en 2050 (moins d'un dixième actuellement).

**Enjeu ressources** : les ressources concernées ne sont pas caractérisées par une forte criticité intrinsèque, néanmoins le grand nombre d'équipements et leur remplacement régulier rend nécessaire d'y prêter attention.

**Solutions circulaires** : réemployer et recycler les composants des pompes à chaleur grâce à l'écoconception des nouvelles générations.

## DESCRIPTION, RISQUES ET ENJEUX

### 1. Importance du domaine pour une France bas carbone

Les enjeux actuels sont de décarboner les énergies utilisées en limitant l'utilisation de combustibles fossiles pour le chauffage résidentiel et tertiaire. Cette limitation devra conduire à une prédominance des chauffages électriques, principalement via les pompes à chaleur.

D'après RTE, la part de chauffage électrique du parc immobilier passera de 40% à 70% en 2050, et contribuera à réduire de 40% les émissions liées au chauffage résidentiel. Les pompes à chaleur électriques et hybrides verront leur nombre multiplié par environ 8 d'ici 2050 ; elles fourniront 55% à 65% de la chaleur consommée par le parc résidentiel et tertiaire<sup>(1)</sup>.

### 2. Technologies, ressources et enjeux

Les pompes à chaleur (PAC) sont des systèmes thermodynamiques qui permettent de prélever de la chaleur d'un milieu donné à bas niveau de température, pour la transférer vers un autre milieu à un niveau de température plus élevé. Certaines technologies de PAC sont réversibles et peuvent ainsi servir de climatiseur. Les PAC sont en moyenne trois fois plus efficaces que les chaudières traditionnelles<sup>(2)</sup>.

Deux grandes familles sont disponibles sur le marché : les PAC aérothermiques air-air réchauffent l'air ambiant avec l'air extérieur, et les PAC aérothermiques air/eau chauffent l'eau à partir de l'air extérieur. De plus, une technologie hybride, qui combine une chaudière à condensation gaz et une PAC, se répand en raison de sa meilleure performance. Hormis cette dernière, les PAC fonctionnent entièrement à l'électricité ce qui contribue à réduire les émissions de CO<sub>2</sub> grâce à un mix électrique français essentiellement décarboné<sup>(3)</sup>.

Bien que les PAC ne contiennent pas de ressources de forte criticité, elles contribuent à augmenter les consommations d'acier, de nickel, de cuivre et d'aluminium déjà très importantes. Les quelques acteurs qui contrôlent ces ressources pourraient subir une crise économique ou politique en raison de leur instabilité, ce qui pourrait réduire la disponibilité de ces ressources ou bien faire bondir les prix.

## SYNTHÈSE DE LA CRITICITÉ

	INDEX GLOBAL	Réserves Disponibles, Volumes	Monopole extraction et transformation	Ressource stratégique & conflits d'usage	Substituabilité	Recyclabilité	Impacts sociaux et environnementaux
CUIVRE	3,5	4	3	4	4	1	5
ALUMINIUM	2,8	4	2	3	3	1	4
NICKEL	2,8	2	3	3	4	2	3
ACIER	2,0	1	2	1	4	1	3
TOTAL DOMAINE	2,8	2,8	2,5	2,8	3,8	1,2	3,8

(1) [RTE 2021a], RTE, Futurs énergétiques 2050, Octobre 2021 et [ADEME 2021a] Transition(s) 2050, Novembre 2021.

(2) [QUELLE ENERGIE] Pompe à chaleur air-eau : Technique, 2021

(3) [AFPAC] Différentes technologies : captage air sol eau

## SOLUTIONS CIRCULAIRES &amp; RECOMMANDATIONS

**0. Eviter**

**Maitriser et baisser la demande en énergie (MDE)**, plus spécifiquement la demande en chaleur de 50% à 60% pour l'ensemble du parc bâti grâce à la rénovation et à la construction neuve.

**1. Réduire**

**Développer l'économie de fonctionnalité**, pour réduire la quantité de PAC fabriquées et favoriser les pratiques de réparation et de reconditionnement. Il est possible de s'inspirer des offres existantes dans les bâtiments collectifs (P1, P2, P3, P4).

**Augmenter la durée de vie des PAC** pour réduire le nombre de remplacements. Actuellement, les PAC ont une durée de vie comprise entre 15 et 20 ans. Des investissements financiers en R&D sont donc nécessaires pour augmenter leur durée de vie.

**Ecoconcevoir le produit pour faciliter sa maintenance et sa réparabilité** afin de baisser les coûts de réparation, d'allonger la durée de vie et d'empêcher la consommation d'une nouvelle PAC entière.

**2. Réutiliser et réemployer**

**Reconditionner/réparer les pompes à chaleur** pour augmenter leur durée de vie et empêcher la consommation d'installations neuves. Des aides peuvent être mises en place pour financer la maintenance des appareils et encourager l'achat de PAC facilement réparables lorsqu'elles sont soumises à des indices de réparabilité.

**Offrir une seconde vie aux PAC** par la mise en place d'une chaîne de valeur dédiée à la réparation de pièces, au démantèlement et à la revente de pièces ou de PAC.

**3. Recycler**

**Consolider le recyclage des pompes à chaleur** en collectant les pompes pour les envoyer au recyclage. L'éco-organisme Ecologic permet de les collecter et de les envoyer vers des sites de recyclages<sup>(1)</sup>. C'est d'autant plus intéressant que le recyclage du cuivre et de l'aluminium est ultra performant.

**4. Solutions amont/aval**

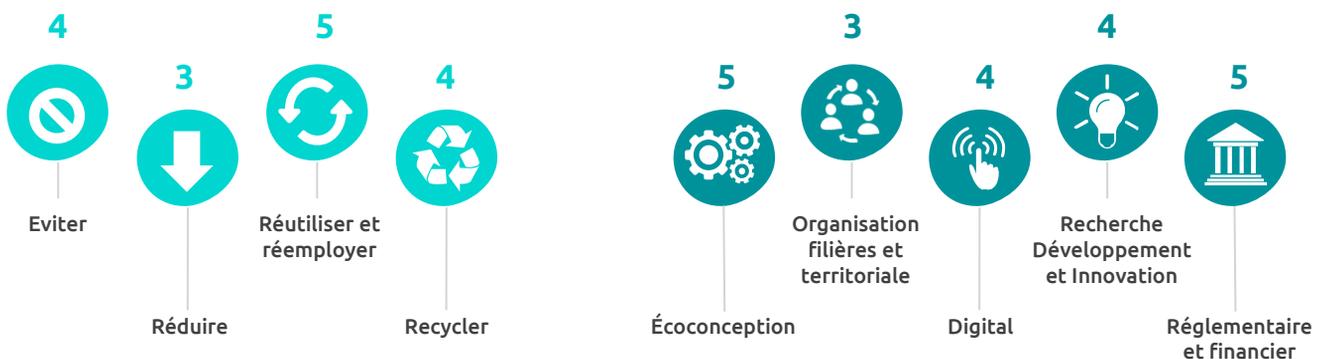
**Fournir des aides aux particuliers** pour se tourner vers des systèmes de chauffage écologiques et limiter les consommations énergétiques. Par exemple, MaPrimeRenov a été lancée par le gouvernement français pour financer la rénovation des habitations<sup>(2)</sup>.

**Etablir des indices sur les produits** pour mettre en évidence les PAC les plus écologiques. L'indice COP (coefficient de performance) est un indicateur qui permet de comparer leurs performances. Le COP, aujourd'hui à trois, devrait être augmenté au-delà de quatre et demi pour rentabiliser les PAC par rapport à la chaleur issue du gaz<sup>(3)</sup>.

**Lever des freins assurantiels propres au PAC collectives et individuelles** pour réduire les risques associés aux impayés et ainsi mieux développer l'économie de fonctionnalité.

**Veiller à ce que les réparateurs et les recycleurs de PAC ne soient pas exclus du marché** : les producteurs de PAC développeront des offres de vente d'usage, avec des services de maintenance et de rénovation tout intégrés.

## SYNTHÈSE DES LEVIERS &amp; EFFORTS CIRCULAIRES NÉCESSAIRES



(1) [ ECOLOGIC-FRANCE] [Ecologic agréé pour la gestion des DEEE issus des catégories 1 et 2 des entreprises](#), 2012

(2) [MINISTÈRE ECONOMIE] [MaPrimeRénov' : la prime pour la rénovation énergétique](#), 2022

(3) [SURFER 2020a], ADEME, BRGM, Inventaire des besoins en matière, énergie, eau et sols des technologies de la transition énergétique, Novembre 2020

## D5 - NUCLÉAIRE



## À RETENIR

**SNBC** : le scénario choisi (N1) prévoit une baisse progressive de la part du nucléaire. Il est prévu la fermeture échelonnée de réacteurs et la construction de nouveaux réacteurs d'ici à 2050.

**Enjeu ressources** : l'enjeu principal se situe dans la réutilisation des volumes issus du démantèlement des centrales existantes.

**Solutions circulaires** : réutiliser les matériaux non-contaminés sur le même site comme c'est le cas du béton issu de la déconstruction des réacteurs en fin de vie.

## DESCRIPTION, RISQUES ET ENJEUX

## 1. Importance du domaine pour une France bas carbone

Le parc nucléaire est aujourd'hui la première source de production d'électricité en France. Selon le scénario RTE-N1 choisi dans notre étude, sa capacité s'élèvera à 29 GW en 2050 grâce à la construction d'un nouveau parc de 13 GW<sup>(1)</sup>. Ainsi, le nucléaire représentera 26%<sup>(1)</sup> du mix électrique.

## 2. Technologies, ressources et enjeux

Dans le scénario N1, une première paire de réacteurs sera mise en service en 2035, puis une nouvelle paire suivra tous les 5 ans. Au total, 8 nouveaux réacteurs seront opérationnels en 2050. En parallèle, des réacteurs en fin de vie seront démantelés après 50 à 60 ans de fonctionnement. Appelés EPR2, ces nouveaux réacteurs sont le fruit d'une reconception simplifiée de la génération précédente.

Cette étude ne prend pas en compte les ressources nécessaires pour produire la réaction nucléaire : seuls les besoins en béton (388 t/MW), acier (45 t/MW) et cuivre (1,4 t/MW) sont ici calculés<sup>(2)</sup> et <sup>(3)</sup>.

Impliqué dans de nombreux domaines, en particulier celui des technologies bas-carbone, l'ensemble de ces ressources pourrait tomber en rupture d'approvisionnement en raison des conflits d'usages. Du point de vue de l'économie circulaire, un enjeu majeur du nucléaire réside dans la gestion et la valorisation des ressources issues du démantèlement des centrales existantes.

## SYNTHÈSE DE LA CRITICITÉ

	INDEX GLOBAL	Réserves Disponibles, Volumes	Monopole extraction et transformation	Ressource stratégique & conflits d'usage	Substituabilité	Recyclabilité	Impacts sociaux et environnementaux
CUIVRE	3,5	4	3	4	4	1	5
NICKEL	2,8	2	3	3	4	2	3
BÉTON	2,0	3	2	1	3	1	2
ACIER	2,0	1	2	1	4	1	3
TOTAL DOMAINE	2,5	2,5	2,5	2,2	3,8	1,2	3,2

(1) [RTE 2021a], RTE, Futurs énergétiques 2050, Octobre 2021

(2) [ADEME 2022a], ADEME, Les matériaux pour la transition énergétique, un sujet critique, Février 2022

(3) [IEA 2021a], IEA, The Role of Critical Materials in Clean Energy Transitions, Mai 2021

## SOLUTIONS CIRCULAIRES & RECOMMANDATIONS

### 0. Eviter

**Réduire la consommation d'énergie électrique finale** : miser notamment sur une meilleure efficacité énergétique dans l'industrie, le tertiaire et l'habitat.

**Répartir le mix énergétique différemment** vers des sources de production d'énergie permettant de soulager la contrainte sur les ressources impliquées dans le nucléaire. Il faudra néanmoins rester vigilant à ne pas transférer cette contrainte sur une autre ressource critique.

### 1. Réduire

*Nota bene* : pour garantir le niveau de sécurité exigé dans la filière du nucléaire, il n'est pas envisageable de réduire la quantité de matériaux utilisés.

### 2. Réutiliser et réemployer

**Réutiliser les matériaux non-contaminés sur le même site** : les matériaux non-contaminés qui sont issus du démantèlement peuvent être réutilisés pour construire de nouveaux réacteurs. Cela permettrait d'éviter la production de matériaux neufs et le traitement d'une grande quantité de déchets.

### 3. Recycler

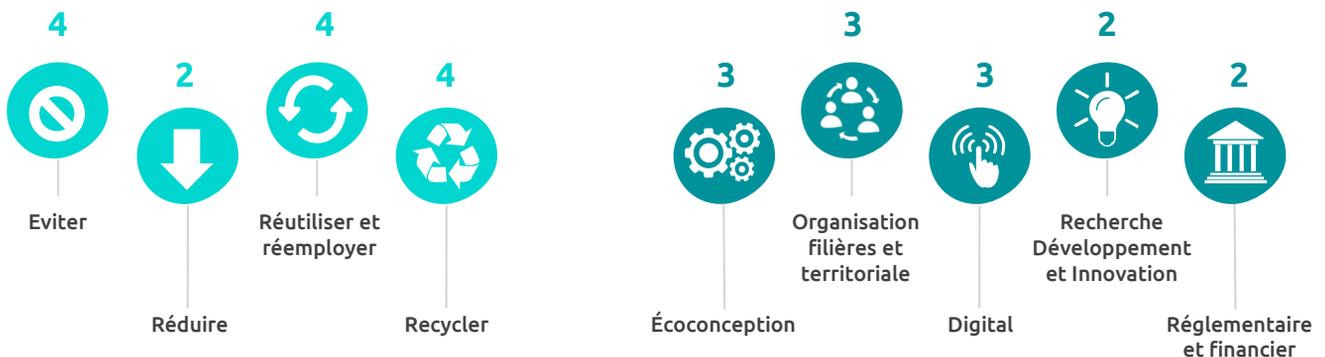
**Favoriser le tri des déchets « à la source »** afin d'optimiser leur recyclage dans les filières adéquates. Cela est d'autant plus vrai pour le cuivre et l'acier qui sont facilement recyclables.

**Recycler le nickel dans toutes les filières**. Le nickel est aujourd'hui recyclé à 66%<sup>(1)</sup>. Le taux de recyclage moyen de l'acier inoxydable, qui contient du nickel, s'élève à 80% tandis qu'il est pratiquement de 100% dans le secteur du bâtiment<sup>(2)</sup>.

### 4. Solutions amont/aval

**Investir dans les potentiels miniers** disponibles afin de sécuriser les approvisionnements français et de **limiter la dépendance** envers les autres pays.

## SYNTHÈSE DES LEVIERS & EFFORTS CIRCULAIRES NÉCESSAIRES



(1) [BRGM 2016b], BRGM, Le nickel (Ni) – éléments de criticité, Décembre 2016

(2) [FILAIR], [L'inox, et en plus il est recyclable](#), 2018

## D6 - EOLIEN TERRESTRE



## À RETENIR

**SNBC** : la production d'électricité éolienne sera multipliée par trois à quatre d'ici à 2050<sup>(1)</sup>.

**Enjeu ressources** : sécurité d'approvisionnement sur les terres rares pour les aimants permanents, les volumes de métaux et le béton.

**Solutions circulaires** : optimiser la conception, allonger la durée de vie des éoliennes afin d'être plus sobre en ressources : réemployer partiellement les composants d'éoliennes en fin de vie plutôt que de déconstruire.

## DESCRIPTION, RISQUES ET ENJEUX

## 1. Importance du domaine pour une France bas carbone

Les éoliennes sont un élément important de la transition écologique pour décarboner le mix énergétique. Elles transforment l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique avec la rotation des pales, puis en énergie électrique lorsque la turbine est entraînée.

RTE prévoit que la production d'électricité par les éoliennes terrestres sera multipliée de trois à quatre d'ici 2040, avec une production installée comprise entre 43 et 74 GW. Pour augmenter le parc et remplacer les éoliennes en fin de vie, il est nécessaire d'atteindre un rythme d'installation et de production de 2 à 4 GW/an. Ainsi, l'éolien terrestre pourra représenter une part du mix énergétique français comprise entre 13 et 21% en 2050<sup>(1)</sup>.

## 2. Technologies, ressources et enjeux

L'éolien terrestre s'appuie essentiellement sur 3 technologies : les générateurs à induction à double alimentation (DFIG), les générateurs à aimants permanents (PMSG) et les générateurs synchrones excités électriquement (EESG). Cette dernière technologie utilise un entraînement direct des pales tandis que les deux premières fonctionnent avec une boîte de vitesse. Ces trois technologies, qui représentent plus de 85% des éoliennes terrestres, resteront largement majoritaires en 2050. Au niveau européen, la technologie à aimants permanents (PMSG) devrait progresser et atteindre jusqu'à 60% des parts de marché en 2050 contre 30% aujourd'hui. En revanche, la part de la technologie à double alimentation (DFIG) semble diminuer<sup>(2)</sup>.

L'intensité matière, exprimée en kg/MW, varie selon la technologie employée. Les écarts de matière nécessaires sont particulièrement importants pour les terres rares, le cuivre (taux de variation de 426%) et l'aluminium (taux de variation de 129%). Par exemple, la technologie DFIG consomme 15kg/MW de terres rares tandis que la technologie PMSG en nécessite 60kg/MW<sup>(3)</sup>. Bien que l'intensité matière varie moins (de 12% à 29%) pour le nickel, béton et l'acier, les deux dernières représentent tout de même 98% du poids total d'une éolienne<sup>(4)</sup>. L'influence de la technologie sur la quantité de béton et d'acier utilisée est donc également à prendre en considération. Par conséquent, le choix de la technologie éolienne constitue un enjeu majeur puisqu'il influence la quantité de chaque ressource requise.

Acteur incontournable du domaine, la Chine contrôle la majorité des parts de marché des composants d'éoliennes en raison de sa position dominante sur certaines ressources stratégiques. Elle contrôle en effet 62% du marché des terres rares, 52% de la fabrication d'acier et 57% de la production d'aluminium<sup>(5)</sup>. L'approvisionnement en composants d'éoliennes est donc loin d'être sécurisé.

## SYNTHÈSE DE LA CRITICITÉ

	INDEX GLOBAL	Réserves Disponibles, Volumes	Monopole extraction et transformation	Ressource stratégique & conflits d'usage	Substituabilité	Recyclabilité	Impacts sociaux et environnementaux
TERRES RARES	3,8	1	5	5	3	4	5
CUIVRE	3,5	4	3	4	4	1	5
ALUMINIUM	2,8	4	2	3	3	1	4
NICKEL	2,8	2	3	3	4	2	3
BÉTON	2,0	3	2	1	3	1	2
ACIER	2,0	1	2	1	4	1	3
TOTAL DOMAINE	2,8	2,5	2,8	2,8	3,5	1,6	3,6

(1) [RTE 2021a], RTE, Futurs énergétiques 2050, Octobre 2021

(2) [EU 2020a], EU, Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system, Avril 2020

(3) [IEA 2021a], IEA, The Role of Critical Materials in Clean Energy Transitions, Mai 2021

(4) [ADEME 2022a], ADEME, Les matériaux pour la transition énergétique, un sujet critique, Février 2022

(5) [INEC 2022] Rapport Figure 20 – Concentration des pays acteurs dans l'extraction et la première transformation des ressources minérales

## SOLUTIONS CIRCULAIRES &amp; RECOMMANDATIONS

**0. Eviter**

Réduire la consommation d'énergie électrique finale, en misant notamment sur une meilleure efficacité énergétique dans l'industrie, le tertiaire et l'habitat.

Répartir le mix énergétique différemment, vers des sources de production d'énergie permettant de soulager la contrainte sur les ressources critiques impliquées dans l'éolien. Il faudra néanmoins rester vigilant à ne pas transférer cette contrainte sur une autre ressource critique.

**1. Réduire**

Augmenter la durée de vie des éoliennes. Aujourd'hui, les éoliennes terrestres ont une durée de vie de 25 ans alors que les fondations pourraient être utilisées une cinquantaine d'années<sup>(1)</sup>. Les éoliennes sont en effet limitées par leurs éléments mécaniques et électroniques comme les turbines ou les boîtes de vitesse. Il est donc nécessaire de mettre en place une filière de réparation afin de doubler leur durée de vie.

Ecoconcevoir la production pour faciliter sa maintenance et sa réparabilité afin de baisser les coûts de réparation, d'allonger sa durée de vie et d'empêcher la consommation d'une nouvelle éolienne entière. C'est l'objectif du projet ZEBRA (Zero waste Blade ReseArch), rassemblant acteurs industriels et centres de recherche, pour démontrer la faisabilité technico-économique et environnementale de pales d'éoliennes en thermoplastique<sup>(2)</sup>. Cela permet également de démonter plus facilement les éoliennes afin de mieux réemployer ou recycler les pièces.

**2. Réutiliser et réemployer**

Offrir une seconde vie aux différentes parties qui constituent les éoliennes par la mise en place d'une chaîne de valeur dédiée à la réparation de pièces, au démantèlement et à la revente.

Transformer les parties d'éoliennes en identifiant d'autres usages possibles. De nombreuses pistes sont aujourd'hui à l'étude. En particulier, le projet Re-Wind étudie la possibilité de réutiliser les pales d'éoliennes pour la construction de maisons sujettes à des conditions extrêmes et pour lesquelles l'utilisation de la maçonnerie classique est compromise par l'humidité, les inondations et les ouragans<sup>(3)</sup>. D'autres usages sont également envisagés pour construire des ponts pédestres ou du mobilier urbain.

Ajuster les aides pour continuer à exploiter les anciens parcs éoliens qui arrivent la fin de leur tarif d'achat subventionné. Laisser ces parcs en fonctionnement, quitte à adapter les modalités de financement public ou privé, permettrait un meilleur arbitrage entre performance et durée d'exploitation. Des subventions pourraient également être apportées aux projets pour construire des parcs avec des éoliennes ou des pièces d'éoliennes plus anciennes.

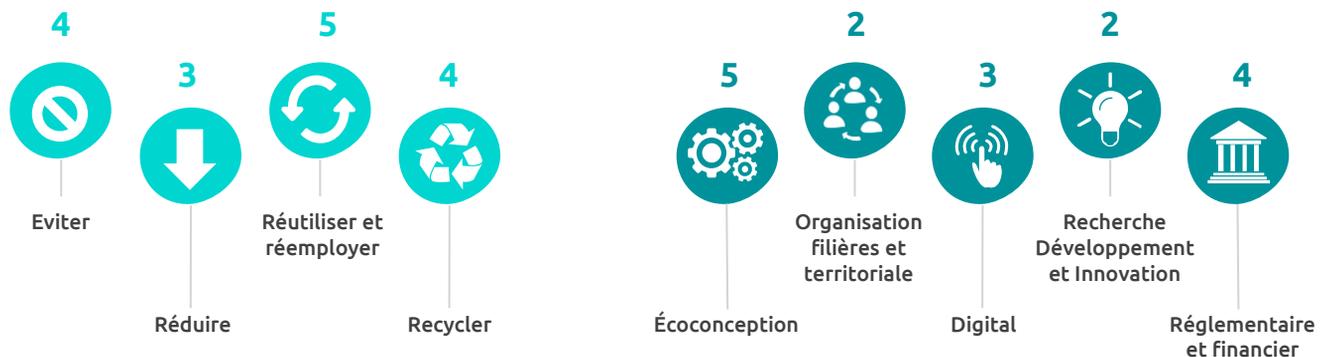
**3. Recycler**

Recycler les matériaux des éoliennes est déjà possible du fait de filières existantes comme c'est le cas pour le béton. Il est ainsi important d'optimiser la collecte afin de réinjecter les matériaux dans la filière appropriée.

**4. Solutions amont/aval**

Investir dans les potentiels miniers disponibles afin de sécuriser les approvisionnements français et de limiter la dépendance envers les autres pays.

## SYNTHÈSE DES LEVIERS &amp; EFFORTS CIRCULAIRES NÉCESSAIRES



(1) [EU 2020a], EU, Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system, Avril 2020

(2) [IRT JULES VERNE] Lancement du projet ZEBRA : première pale éolienne 100% recyclable, 2020

(3) [RE-WIND] Repurposing wind blades

# D7 - EOLIEN EN MER



## À RETENIR

**SNBC** : installation de 36 GW d'éolien offshore d'ici à 2050 (actuellement 0 GW).

**Enjeu ressources** : l'utilisation de terres rares comme aimant permanent est un enjeu prioritaire en terme de sécurité d'approvisionnement.

**Solutions circulaires** : optimiser la conception, arbitrer performance vs sobriété en ressources, réemployer partiellement les composants d'éoliennes en fin de vie plutôt que déconstruire, recycler les matériaux.

## DESCRIPTION, RISQUES ET ENJEUX

### 1. Importance du domaine pour une France bas carbone

Les éoliennes sont un élément important de la transition écologique pour décarboner le mix énergétique. Elles transforment l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique avec la rotation des pales, puis en énergie électrique lorsque la turbine est entraînée.

RTE prévoit l'installation d'éoliennes maritimes pour atteindre une puissance installée de 36GW en 2050. Pour cela, il est nécessaire d'avoir un rythme d'installation et de production de 0,4 GW/an dès aujourd'hui puis une accélération pour atteindre plus de 2GW/an en 2050<sup>(1)</sup>.

### 2. Technologies, ressources et enjeux

Les éoliennes en mer permettent de produire plus d'énergie que les éoliennes terrestres : elles sont confrontées à des vents en continu avec une intensité plus forte. Plus les éoliennes sont éloignées des côtes, plus les vents seront forts et donc la production d'énergie élevée.

Toutefois, elles ont besoin de grandes fondations sur lesquelles se reposer. En évolution constante pour permettre aux éoliennes d'aller toujours plus loin en mer, les technologies de fondations sont multiples. La fondation monopieu est constituée d'un pieu en acier qui s'enfonce à plusieurs dizaines de mètres dans le sous-sol marin. La fondation gravitaire est une structure en béton armée semblable aux éoliennes terrestres. La fondation jacket est une structure tubulaire en treillis mécanique qui repose sur quatre pieux fixés sur le sol marin. La fondation tripode est constituée d'un châssis en trois tubes d'acier, reliés chacun à un pieu fixé sur le sol marin. La dernière technologie, en phase de test, est une éolienne posée sur un flotteur, puis attaché par des câbles en acier aux fonds marins. Cette dernière technologie permettrait d'envoyer des éoliennes loin des côtes là où les vents ont de fortes intensités<sup>(2)</sup>.

En dehors des technologies de fondations, l'éolien maritime s'appuie essentiellement sur la technologie des générateurs à aimant permanent (PMSG<sup>(2)</sup>). Cette technologie utilise l'entraînement direct des pales ou une boîte de vitesses intermédiaire : elle représente 95% du marché aujourd'hui. Néanmoins, une autre technologie, la cage d'écureuil, semble émerger : elle devrait gagner 25% des parts de marché et équiper 30% du parc en 2050<sup>(3)</sup>.

L'intensité matière, exprimée en kg/MW, varie selon la technologie employée. Par exemple, la technologie d'entraînement direct consomme davantage de terres rares. Cependant, elle nécessite moins de maintenance ce qui représente un réel avantage pour l'éolien en mer. Si les autres ressources impliquées sont de criticité variable (nickel, cuivre, aluminium, béton et acier), l'enjeu se situe surtout au niveau des terres rares qui pourraient contraindre à utiliser des technologies sans aimant permanent<sup>(3)</sup>.

Acteur incontournable du domaine, la Chine contrôle la majorité des parts de marché des composants d'éoliennes en raison de sa position dominante sur certaines ressources stratégiques. Elle contrôle en effet 62% du marché des terres rares<sup>(4)</sup>, 52% de la fabrication d'acier<sup>(5)</sup> et 56,7% de la production d'aluminium<sup>(6)</sup>. L'approvisionnement en composants d'éoliennes est donc loin d'être sécurisé.

## SYNTHÈSE DE LA CRITICITÉ

	INDEX GLOBAL	Réserves Disponibles, Volumes	Monopole extraction et transformation	Ressource stratégique & conflits d'usage	Substituabilité	Recyclabilité	Impacts sociaux et environnementaux
TERRES RARES	3,8	1	5	5	3	4	5
CUIVRE	3,5	4	3	4	4	1	5
ALUMINIUM	2,8	4	2	3	3	1	4
NICKEL	2,8	2	3	3	4	2	3
BÉTON	2,0	3	2	1	3	1	2
ACIER	2,0	1	2	1	4	1	3
TOTAL DOMAINE	2,8	2,5	2,8	2,8	3,5	1,6	3,6

(1) [RTE 2021a], RTE, Futurs énergétiques 2050, Octobre 2021 – Scénario N2

(2) [SURFER 2020a], ADEME, BRGM, Inventaire des besoins en matière, énergie, eau et sols des technologies de la transition énergétique, Novembre 2020

(3) [EU 2020a], EU, Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system, Avril 2020

(4) [IFPEN 2021a], IFPEN, Les terres rares dans la transition énergétique : quelles menaces sur les vitamines de l'ère moderne, Janvier 2021

(5) [USGS 2022a], USGS, Mineral Commodity Summaries 2022 - Iron and Steel, Janvier 2022

(6) [BRGM 2018a], BRGM, La Chine a accéléré la consolidation de son industrie de l'aluminium en 2017, Avril 2018

## SOLUTIONS CIRCULAIRES & RECOMMANDATIONS

### 0. Eviter

Réduire la consommation d'énergie électrique finale, en misant notamment sur une meilleure efficacité énergétique dans l'industrie, le tertiaire et l'habitat.

Répartir le mix énergétique différemment, vers des sources de production d'énergie permettant de soulager la contrainte sur les ressources critiques impliquées dans l'éolien. Il faudra néanmoins rester vigilant à ne pas transférer cette contrainte sur une autre ressource critique.

### 1. Réduire

Augmenter la durée de vie des éoliennes : elles sont limitées par leurs éléments mécaniques et électroniques comme les turbines ou les boîtes de vitesse. Il est donc nécessaire de mettre en place une filière de réparation afin d'allonger leur durée de vie.

Ecoconcevoir le produit pour faciliter sa maintenance et sa réparabilité afin de baisser les coûts de réparation, d'allonger sa durée de vie et d'empêcher la consommation d'une nouvelle éolienne entière. Cela permet également de démonter plus facilement les éoliennes afin de mieux réemployer ou recycler les pièces.

### 2. Réutiliser et réemployer

Offrir une seconde vie aux différentes parties qui constituent les éoliennes par la mise en place d'une chaîne de valeur dédiée à la réparation de pièces, au démantèlement et à la revente.

Ajuster les aides pour continuer à exploiter les anciens parc éoliens qui arrivent la fin de leur tarif d'achat subventionné. Laisser ces parcs en fonctionnement, quitte à adapter les modalités de financement public ou privé, permettrait un meilleur arbitrage entre performance et durée d'exploitation. Des subventions pourraient également être apportées aux projets pour construire des parcs avec des éoliennes ou des pièces d'éoliennes plus anciennes.

Transformer les parties d'éoliennes en identifiant d'autres usages possibles comme c'est le cas pour l'éolien terrestre. En particulier, le projet Re-Wind étudie la possibilité de réutiliser les pales d'éoliennes pour la construction de maisons sujettes à des conditions extrêmes et pour lesquelles l'utilisation de la maçonnerie classique est difficile à cause de l'humidité, des inondations et des ouragans. D'autres usages sont également envisagés pour construire des ponts pédestres ou du mobilier urbain<sup>(1)</sup>.

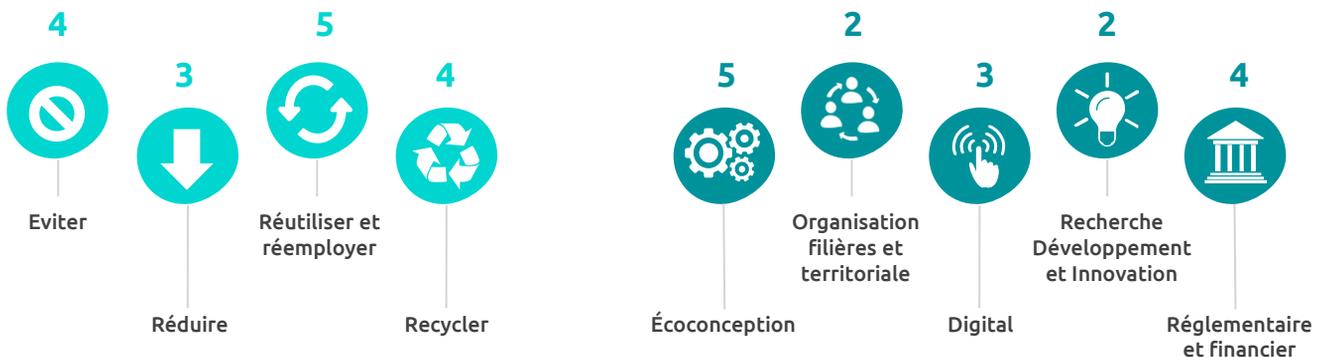
### 3. Recycler

Recycler les matériaux des éoliennes est déjà possible du fait de filières existantes comme c'est le cas pour le béton. Il est ainsi important d'optimiser la collecte afin de réinjecter les matériaux dans la filière appropriée.

### 4. Solutions amont/aval

Investir dans les potentiels miniers disponibles afin de sécuriser les approvisionnements français et de limiter la dépendance envers les autres pays.

## SYNTHÈSE DES LEVIERS & EFFORTS CIRCULAIRES NÉCESSAIRES



(1) [RE-WIND] [Repurposing wind blades](#)

# D8 - SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE



## À RETENIR

**SNBC** : dans les scénarios N1 et N2 de RTE et de la SNBC la production solaire, très compétitive, est appelée à décupler entre 2020 et 2050.

**Enjeu ressources** : risque de pénurie du silicium et des ressources transformées et d'élévation des prix à cause de la concentration des acteurs.

**Solutions circulaires** : investir dans les mines et la transformation. Diversifier le portefeuille de technologies, accélérer la R&D et l'industrialisation en France (C-Si, couches minces, perovskite). Recycler les panneaux solaires en fin de vie.

## DESCRIPTION, RISQUES ET ENJEUX

### 1. Importance du domaine pour une France bas carbone

L'énergie solaire photovoltaïque connaît un essor important grâce au coût compétitif des grandes centrales au sol par rapport aux méthodes conventionnelles de production d'électricité : les panneaux solaires photovoltaïques seront massivement installés dans le résidentiel, le tertiaire et les grands bâtiments logistiques ou industriels.

Appelée à devenir une part significative du mix énergétique d'ici 2050, l'énergie solaire représentera de 13% à 36%<sup>(1)</sup> de l'énergie finale suivant les scénarios. D'après l'AIE, l'installation annuelle solaire sera multipliée entre 2 et 3 d'ici 2040, avec une production en silicium qui devra suivre<sup>(2)</sup>.

### 2. Technologies, ressources et enjeux

De nombreuses technologies de panneaux solaires sont accessibles sur le marché. A la première place, la technologie à base de cristaux de silicium (c-Si) équipe 95%<sup>(3)</sup> du parc en raison de son faible coût de production. Elle est suivie des technologies à couches minces, tellure de cadmium (CdTe) et cuivre indium gallium sélénium (CIGS), qui représentent seulement 4%<sup>(4)</sup> des parts de marché. Une autre technologie sans silicium en phase de R&D, le perovskite, pourrait révolutionner le domaine. Enfin, la technologie à base de silicium amorphe (a-Si), qui a joué un rôle important dans le développement des panneaux solaires, mais tend aujourd'hui à disparaître dans le secteur.

Les parts de marché des technologies au silicium devraient diminuer grâce au développement des technologies à couches minces ou de celle au perovskite<sup>(2)</sup>. Pourtant, l'AIE prévoit que la technologie leader c-Si devrait encore représenter 60% du parc de panneaux solaires en 2050<sup>(2)</sup>. Toutes ces technologies utilisent des ressources très demandées dans l'industrie des semi-conducteurs ce qui va amplifier la compétition entre la transition énergétique et numérique.

La concentration des acteurs au niveau de la production primaire de ces ressources peut se révéler inconfortable en cas de crise économique au sein des pays producteurs. En effet, la Chine qui contrôle 70% du gallium et du silicium<sup>(3)</sup> et <sup>(4)</sup>, a limité ses exportations de silicium pendant la crise économique de la Covid, ce qui a provoqué de peu la fermeture de la société Ferropem.

Finalement, les panneaux solaires sont importants pour décarboner l'énergie, mais lorsqu'ils sont fabriqués à partir d'énergies fossiles, comme c'est le cas en Chine, ils perdent leur intérêt pour réduire globalement les émissions de CO<sub>2</sub>.

## SYNTHÈSE DE LA CRITICITÉ

	INDEX GLOBAL	Réserves Disponibles, Volumes	Monopole extraction et transformation	Ressource stratégique & conflits d'usage	Substituabilité	Recyclabilité	Impacts sociaux et environnementaux
CUIVRE	3,5	4	3	4	4	1	5
SILICIUM	2,8	1	5	2	3	4	2
ALUMINIUM	2,8	4	2	3	3	1	4
BÉTON	2,0	3	2	1	3	1	2
ACIER	2,0	1	2	1	4	1	3
TOTAL DOMAINE	2,6	2,6	2,8	2,2	3,4	1,6	3,2

(1) [RTE 2021a], RTE, Futurs énergétiques 2050, Octobre 2021

(2) [IEA 2021a], IEA, The Role of Critical Materials in Clean Energy Transitions, Mai 2021

(3) [BRGM 2019b], BRGM, Fiche de criticité – Silicium métal, Juillet 2019

(4) [BRGM 2016a], BRGM, Le Gallium (Ga), éléments de criticité, Août 2016

## SOLUTIONS CIRCULAIRES & RECOMMANDATIONS

### 0. Éviter

**Maîtriser et baisser la demande en énergie (MDE)**, ici en électricité.

**Équilibrer la part des technologies de cellules photovoltaïques du parc** entre celles au silicium (c-Si, a-Si), à couches minces (CdTe, CIGS), et futures (perovskite). Le but est d'éviter une dépendance envers une seule ressource, en limitant la consommation sur le silicium, sans amener à une surconsommation des autres ressources (cadmium, tellurium, ...). Il est également important d'accélérer la recherche, l'innovation et le passage à l'échelle industrielle sur les technologies perovskite et à couches minces : l'Institut Photovoltaïque d'Île-de-France (IPVF) travaille actuellement sur des couches de perovskite associées au silicium pour fabriquer en France des cellules à haute performance et à faible coût.

### 1. Réduire

**Augmenter la durée de vie des panneaux solaires** pour diminuer le nombre de remplacements. La durée de vie actuelle est comprise entre 20 et 40 ans. Les pousser dans leur durée de vie maximale est un moyen efficace d'atténuer la tension sur les ressources. Lorsque les parcs arrivent au bout de leurs 20 ans de tarif d'achat subventionné<sup>(1)</sup>, les développeurs ont tendance à déconstruire le parc existant et à en construire un neuf, plus performant, pour obtenir une nouvelle période de support financier. Laisser ces parcs en fonctionnement, quitte à adapter les modalités de financement public ou privé, permettrait un meilleur arbitrage entre performance et durée d'exploitation.

**Reconditionner/réparer les panneaux solaires défectueux.** Les pannes des panneaux solaires sont souvent dues à quelques cellules photovoltaïques défectueuses qu'il suffit de remplacer.

**Ecoconcevoir le produit pour faciliter sa maintenance et sa réparabilité**, c'est lui permettre de baisser les coûts de réparation, d'allonger sa durée de vie, et d'empêcher la consommation d'un nouveau panneau entier.

### 2. Réutiliser et réemployer

**Réemployer les cellules photovoltaïques** encore fonctionnelles des panneaux solaires pour le dépannage d'autres panneaux.

**Revendre les panneaux en baisse de performance pour une seconde vie**, sur des habitations, ou pour certains usages nécessitant une faible consommation électrique (radars pédagogiques, feux de circulation). Une autre solution est d'investir pour inventer des modèles opérationnels et des modèles d'affaires qui permettent l'exploitation d'installations utilisant des matériels reconditionnés dans des conditions suffisantes de fiabilité.

### 3. Recycler

**Réinjecter les pertes lors de la fabrication des panneaux solaires.** La start-up Rosie propose des solutions pour récupérer le silicium ultrapur perdu lors de la production de panneaux solaires.

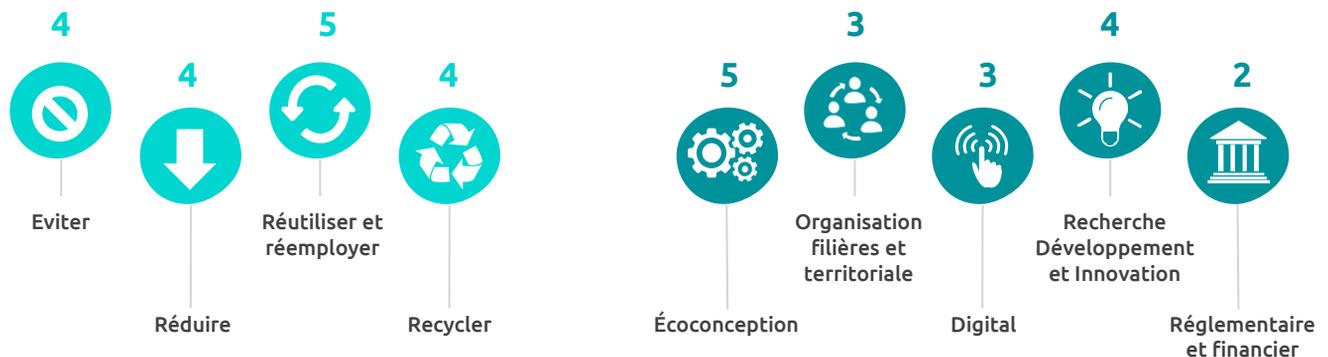
**Développer des activités de recyclage en France** afin de contrer les élévations potentielles de prix du fait de la forte concentration des acteurs. Treize organisations, dont le CEA, travaillent dans ce sens dans le cadre du projet Photorama sur la période 2021-2024. L'éco-organisme Soren (PV cycle) est agréé par les pouvoirs publics français afin de collecter et de récupérer les panneaux solaires en fin de vie. Les panneaux atteignent une valorisation à 95% de leur masse, dont 85% de valorisation matière et 10% de valorisation énergétique<sup>(2)</sup>.

**Développer la R&D** pour trouver des techniques de séparation des éléments plus efficaces et moins polluantes.

### 4. Solutions amont/aval

**Ouvrir des mines et des carrières en France** pour limiter la dépendance envers les autres pays. Les carrières d'Imerys Ceramics France dans le Lot et la Dordogne fournissent 44%<sup>(3)</sup> du silicium (c-Si et a-Si) de fabricants et transformateurs français (Ferropem silicium métal, Voltec). Historiquement, la France produisait du gallium (CIGS) raffiné dans les mines de Salindres (Gard) et de Noyelles-Godault (Pas-de-Calais), qui ont fermé au cours des années 2000<sup>(4)</sup>.

## SYNTHÈSE DES LEVIERS & EFFORTS CIRCULAIRES NÉCESSAIRES



(1) [CRE 2022], CRE, Cahier des charges AO PPE2 PV Sol, Mars 2022

(2) [CNDP 2021], CNDP, Le recyclage des panneaux photovoltaïques, Août 2021

(3) [CGAAER 2016], CGAAER, Mission d'expertise du projet d'extension de la carrière de quartz de Theidirac enjeux et recommandations., Octobre 2016

(4) [BRGM 2016], BRGM, Le Gallium (Ga), éléments de criticité, Août 2016

# D9 - RÉSEAUX ÉLECTRIQUES



## À RETENIR

**SNBC** : les réseaux électriques devront évoluer afin de s'adapter aux nouveaux modes de production et de consommation d'électricité.

**Enjeu ressources** : les ressources mobilisées par le transport et la distribution d'électricité sont également prisées dans d'autres domaines de la SNBC. Il est donc impératif de rester vigilant à ces potentiels conflits d'usage.

**Solutions circulaires** : les filières de réemploi et de recyclage des matériaux sont déjà matures, il sera nécessaire de les renforcer pour permettre de traiter les gros volumes associés aux réseaux électriques.

## DESCRIPTION, RISQUES ET ENJEUX

### 1. Importance du domaine pour une France bas carbone

Les réseaux électriques jouent un rôle majeur dans le transport et la distribution de l'électricité. Ces réseaux évolueront en profondeur et de façon continue pour rendre possible la transition énergétique inscrite dans la SNBC.

Interconnexion grandissante entre pays européens, renouvellement des réacteurs nucléaires, et développement des énergies renouvelables sont autant de facteurs qui induiront la transformation structurante du réseau, grand transport (400kV), régional (63-225kV) et de distribution (2030V – 20kV), jusqu'en 2050.

### 2. Technologies, ressources et enjeux

Selon RTE, la France réduira ses exportations d'électricité sur le long terme puisqu'elle devra satisfaire une forte demande intérieure liée à son électrification massive. En effet, le renouvellement du parc nucléaire et le développement des énergies renouvelables ne seront en mesure de produire plus d'électricité que celle qui sera nécessaire pour son marché intérieur. Néanmoins, en raison de son positionnement géographique, le réseau français devra assurer une fonction de transit pour permettre les échanges d'électricité entre les pays européens qui seront multipliés par trois d'ici à 2050 et représenteront 75 TWh<sup>(1)</sup>. Ainsi, le réseau électrique de transport doit évoluer. C'est aussi le cas pour le réseau de distribution et de connexion qui devra s'adapter à la décentralisation requise pour le développement des énergies renouvelables sur le territoire.

Le renouvellement de ce réseau et le déploiement des nouvelles lignes nécessaires peuvent suivre différents scénarios. En effet, les lignes aériennes et souterraines ne consomment pas toujours les mêmes matériaux. Toutefois, deux tendances se profilent. En premier lieu, le béton et l'acier consommés représenteront des volumes importants (5000 kT/an de béton et 570 kT/an d'acier<sup>(2)</sup>) mais ne présenteront pas de risques majeurs en termes d'approvisionnements grâce à une filière de fabrication et de recyclage française bien structurée. En second lieu, le cuivre et l'aluminium, dont la demande augmente fortement, seront quant à eux sujets à de risques importants d'approvisionnement. En effet, jusqu'à 89% des réserves de cuivre identifiées risquent d'être consommées<sup>(3)</sup>, alors qu'il s'agit d'une ressource encore peu recyclée. Bien que l'aluminium rencontre la même problématique, il s'agit d'une ressource de moindre criticité en raison de réserves disponibles plus importantes.

## SYNTHÈSE DE LA CRITICITÉ

	INDEX GLOBAL	Réserves Disponibles, Volumes	Monopole extraction et transformation	Ressource stratégique & conflits d'usage	Substituabilité	Recyclabilité	Impacts sociaux et environnementaux
CUIVRE	3,5	4	3	4	4	1	5
ALUMINIUM	2,8	4	2	3	3	1	4
BÉTON	2,0	3	2	1	3	1	2
ACIER	2,0	1	2	1	4	1	3
TOTAL DOMAINE	2,6	3	2,2	2,2	3,5	1	3,5

(1) [RTE 2021a], RTE, Futurs énergétiques 2050, Octobre 2021

(2) [SURFER 2020a], ADEME, BRGM, Inventaire des besoins en matière, énergie, eau et sols des technologies de la transition énergétique, Novembre 2020

(3) [IFPEN 2020a], IFPEN, Le cuivre dans la transition énergétique : un métal essentiel, structurel et géopolitique I, Décembre 2020

## SOLUTIONS CIRCULAIRES & RECOMMANDATIONS

### 0. Éviter

**Privilégier les lignes aériennes aux lignes souterraines** : la haute tension consomme de l'acier (61,65 t/km pour la 400kV) et de l'aluminium (18,4t/km pour la 400kV) mais ne consomme pas de cuivre à l'inverse des lignes souterraines qui nécessitent 14,7 t/km<sup>(1)</sup>.

### 1. Réduire

**Développer les réseaux électriques intelligents** pour dimensionner le réseau au juste nécessaire, anticiper et détecter les défaillances, réparer à distance, réaliser de la maintenance préventive et prédictive, et ainsi permettre d'économiser des ressources pour la rénovation et l'extension du réseau existant. Toutefois, cela doit s'accompagner d'une étude portant sur l'impact matière de ces technologies afin d'éviter un transfert de criticité.

**Inciter au développement de l'écoconception** qui permettrait d'améliorer la performance énergétique des différents éléments du réseau et d'ainsi prolonger leur durée de vie.

### 2. Réutiliser et réemployer

**Réemployer autant que possible les matériaux issus de la rénovation du réseau**, notamment pour les pylônes en béton et en acier qui sont toujours opérationnels. Enedis valorise déjà les ferrailles de ses pylônes dans les filières de la construction.

**Favoriser la deuxième vie stationnaire** : développer la réutilisation des batteries qui ne sont plus assez performantes pour la mobilité automobile ou légère en leur donnant une seconde vie dans les réseaux. Les utiliser en usage « stationnaire » à la maison, en appui à l'autoconsommation ou positionnées dans les réseaux de basse tension électrique couplées à des énergies renouvelables (éolien, photovoltaïque). Cela permet d'encaisser de forts flux d'énergie à des moments de la journée (fort ensoleillement), pour les redistribuer à d'autres moments en soirée ou le matin.

### 3. Recycler

**Diriger les matériaux vers les filières existantes pour leur valorisation**. En effet, les filières des matières étudiées sont déjà existantes en France et plutôt bien structurées. Par exemple, Enedis recycle déjà 100% des poteaux en béton<sup>(2)</sup> en envoyant le béton comme remblai routier. De plus, les filières de valorisation, sous toutes formes, des câbles électriques sont déjà bien développées sur le territoire.

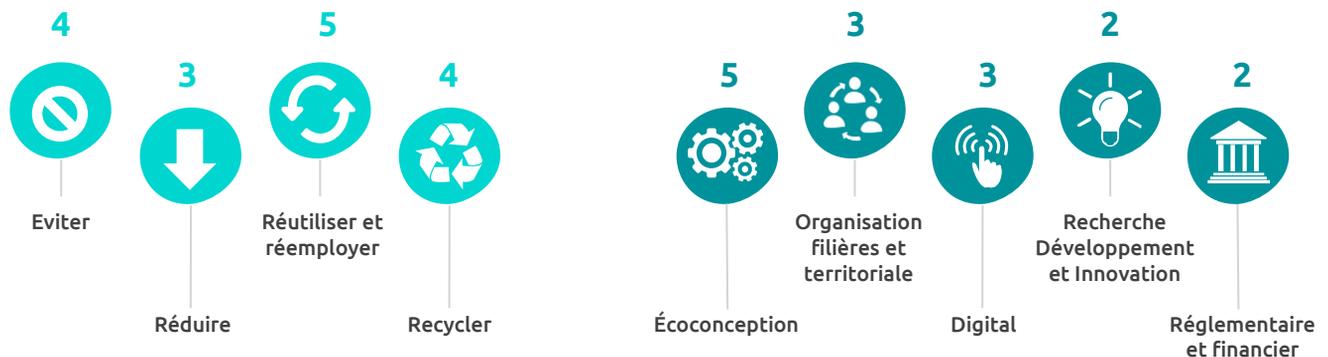
### 4. Solutions amont/aval

**Réduire le temps d'immobilisation du cuivre dans les produits inutilisés** : certains biens de consommation ne sont pas utilisés et sont stockés durant des dizaines d'années<sup>(3)</sup>. Il est donc nécessaire d'éviter de stocker inutilement ces produits inutilisés pour revaloriser le cuivre qu'ils contiennent.

**Faire évoluer les modes constructifs par l'apport de modularité** pour mieux démonter et déconstruire. Les méthodes d'assemblage des produits doivent être modifiées.

**Développer des solutions chez les assureurs** pour mieux accompagner les acteurs de la construction dans la fiabilisation des nouvelles techniques constructives et le suivi de la qualité du béton recyclé.

## SYNTHÈSE DES LEVIERS & EFFORTS CIRCULAIRES NÉCESSAIRES



(1) [SURFER 2020a], ADEME, BRGM, Inventaire des besoins en matière, énergie, eau et sols des technologies de la transition énergétique, Novembre 2020

(2) [ENEDIS 2021a], ENEDIS, Economie circulaire : 1 an après la loi Anti-Gaspillage, Enedis est au rendez-vous, Février 2021

(3) [IRIS] [Cuivre : quel avenir pour ce métal essentiel à la transition énergétique ?](#), 2019

# D10 - RÉSEAUX DE CHALEUR



## À RETENIR

**SNBC** : Les réseaux de chaleur permettent de décarboner les besoins de chaleur avec de multiples sources renouvelables (biomasses, géothermie, gaz décarboné, solaire, ...).

**Enjeu ressources** : le béton et l'acier mobilisés sont des ressources de faible criticité. Toutefois, des pénuries localisées en béton pourront mettre sous tension certains chantiers.

**Solutions circulaires** : maîtriser la demande en énergie, rendre les réseaux intelligents pour optimiser la production de chaleur, installer des compteurs chez les clients pour inciter à la sobriété et construire les réseaux de façon modulaire pour faciliter le réemploi et limiter les déchets en acier et en béton.

## DESCRIPTION, RISQUES ET ENJEUX

### 1. Importance du domaine pour une France bas carbone

Bien que l'électrification soit une composante majeure de la SNBC, la chaleur reste la première forme de consommation d'énergie avec environ 629 TWh PCI d'énergie primaire, soit 60% de l'énergie finale consommée dans les secteurs résidentiel, tertiaire et industriel<sup>(1)</sup>. Les énergies fossiles répondent à 60% du besoin de chaleur des secteurs résidentiels et tertiaires et à 51% de celui de l'industrie<sup>(1)</sup>. Après une décennie consacrée à l'électricité décarbonée, l'effort doit maintenant porter sur la décarbonation massive de la chaleur.

Cette décarbonation est envisagée d'une part avec l'électrification comme c'est le cas des pompes à chaleur, néanmoins gourmandes en ressources minérales, d'autre part avec la géothermie et la biomasse. Il est par ailleurs programmé de créer ou d'étendre des réseaux de chaleur dans l'industrie, les milieux urbains et périurbains suffisamment denses et de remplacer le combustible fossile (gaz naturel) par des ressources renouvelables (biomasses) ou de récupération (déchets)<sup>(2)</sup>.

La quantité de chaleur transportée par le réseau varie selon l'usage qui en est fait. Inférieure à 100°C, la chaleur satisfait la majorité des besoins. Toutefois, les réseaux de chaleur ne peuvent pas être utilisés par certains procédés industriels pour lesquels la chaleur atteint des niveaux trop élevés, parfois supérieurs à 500°C. Néanmoins, cette dernière partie représente uniquement 200 TWh chaque année. L'enjeu est d'augmenter la part des réseaux de chaleur de 21 TWh en 2017 à autour de 45 TWh en 2050, ce qui représente une dizaine de milliers de kilomètres de canalisations supplémentaires.

### 2. Technologies, ressources et enjeux

Un réseau de chaleur, constitué de chaufferies et de réseaux enterrés sous la ville, transporte la chaleur vers les bâtiments via de l'eau ou de la vapeur, puis ramène le fluide refroidi pour le chauffer à nouveau<sup>(3)</sup>. Les canalisations sont construites à partir de béton, d'acier et de PVC.

Différentes ressources peuvent être mobilisées pour générer de la chaleur dans les réseaux selon la technologie employée. Le gaz naturel, énergie fossile aujourd'hui valorisée, remplace le fioul et le charbon autrefois utilisés dans les chaufferies conventionnelles. Les Unités d'Incinération d'Ordures Ménagères (UIOM) sont également employées et constituent de bonnes alternatives pour valoriser les déchets issus des refus de tri. En outre, il est possible de mettre en place des chaufferies à biomasse solide, des pompes à chaleur ou encore des centrales géothermiques. En capacité de décarboner 70% à 85% des volumes de chaleur tout au long de l'année, les chaufferies à source d'énergies renouvelables pourraient être appuyées par des chaufferies au gaz naturel ou au biométhane lors des violentes chutes de température en hiver.

Le béton est l'une des ressources les moins critiques mais certaines pénuries localisées pourraient survenir. L'acier est également une ressource moins critique, en particulier parce que les réserves sont suffisantes qu'il est facilement recyclable.

## SYNTHÈSE DE LA CRITICITÉ

	INDEX GLOBAL	Réserves Disponibles, Volumes	Monopole extraction et transformation	Ressource stratégique & conflits d'usage	Substituabilité	Recyclabilité	Impacts sociaux et environnementaux
BÉTON	2,0	3	2	1	3	1	2
ACIER	2,0	1	2	1	4	1	3
TOTAL DOMAINE	2,0	2	2	1	3,5	1	2,5

(1) [ADEME 2021a], ADEME, Transition(s) 2050, Novembre 2021 – analyse Capgemini

(2) [CEREMA] [Enjeux du développement des réseaux de chaleur](#), 2021

(3) [CERAM] [Constitution d'un réseau de chaleur](#), 2021



## SOLUTIONS CIRCULAIRES & RECOMMANDATIONS

### 0. Éviter

**Maitriser et baisser la demande en énergie (MDE).** Une partie de la consommation énergétique des bâtiments peut être évitée grâce à la rénovation ou la construction, l'autre par une meilleure gestion des installations de chauffage.

### 1. Réduire

**Optimiser le besoin en matériaux grâce à la modélisation** pour améliorer le dimensionnement et ainsi diminuer les quantités de béton mobilisées.

**Améliorer le rendement des unités de production de chaleur** pour économiser la quantité de ressources nécessaire en biomasses.

**Optimiser le fonctionnement des unités de production de chaleur** grâce à la digitalisation du réseau en s'appuyant sur les données émises par les compteurs et les prévisions météorologiques.

**Ecoconcevoir les travaux d'installation ou de maintenance des réseaux de chaleur.** Lorsque cela est possible, mutualiser les travaux avec les opérateurs des autres réseaux souterrains (eau, télécom, service public) pour réduire la quantité de matériaux utilisés. S'appuyer, par exemple, sur une régie communale lorsqu'elle existe.

### 2. Réutiliser et réemployer

**Construire le réseau de façon modulaire** afin de pouvoir le démonter de façon sélective ce qui permet de réparer les pièces défectueuses.

**Réemployer autant que possible les matériaux issus de la rénovation du réseau**, notamment pour les canalisations. Le béton, aujourd'hui recyclé comme remblai routier, pourrait être réemployé dans la filière.

### 3. Recycler

**Pratiquer la déconstruction sélective et organiser les chantiers de déconstruction** pour rendre possible le recyclage du béton. Le passage à l'échelle du processus de dépose sélective du béton au moment de la déconstruction facilitera le tri des déchets et rendra le béton recyclé plus compétitif.

**Adapter les filières de recyclage** à la valorisation des déchets des réseaux de chaleur et organiser la filière de sorte à optimiser les flux de matière au niveau local.

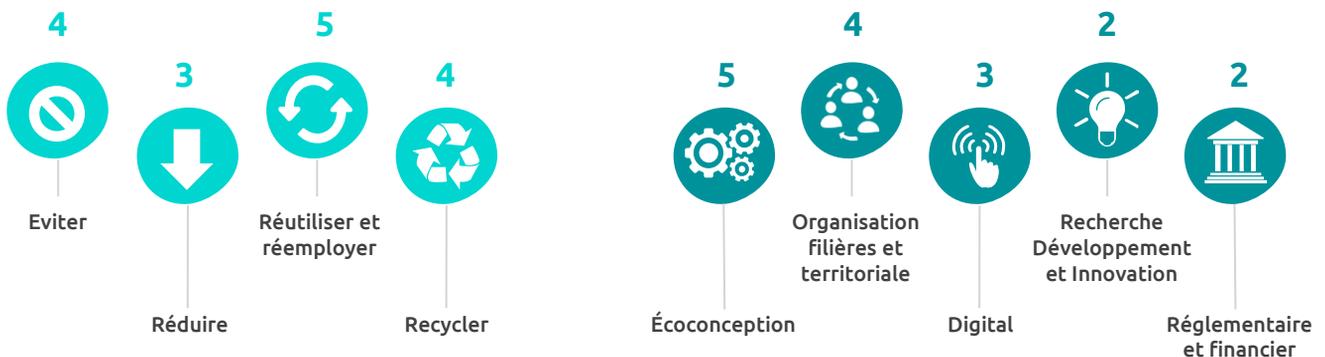
**Valoriser les déchets urbains et industriels stockés ou enfouis** pour éviter les émissions de gaz à effet de serre provoquées par leur décomposition. Selon la banque mondiale, les déchets solides étaient à l'origine de 5% des émissions globales en 2016, soit 1,6 milliards de tCO<sub>2</sub><sup>(1)</sup>.

### 4. Solutions amont/aval

**Faire accepter les réseaux de chaleur au niveau local :** développer les technologies de filtration des fumées afin d'améliorer la qualité de l'air aux alentours des chaufferies à biomasse et des UIOM.

**Utiliser les outils digitaux disponibles.** Les outils de cartographie et de planification comme ceux du CEREMA sont indispensables pour identifier les zones favorables à l'extension ou à l'installation de nouveaux réseaux. En effet, ils permettent d'identifier les densités de chaleur en ville et de repérer aisément les réseaux existants.

## SYNTHÈSE DES LEVIERS & EFFORTS CIRCULAIRES NÉCESSAIRES



(1) [BANQUE MONDIALE] Selon un nouveau rapport, la production mondiale de déchets augmentera de 70 % d'ici 2050 si rien ne change rapidement, 2018

# D11 - GÉOTHERMIE PROFONDE



## À RETENIR

**SNBC** : les différentes formes de géothermie apportent une chaleur (ou un froid) disponible en permanence et en toutes saisons indépendamment des conditions météorologiques.

**Enjeu ressources** : Utilisation de béton et acier comportant des proportions parfois importantes de nickel, sinon protégés de la corrosion par passivation.

**Solutions circulaires** : Peu sur les tubages eux-mêmes en géothermie profonde. En revanche les boucles d'eau tempérée à énergie géothermique et la géothermie de surface (non modélisée) permettent de stocker et de recycler de la chaleur ou du froid dans le temps et entre usagers connectés.

## DESCRIPTION, RISQUES ET ENJEUX

### 1. Importance du domaine pour une France bas carbone

La géothermie tire la chaleur ou le froid du sous-sol. Elle présente le bénéfice d'être disponible en permanence et en toute saison, sans problèmes d'intermittence. Elle n'entraîne ni impact visuel, ni bruit, ni occupation importante des sols. D'ici 205 la géothermie profonde peut fournir 5 à 12 TWh de chaleur aux réseaux de chaleur (1,4 TWh actuellement) tandis que les pompes à chaleur associées à la géothermie de surface pourraient constituer une petite partie du futur contingent de 10 à 18 millions de pompes à chaleur qui fourniront 50 à 100 TWh de chaleur<sup>(1)</sup>.

### 2. Technologies, ressources et enjeux

La géothermie de surface concerne réglementairement les profondeurs de 0 à 200 mètres. Elle couvre le marché du résidentiel individuel avec des pompes à chaleur sur capteurs enterrés horizontaux ou verticaux (sondes). Elle couvre aussi le marché collectif des bâtiments résidentiels ou tertiaires avec plusieurs technologies possibles : pompes à chaleur sur aquifère superficiel, champ de sondes autonomes ou incluses dans les fondations des bâtiments, stockage inter-saisonnier de chaleur ou de froid issues du bâtiment lui-même ou de toits solaires, boucles d'eau tempérées à énergie géothermique (BETEG).

La géothermie profonde concerne des profondeurs de plusieurs centaines à plusieurs milliers de mètres. Dans les îles volcaniques outre-mer - Guadeloupe actuellement<sup>(2)</sup>, et dans d'autres îles françaises à l'avenir - elle atteint des températures de 200 à 300°C. Elle permet aux îles de produire de l'électricité dite de base en se passant de fuel ou de charbon importé, et sans les problèmes de l'intermittence éolienne ou solaire.

La géothermie profonde en métropole fournit de la chaleur renouvelable comprise entre 60°C et 120°C aux réseaux de chaleur. Cette chaleur renouvelable se substitue aux sources fossiles, sans avoir les inconvénients de la biomasse (ni fumées ni noria de camions). Elle peut également fournir des industriels ayant de forts besoins de chaleur.

Le domaine retenu pour la modélisation dans cette étude est la géothermie profonde et territoire métropolitain pour la production de chaleur. En géothermie profonde les principales ressources utilisées concernent les forages. S'ils ne permettent pas de découvrir une ressource exploitable ils sont rebouchés. Au contraire en cas de succès ils sont exploités pendant plusieurs dizaines d'années. Les puits atteignent typiquement 1500 à 2500 mètres de profondeur. Une fois le forage terminé, les installations en surface sont discrètes. La chaleur ainsi échangée est ensuite injectée dans le réseau de chaleur proprement dit par le biais d'un échangeur de chaleur. Les ressources utilisées concernent essentiellement de l'acier pour chemiser les puits et le ciment utilisé pour les étanchéifier.

## SYNTHÈSE DE LA CRITICITÉ

	INDEX GLOBAL	Réserves Disponibles, Volumes	Monopole extraction et transformation	Ressource stratégique & conflits d'usage	Substituabilité	Recyclabilité	Impacts sociaux et environnementaux
NICKEL	2,8	2	3	3	4	2	3
BÉTON	2,0	3	2	1	3	1	2
ACIER	2,0	1	2	1	4	1	3
TOTAL DOMAINE	2,3	2	2,3	1,6	3,6	1,3	2,7

(1) [ADEME 2021a], Transition(s) 2050, scénarios S1 à S4

(2) <https://www.geothermies.fr/outils/operations/la-centrale-geothermique-de-bouillante-guadeloupe>

## SOLUTIONS CIRCULAIRES & RECOMMANDATIONS

### 0. Eviter

**Maitriser et baisser la demande en énergie (MDE).** 50% à 60% de la demande en chaleur de l'ensemble du parc bâti peut être évitée grâce à la rénovation ou la construction neuve, ce qui permet de mieux utiliser les ressources géothermiques, d'effectuer des forages moins importants ou d'utiliser moins de ressources par logement.

### 1. Réduire

De meilleures études préalables permettent de réduire les risques de ne pas trouver de ressource géothermique exploitable : cela diminue la probabilité de forer des puits inutilement et d'utiliser des ressources en acier et ciment à perte.

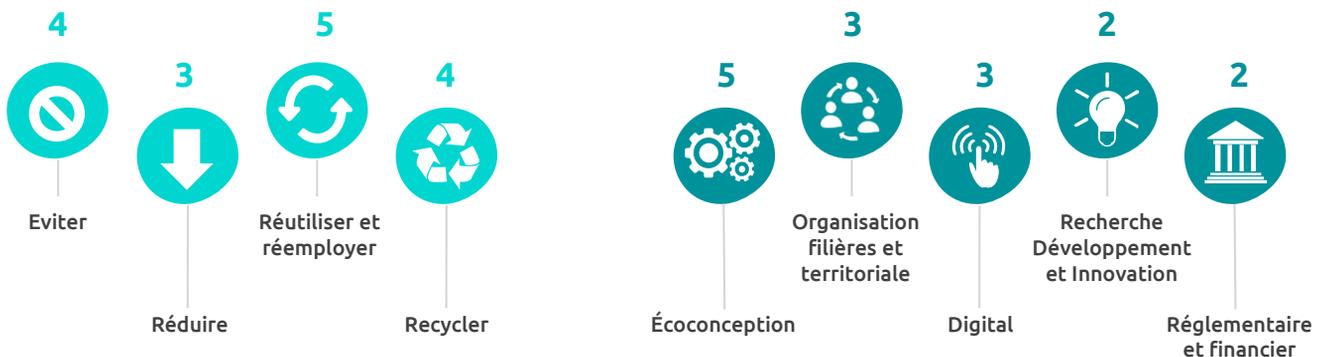
### 2. Réutiliser et réemployer

En géothermie de surface les Boucles d'Eau Tempérée à Energie Géothermique, dites BETEG<sup>(1)</sup>, mettent en place une économie circulaire de la chaleur et du froid. Dans un tel système chaque immeuble comporte une pompe à chaleur ou une thermofrigopompe raccordée à une boucle froide et une boucle chaude. Avec ce type d'installation la production de chaleur de l'un produit du froid pour l'autre et inversement. En intersaison à l'échelle d'un quartier ou des faces nord et sud d'un immeuble les besoins de froid et chaud coexistent et se compensent grâce à l'existence de la boucle tempérée. En saison froide ou chaude, la géothermie permet d'apporter le complément thermique nécessaire. Elle offre aussi la possibilité de stocker les thermies ou frigories d'une saison sur l'autre.

### 3. Recycler

Les puits d'exploitation de la géothermie ne se prêtent pas au recyclage ou au réemploi. Un forage en échec ou en fin de vie au bout de plusieurs dizaines d'années est simplement rebouché en surface, sans possibilité d'aller récupérer en profondeur les chemisages qui ont été installés.

## SYNTHÈSE DES LEVIERS & EFFORTS CIRCULAIRES NÉCESSAIRES



(1) AFPG, La boucle d'eau tempérée à énergie géothermique, Les guides techniques AFPG, Août 2019

## D12 - BIOMASSE SOLIDE



## À RETENIR

**SNBC** : la biomasse solide alimente les chaufferies individuelles, collectives et de réseaux de chaleur à hauteur d'une centaine de TWh, aujourd'hui comme en 2050.

**Enjeu ressources** : le bois utilisé est une ressource confrontée à de multiples compétitions d'usage et doit par conséquent être mobilisé de façon raisonnable. Il est alors possible d'utiliser le gisement de déchets pour diminuer le besoin en bois.

**Solutions circulaires** : il est indispensable d'organiser la filière pour produire de l'énergie à partir de biomasse solide. La valorisation des déchets est indispensable compte tenu des ressources en bois énergie limitées.

## DESCRIPTION, RISQUES ET ENJEUX

## 1. Importance du domaine pour une France bas carbone

La biomasse solide correspond à l'ensemble des matières organiques solides qui peuvent être utilisées pour produire de la chaleur ou de l'électricité. Son utilisation permet de générer 6 TWh de chaleur chaque année<sup>(1)</sup>.

Bien que la SNBC envisage un développement important de l'électrification, la chaleur reste principalement utilisée dans le secteur tertiaire, résidentiel et industriel. Elle correspond d'ailleurs à la moitié de l'énergie consommée en France.

Pourtant, la chaleur est aujourd'hui majoritairement obtenue par la combustion d'énergies fossiles, à savoir le charbon, le fioul et le gaz naturel. En effet, les énergies fossiles répondent à 60% du besoin de chaleur des secteurs résidentiels et tertiaires et à 51% de celui de l'industrie<sup>(2)</sup>. L'enjeu est donc de substituer la biomasse solide et gazeuse aux ressources fossiles pour produire de la chaleur afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre, renforcer la souveraineté énergétique de la France et créer des emplois non délocalisables dans le secteur de l'énergie. En particulier, la biomasse solide est privilégiée pour des applications stationnaires.

## 2. Technologies, ressources et enjeux

Dans le secteur collectif, tertiaire et industriel, la chaleur est généralement produite par le même procédé à partir de différentes sources de matières organiques : les déchets, le bois énergie sous forme de bûche, déchets de bois, plaquettes ou de granulés et dans une moindre mesure à partir des résidus agricoles. Le combustible vient automatiquement alimenter un générateur de chaleur puis les rejets gazeux sont épurés et les cendres évacuées. Pour une utilisation domestique et individuelle, particulièrement en zone peu dense ou périphérique, la chaleur est principalement générée dans des cheminées ou poêles à partir du bois énergie.

Compte tenu des surfaces disponibles limitées et des compétitions d'usage (matière, puits carbone), le bois-forêt est la ressource la plus critique.

Quant aux déchets urbains et industriels, ils ne sont pas sujets à des risques importants. Bien au contraire, les chaufferies qui les mobilisent permettent de réutiliser des déchets non valorisés qui émettent inutilement du méthane dans l'atmosphère et polluent les écosystèmes.

## SYNTHÈSE DE LA CRITICITÉ

	INDEX GLOBAL	Réserves Disponibles, Volumes	Monopole extraction et transformation	Ressource stratégique & conflits d'usage	Substituabilité	Recyclabilité	Impacts sociaux et environnementaux
BOIS-FORÊTS	2,3	3	1	4	3	1	2
DECHETS	1,8	1	2	2	3	1	2
BÉTON	2,0	3	2	1	3	1	2
ACIER	2,0	1	2	1	4	1	3
TOTAL DOMAINE	2,0	2	1,8	2	3,3	1	2,3

(1) [ADEME], [le bois biomasse](#)

(2) [ADEME 2021a], ADEME, Transition(s) 2050, Novembre 2021 – analyse Cappemini

SOLUTIONS CIRCULAIRES & RECOMMANDATIONS

0. Eviter

**Équilibrer la valorisation du bois entre l'énergie et la matière** pour conserver le stockage du carbone et baisser les émissions de CO2 puisque la transformation du bois est moins consommatrice en énergie que celle des autres matériaux. Le bois d'œuvre (BO) et le bois industrie (BI) constituent, en France, un stock estimé à 380 MtCO<sub>2</sub>eq<sup>(1)</sup>.

**Maîtriser et baisser la demande en énergie (MDE)**. 50% à 60% de la demande en chaleur de l'ensemble du parc bâti peut être évitée grâce à la rénovation ou la construction neuve, ce qui permet d'économiser des ressources en biomasse.

1. Réduire

**Améliorer le rendement des équipements de chauffage** : le remplacement des équipements de chauffage individuels peu performants permettrait de réduire le besoin en bois énergie. Encourager le remplacement des équipements de chauffage individuels peu performants et accélérer l'installation de chaufferies à biomasse dans les secteurs industriel, agricole et tertiaire.

**Valoriser les déchets urbains et industriels stockés ou enfouis** pour éviter les émissions de gaz à effet de serre provoquées par leur décomposition. Selon la banque mondiale, les déchets solides étaient à l'origine de 5% des émissions globales en 2016, soit 1,6 milliards de tCO<sub>2</sub><sup>(2)</sup>.

**Maximiser l'utilisation des déchets de bois (fins de vies) dans les chaufferies à biomasse** afin de concilier la production de suffisamment de chaleur avec la préservation du puits carbone naturel de la France. L'utilisation de déchets de bois permettrait de préserver les forêts et de produire de 10 à 25 TWh de chaleur.

2. Solutions Amont/Aval

**Développer une sylviculture dynamique** afin d'augmenter le stock de bois disponible tout en préservant ce puits carbone naturel qui capte 15% des émissions brutes de GES annuelles françaises<sup>(3)</sup>. Les forêts françaises devraient croître de 25% d'ici 2050 dans l'hypothèse du scénario de sylviculture dynamique progressif proposé par l'IGN et le FCBA.

**Viser l'équilibre commercial (le modèle se base sur cette hypothèse) ou une balance commerciale positive pour le bois et les déchets**. S'assurer que le bois énergie provienne de forêts gérées durablement. Gérer de façon rigoureuse le gisement de déchets : la France devra importer 1Mt de CSR en 2050 pour satisfaire les besoins en gaz ainsi que ceux de l'industrie<sup>(4)</sup>.

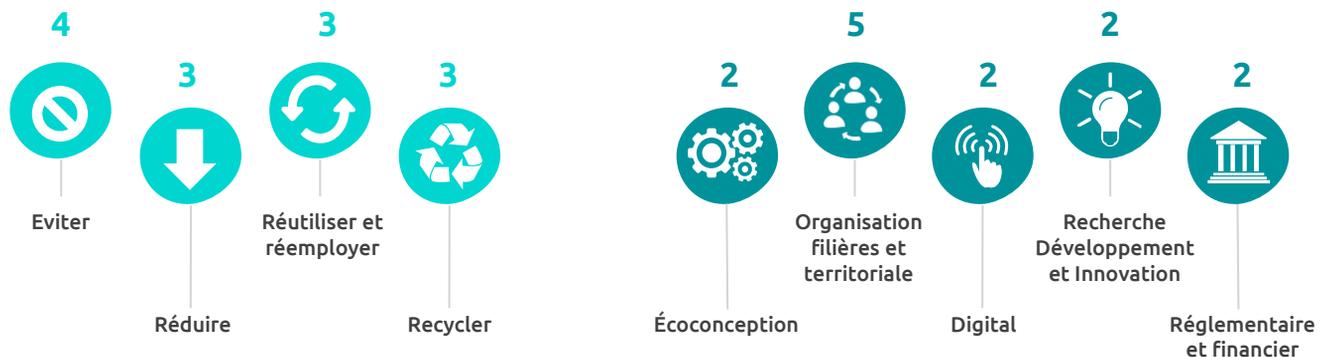
**Accélérer la recherche sur les technologies de valorisation des CSR et développer les installations de type lit fluidisé**. Cette technologie permet de réduire le taux de déchets imbrûlés grâce à l'utilisation d'un matériau inerte, souvent le sable, dont la mise en suspension par injection d'air multiplie les foyers indépendants. Il est nécessaire de réduire la taille de ces installations pour valoriser les CSR qui peuvent être produits au niveau local.

**Améliorer la performance de la filière de valorisation par le développement de l'écologie industrielle et territoriale** afin de permettre des prix compétitifs et d'exploiter, autant que possible, les déchets non-valorisés pour la production d'énergie. La filière de valorisation devra se réorganiser autour de nouveaux acteurs et faciliter la traçabilité des flux grâce à la digitalisation pour que leurs coproduits soient facilement récupérables.

**Accélérer la mise en œuvre des dispositifs de soutien pour réduire les nuisances dégagées par les procédés** : développer les technologies de filtration des fumées afin d'améliorer la qualité de l'air aux alentours des installations.

**Encourager les investissements sur les chaufferies à base de déchets**. Comme la plupart des projets financés mobilisent du bois énergie, ressource insuffisante pour répondre aux besoins énergétiques, il devient nécessaire d'augmenter les subventions pour les chaufferies qui mobilisent les CSR et les coproduits industriels. Ce type d'installation pourrait être déployé pour chauffer les résidences collectives urbaines et générer de la chaleur pour l'industrie.

SYNTHÈSE DES LEVIERS & EFFORTS CIRCULAIRES NÉCESSAIRES



(1) [INRAE 2017a], INRAE, Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique ?, Novembre 2017

(2) [LA BANQUE MONDIALE], Selon un nouveau rapport, la production mondiale de déchets augmentera de 70% d'ici 2050 si rien ne change rapidement, 2018

(3) [IGN INSTITUT] La Forêt au chevet du climat ?, 2021

(4) [ADEME 2021a], ADEME, Transition(s) 2050, Novembre 2021

## D13 - BIOMASSE GAZEUSE



## À RETENIR

**SNBC** : décarboner le gaz, actuellement fossile, indispensable dans l'industrie voire les transports et pratique pour le bâtiment.

**Enjeu ressources** : ressources pour produire le biométhane (solides, agricoles et déchets variés); béton et acier pour les installations

**Solutions circulaires** : du gaz décarboné peut être produit par méthanisation de déchets agricoles et urbains, vers 2030 par pyrogazéification de bois et déchets solides, et vers 2040 par gazéification hydrothermale de boues et effluents très liquides.

## DESCRIPTION, RISQUES ET ENJEUX

## 1. Importance du domaine pour une France bas carbone

La biomasse gazeuse correspond à l'ensemble des matières organiques qui peuvent être utilisées pour produire du gaz, précisément du biogaz, du biométhane et du gaz de synthèse. Le gaz ainsi fabriqué permet de générer de la chaleur et de l'électricité.

Sous exploitée à ce jour, la biomasse gazeuse demeure pourtant essentielle au succès de la SNBC afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre, renforcer la souveraineté énergétique de la France et créer des emplois peu délocalisables dans le secteur de l'énergie. En effet, son utilisation permet d'économiser des ressources critiques souvent nécessaires à l'électrification, d'améliorer la balance commerciale en comparaison avec le gaz fossile principalement importé et d'éviter l'émission de gaz à effet de serre.

## 2. Technologies, ressources et enjeux

La biomasse gazeuse peut être produite grâce aux procédés de méthanisation, de pyrogazéification et de gazéification hydrothermale à partir de différentes sources de matières organiques : les cultures agricoles, les effluents d'élevage, les coproduits de l'industrie agroalimentaire, les déchets urbains et industriels, et le bois<sup>(1)</sup>. Toutes ces ressources ne sont pas mobilisées simultanément dans chacun des procédés. Les coûts de méthanisation actuels sont de l'ordre de 90 €/MWh pour 300 Nm<sup>3</sup>/h, avec une cible de 60€/MWh en 2030 et une cible ultime de 30 à 50€/MWh. Le coût de la pyrogazéification actuellement estimé à 90-120€/MWh est à comparer aux prix du gaz sur les marchés début 2022<sup>(2)</sup>.

Compte tenu des surfaces disponibles limitées et des compétitions d'usage (matière, alimentaire, puits carbone), les forêts et les cultures sont les ressources les plus critiques. Les cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE), en s'intercalant dans le temps entre deux cultures alimentaires, allègent la compétition d'usage sur une surface définie.

Bien qu'ils soient limités, les effluents d'élevage, les coproduits de l'industrie agroalimentaire et les déchets urbains et industriels ne sont pas sujets à des risques importants. Ainsi, les procédés de nouvelle génération permettent de réutiliser des déchets non valorisés qui émettent inutilement du méthane dans l'atmosphère et polluent les écosystèmes.

## SYNTHÈSE DE LA CRITICITÉ

	INDEX GLOBAL	Réserves Disponibles, Volumes	Monopole extraction et transformation	Ressource stratégique & conflits d'usage	Substituabilité	Recyclabilité	Impacts sociaux et environnementaux
BOIS-FORÊTS	2,3	3	1	4	3	1	2
DECHETS	1,8	1	2	2	3	1	2
AGRICULTURE	2,5	3	1	4	3	1	3
BÉTON	2,0	3	2	1	3	1	2
ACIER	2,0	1	2	1	4	1	3
TOTAL DOMAINE	2,1	2,2	1,6	2,4	3,2	1	2,4

(1) [ADEME 2018b], ADEME, 54 exemples d'installation biomasse en entreprise, Septembre 2018

(2) [SENAT 2021a], Sénat, Rapport d'information, La méthanisation dans le mix énergétique, enjeux et impacts, Septembre 2021

## SOLUTIONS CIRCULAIRES &amp; RECOMMANDATIONS

**0. Éviter**

**Baisser la consommation de viande en France pour libérer des surfaces agricoles.** Les français consomment en moyenne 107g de viande par jour, qui requièrent 4280m<sup>2</sup> de surface agricole. Les scénarios Transition(s) 2050 envisagent des baisses de 10% à 66% d'ici 2050. Baisser de 30% la consommation carnée libérerait 20% de la surface agricole qui pourrait être mobilisée pour l'énergie<sup>(1)</sup>.

**Maîtriser et baisser la demande en énergie (MDE),** ici en chaleur. 50% à 60% de la consommation de chaleur de l'ensemble du parc bâti peut être évitée grâce à la rénovation ou la construction neuve, ce qui permet d'économiser des ressources en biomasse.

**1. Réduire**

**Encourager le développement des cultures intermédiaires** qui s'intercalent entre deux cultures alimentaires pour optimiser l'utilisation de la surface agricole utile sans obérer la production alimentaire et la reforestation.

**Valoriser les déchets urbains et industriels habituellement stockés ou enfouis** pour éviter les émissions de gaz à effet de serre provoquées par leur décomposition. Selon la banque mondiale, les déchets solides étaient à l'origine de 5% des émissions globales en 2016, soit 1,6 milliards de tCO<sub>2</sub><sup>(2)</sup>.

**Maximiser l'utilisation des déchets de bois dans le processus de pyrogazéification** afin de concilier la production de suffisamment de gaz renouvelable avec la préservation du puits de carbone naturel de la France.

L'utilisation des combustibles solides de récupération et des déchets de bois de fins de vies permettrait de produire un maximum de 60,1 TWh de gaz par pyrogazéification, sur les 115,5 TWh possibles en 2050, la part complémentaire étant assurée par du bois issu des forêts et des déchets de transformation de l'industrie du bois<sup>(1)</sup>.

**2. Réutiliser et Réemployer**

**Accélérer le développement des technologies** de pyrogazéification et de gazéification hydrothermale à base de déchets. Si la pyrogazéification est une technologie étudiée depuis 40 ans, elle persiste au stade de démonstrateur (TRL 7-8). Son industrialisation est espérée dans une dizaine d'années par les industriels et l'ADEME. La technologie de gazéification hydrothermale est également prometteuse puisqu'elle permet de valoriser des déchets qui ne peuvent pas retourner au sol comme les boues de STEP industrielles estimées à 950 Kt/an de matières sèches.

**Récupérer une partie du digestat issu de la méthanisation** dans le processus de gazéification hydrothermale afin de le valoriser en énergie. Le taux de mobilisation du digestat s'élève à 10% en raison de son utilisation pour fertiliser les terres.

**4. Solutions Amont/Aval**

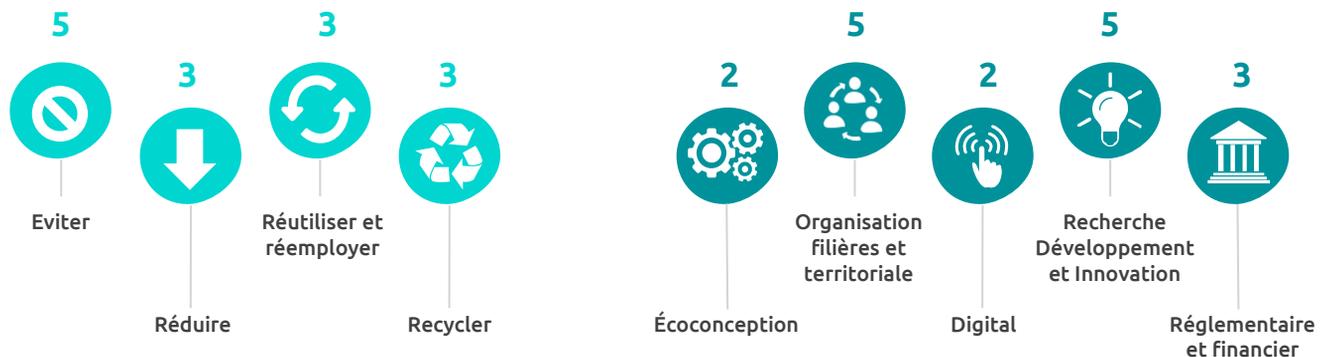
**Développer une sylviculture dynamique** afin d'augmenter le stock de bois disponible tout en préservant ce puits carbone naturel qui capte 15% des émissions de CO<sub>2</sub> annuelles françaises. Les forêts françaises devraient croître de 25% d'ici 2050 dans l'hypothèse du scénario de sylviculture dynamique progressif proposé par l'IGN et le FCBA<sup>(3)</sup>.

**Utiliser des outils numériques,** notamment de cartographie, pour faciliter la gestion de la forêt et développer l'agriculture de précision utile pour augmenter les rendements tout en limitant l'impact environnemental. Cette technologie permet d'améliorer la connaissance des sols et ainsi d'augmenter les rendements.

**Viser l'équilibre commercial (le modèle se base sur cette hypothèse) ou une balance commerciale positive pour le bois** et s'assurer qu'il provient de forêts gérées durablement. En effet, seuls 12% de la forêt mondiale est certifiée pour sa gestion durable<sup>(4)</sup>.

**Réorganiser les filières industrielles** pour que leurs coproduits soient facilement récupérables.

## SYNTHÈSE DES LEVIERS &amp; EFFORTS CIRCULAIRES NÉCESSAIRES



(1) [ADEME 2021a], ADEME, Transition(s) 2050, Novembre 2021, analyses Capgemini

(2) [LA BANQUE MONDIALE], Selon un nouveau rapport, la production mondiale de déchets augmentera de 70% d'ici 2050 si rien ne change rapidement, 2018

(3) [IGN INSTITUT] La Forêt au chevet du climat ?, 2021

(4) [PEFC] La gestion durable de la Forêt

## D14 - BÂTIMENT NEUF



## À RETENIR

**SNBC** : Baisser les émissions du parc bâti avec des constructions neuves très performantes.

**Enjeu Ressources** : avec l'augmentation des besoins, des pénuries localisées en béton pourront mettre sous tension certains chantiers tandis que des quantités considérables de déchets satureront les déchèteries autour des grandes densités urbaines.

**Solutions circulaires** : les pratiques de la déconstruction sélective doivent passer à l'échelle pour réemployer le béton sur le chantier ou le valoriser. En parallèle, la chaîne de valeur doit être réorganisée pour que le béton recyclé puisse être utilisé au sein même de la filière. Les outils de modélisation seront également précieux pour limiter le surdimensionnement et ainsi réduire le besoin en ressources.

## DESCRIPTION, RISQUES ET ENJEUX

## 1. Importance du domaine pour une France bas carbone

Le domaine du bâtiment consomme 44%<sup>(1)</sup> du besoin français en énergie finale. La décarbonation de ce dernier constitue donc un enjeu majeur de la SNBC. D'une part, les énergies renouvelables devront se substituer aux énergies fossiles pour décarboner le mix énergétique de la construction. D'autre part, la construction neuve, qui devra être encadrée pour assurer la transition énergétique, permettra de fléchir le besoin en énergie et ainsi économiser les ressources minérales et biomasses valorisées. Cette dynamique représente la construction moyenne de 360 000 logements et la déconstruction de 169 000 habitations chaque année<sup>(2)</sup>.

## 2. Technologies, ressources et enjeux

La construction neuve nécessite d'importants volumes de matières. Elle génère en outre, avec la déconstruction, des quantités considérables de déchets encore peu valorisés. En effet, la construction neuve résidentielle et tertiaire mobilise 53,2 millions de tonnes de matériaux chaque année<sup>(2)</sup>. Il s'agit principalement du béton, de l'acier et de l'aluminium, également consommés de façon croissante pour développer les infrastructures de la transition énergétique, mais aussi des terres cuites, plâtre, bois et plastiques.

La magnitude des tonnages concernés augmentera ainsi les pressions croissantes autour des grandes densités urbaines. D'une part, des pénuries localisées en béton pourront mettre sous tension certains chantiers. En effet, les granulats sont parfois peu accessibles au niveau local en raison des défis et des conflits liés à l'implantation des carrières<sup>(3)</sup>. De plus, le risque de rupture en approvisionnement d'aluminium sera réel en raison de la multiplication de la demande et de l'épuisement des réserves disponibles au niveau mondial. D'autre part, les quantités déjà importantes de déchets générées (17 Mt en 2020) augmenteront et satureront les infrastructures dédiées à leur stockage.

En plus des déchets générés, la construction neuve produit d'autres externalités négatives. Elle artificialise les terres ce qui réduit les puits de carbone naturels et appauvrit la biodiversité. A ce titre, 75% de l'artificialisation des sols provient de la construction de logements. D'autre part, la construction neuve est une activité polluante : la production des matériaux et les équipements employés sur le chantier émettent 65% des GES liés au cycle de vie d'un bâtiment neuf<sup>(2)</sup>.

## SYNTHÈSE DE LA CRITICITÉ

	INDEX GLOBAL	Réserves Disponibles, Volumes	Monopole extraction et transformation	Ressource stratégique & conflits d'usage	Substituabilité	Recyclabilité	Impacts sociaux et environnementaux
ALUMINIUM	2,8	4	2	3	3	1	4
ACIER	2,0	1	2	1	4	1	3
BETON	2,0	3	2	1	3	1	2
TOTAL DOMAINE	2,3	2,6	2	1,6	3,3	1	3

(1) [MTE], [Energie dans les bâtiments](#), 2021

(2) [ADEME 2021a], ADEME, [Transition\(s\) 2050](#), Novembre 2021

(3) [LES ECHOS] [La guerre mondiale du sable est déclarée](#), 2016

## SOLUTIONS CIRCULAIRES & RECOMMANDATIONS

### 0. Éviter

Favoriser la rénovation à la construction neuve pour diminuer le besoin en ressources, les déchets générés et prévenir l'artificialisation des surfaces.

Maîtriser l'évolution des surfaces par ménage et par personne pour diminuer le besoin en ressources, les déchets générés et prévenir l'artificialisation des surfaces. L'habitat collectif peut ainsi être développé en améliorant sa qualité, en particulier dans ses espaces partagés.

Optimiser l'usage du parc immobilier existant pour éviter la construction neuve. Par exemple, l'augmentation du taux d'occupation des bâtiments vacants, écoles et bureaux vides, permettrait d'économiser la construction de nombreux logements<sup>(1)</sup>.

### 1. Réduire

Développer l'usage de matériaux régénératifs biosourcés pour réduire les usages minéraux, limiter les dommages sur l'environnement et séquestrer le carbone<sup>(1)</sup>.

Optimiser le besoin en matériaux grâce à la modélisation pour améliorer le dimensionnement et ainsi diminuer les quantités d'aluminium, d'acier et de béton mobilisées. A ce titre, le Building Information Modeling (BIM) favorise une utilisation raisonnée des ressources et une traçabilité accrue des équipements et des composants.

Rallonger la durée de vie des bâtiments en améliorant leur transformabilité et leur réversibilité dès l'étape de conception<sup>(2)</sup>.

### 2. Réemployer et réutiliser

Faciliter la démontabilité des matériaux pour favoriser la rénovation lors de la conception des bâtiments.

Aménager le chantier pour réemployer le béton concassé issu de la déconstruction sur le même site.

Réaliser la construction neuve sur des friches industrielles et commerciales vieillissantes pour optimiser l'utilisation du foncier et freiner l'artificialisation des surfaces.

Pratiquer la déconstruction sélective et organiser les chantiers de déconstruction pour rendre possible le réemploi de matériaux issus des bâtiments.

### 3. Recycler

Pratiquer la déconstruction sélective et organiser les chantiers de déconstruction pour rendre possible le recyclage de l'ensemble des ressources<sup>(2)</sup>. Le passage à l'échelle du processus de dépose sélective des matériaux au moment de la déconstruction facilitera le tri des déchets et rendra le béton recyclé plus compétitif.

Adapter les filières de recyclage à la valorisation des déchets du bâtiment et organiser la filière de sorte à optimiser les flux de matière au niveau local.

### 4. Solutions Amont/Aval

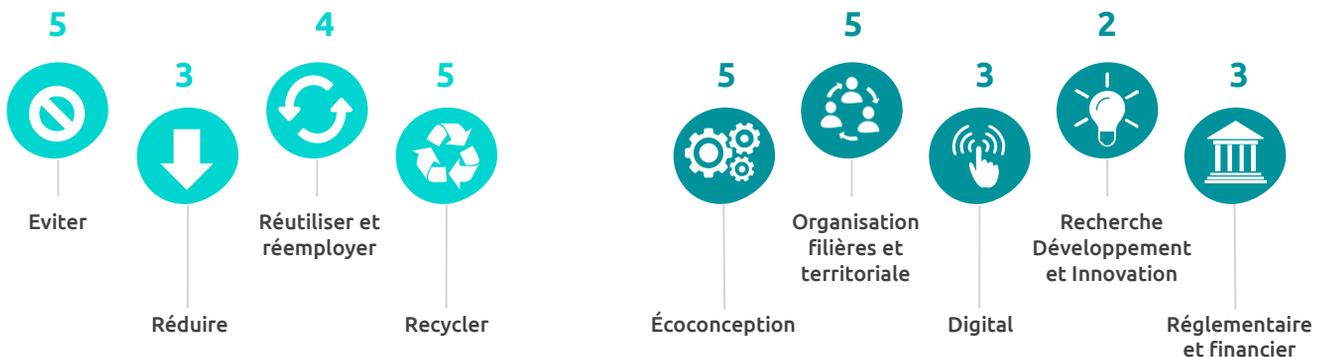
Faire évoluer les modes constructifs par l'apport de modularité pour mieux démonter et déconstruire. Les méthodes d'assemblage des produits doivent être modifiées.

Développer des solutions chez les assureurs pour mieux accompagner les acteurs de la construction dans la fiabilisation des nouvelles techniques constructives et le suivi de la qualité des matières recyclées.

Développer les points de collecte et de recyclage des déchets du bâtiment pour densifier le maillage territorial. Dans certaines régions, les points de collecte sont trop éloignés des chantiers ou sont en nombre insuffisant par rapport au nombre d'entreprises du bâtiment. En effet, les granulats recyclés manquent de compétitivité en raison du coût élevé de leur transport lié aux distances parcourues<sup>(3)</sup>.

Automatiser les centres de tri des déchets du bâtiment pour affiner le tri et ainsi améliorer leur valorisation.

## SYNTHÈSE DES LEVIERS & EFFORTS CIRCULAIRES NÉCESSAIRES



(1) [ADEME 2021a], ADEME, Transition(s) 2050, Novembre 2021

(2) [HQEGBC 2018a], Alliance HQE GBC, 15 leviers pour agir - Cadre de définition de l'économie circulaire dans le bâtiment, Janvier 2018

(3) [ADEME 2021d], ADEME, Etude de préfiguration de la filière REP Produits et matériaux de construction du secteur du bâtiment, Mars 2021

## D15 - BÂTIMENT RÉNOVATION



## À RETENIR

**SNBC** : Baisser les consommations de la grande majorité du parc bâti existant, en utilisant 40 à 100 fois moins de matériaux qu'en recourant à la construction neuve.

**Enjeu Ressources** : la construction neuve génère des externalités négatives (importants volumes de matières et de déchets, risques de pénuries localisées en béton et déchèteries saturées). La rénovation, limite les besoins en construction neuve mais demandera davantage de matériaux isolants biosourcés.

**Solutions circulaires** : Favoriser la rénovation, la rendre plus efficace par la modélisation pour réduire sa consommation en ressources et par l'écoconception. Diminuer son empreinte matière par le réemploi et l'utilisation de matériaux recyclés.

## DESCRIPTION, RISQUES ET ENJEUX

## 1. Importance du domaine pour une France bas carbone

Le domaine du bâtiment consomme 44% du besoin français en énergie finale<sup>(1)</sup>. La décarbonation de ce dernier constitue donc un enjeu majeur de la SNBC. D'une part, les énergies renouvelables devront se substituer aux énergies fossiles pour décarboner le mix énergétique de la construction. D'autre part, la rénovation permettra de baisser le besoin en ressources minérales et biomasses valorisées, sans pour autant artificialiser les sols comme cela peut être le cas de la construction neuve. Cette dynamique représentera la rénovation de 1,5 millions de logements entre 2020 et 2040<sup>(2)</sup>.

## 2. Technologies, ressources et enjeux

La rénovation complète consomme entre quarante et cent fois moins de ressources que la construction neuve (béton, acier, aluminium) selon que l'on considère les maisons individuelles, l'habitat collectif ou le tertiaire. Elle génère en outre dix fois moins de déchets que la déconstruction par unité de surface. La rénovation est donc une alternative plus sobre à la construction neuve. Toutefois, son impact n'est pas neutre : elle produit 36% des déchets du bâtiment<sup>(2)</sup>.

Par ailleurs, la rénovation consomme des matériaux de nature différente que la construction neuve. Elle nécessite ainsi moins de béton et d'acier, mais double les volumes d'isolants biosourcés mobilisés et consomme 845 millions de m<sup>3</sup> supplémentaires de bois<sup>(2)</sup>.

Réalisée à grande échelle, la rénovation mobilisera tout de même des volumes importants de matière. D'une part, des pénuries localisées en béton pourront mettre sous tension certains chantiers de rénovation lourde. En effet, les granulats sont parfois peu accessibles au niveau local en raison des conflits liés à l'implantation des carrières. D'autre part, les quantités de déchets générées avec la construction neuve augmenteront et satureront les infrastructures dédiées à leur stockage.

## SYNTHÈSE DE LA CRITICITÉ

	INDEX GLOBAL	Réserves Disponibles, Volumes	Monopole extraction et transformation	Ressource stratégique & conflits d'usage	Substituabilité	Recyclabilité	Impacts sociaux et environnementaux
ALUMINIUM	2,8	4	2	3	3	1	4
ACIER	2,0	1	2	1	4	1	3
BETON	2,0	3	2	1	3	1	2
TOTAL DOMAINE	2,3	2,6	2	1,6	3,3	1	3

(1) [MTE], [Energie dans les bâtiments](#), 2021

(2) [ADEME 2021a], ADEME, Transition(s) 2050, Novembre 2021

## SOLUTIONS CIRCULAIRES & RECOMMANDATIONS

Les solutions circulaires à mettre en place en rénovation sont en grande partie semblables à celles de la construction neuve. En effet les deux situations comportent un processus de déconstruction-construction, plus léger mais non moins important dans le cas de la rénovation.

### 0. Éviter

**Favoriser la rénovation** et éviter la construction neuve partout où cela est possible. La rénovation utilise 40 à 100 fois moins de matières que la construction neuve (acier, aluminium, béton). Au niveau national, cela amène à infléchir la structuration et le modèle d'affaire du secteur de la construction, y compris dans les grandes entreprises, avec une activité plus franchement poussée vers la rénovation à l'échelle industrielle.

### 1. Réduire

**Améliorer la transformabilité et la réversibilité des bâtiments** entre usage tertiaire et usage habitation dès l'étape de conception<sup>(1)</sup>, ce qui diminue le besoin en travaux de rénovation et en ressources pour leur conversion.

**Utiliser les matériaux régénératifs biosourcés** : la rénovation de l'isolation, de la charpente, des ouvrants et autres équipements du bâti avec de tels matériaux limite les dommages sur l'environnement et permet de séquestrer le carbone.

### 2. Réemployer et recycler

**Le premier des réemplois est celui des bâtiments et des quartiers existants.** Les rénover réduit le nombre de logements vacants car inadaptés, réduit le besoin en construction neuve, redensifie le territoire et limite l'artificialisation des surfaces.

**Anticiper la démontabilité des matériaux** pour faciliter la rénovation, dès la conception initiale des bâtiments et des équipements.

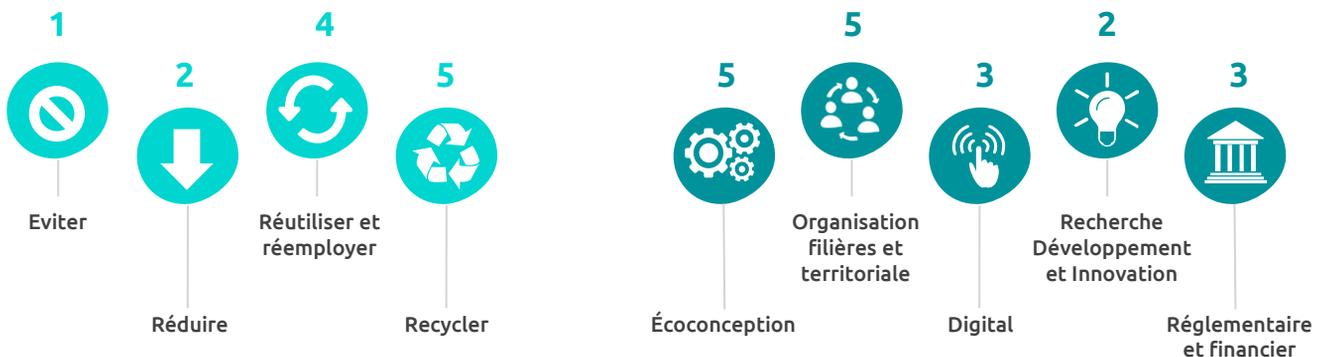
**Organiser soigneusement les chantiers de rénovation** pour permettre la déconstruction sélective, améliorer le tri à la source, garder en bon état les matériaux et les équipements récupérés et augmenter la valeur de leur réemploi ou de leur recyclage, ailleurs ou sur place.

**Sur les chantiers de rénovation lourde, aménager le chantier de rénovation pour réemployer le béton** concassé issu de la déconstruction sur le même site.

### 3. Solutions Amont/Aval

**Développer les points de collecte et de recyclage des déchets du bâtiment** pour densifier le maillage territorial. Le maillage devra être particulièrement fin et adapté au nombre de rénovations, qui auront lieu sur tout le territoire et dans toutes les zones d'habitation et d'activité, dans une quantité trois à cinq fois supérieure à celle des constructions neuves, mais avec des volumes unitaires de matériaux déconstruits inférieurs<sup>(2)</sup>.

## SYNTHÈSE DES LEVIERS & EFFORTS CIRCULAIRES NÉCESSAIRES



(1) [HQEGBC 2018a], Alliance HQE GBC, 15 leviers pour agir - Cadre de définition de l'économie circulaire dans le bâtiment, Janvier 2018

(2) [ADEME 2021a], Transition(s) 2050, analyse Capgemini, selon le type de scénario qui sera adopté sur la période 2020-2050

# Annexe 2 – Fiches ressources

R1 - Lithium

R2 - Cobalt

R3 - Platinoïdes

R4 - Terres Rares

R5 - Cuivre

R6 - Graphite

R7 - Silicium

R8 - Aluminium

R9 - Nickel

R10 - Acier

R11 - Béton

R12 - Bois-forêts

R13 - Agriculture

R14 - Déchets

## R1 - LITHIUM



## À RETENIR

**Rôle dans la SNBC :** le lithium est un métal principalement utilisé dans les batteries pour l'électrification de la mobilité.

**Enjeu ressource :** une demande mondiale treize fois supérieure d'ici 2050, une dépendance envers un nombre restreint d'acteurs, et l'inexistence du recyclage, risquent d'aboutir à un manque d'accès ou à une élévation des prix de cette ressource.

**Solutions majeures :** investir dans les potentiels miniers disponibles, favoriser des technologies de batteries)moins consommatrices en lithium, et recycler cette ressource efficacement dans toutes les filières.

## DESCRIPTION, RISQUES ET ENJEUX

## 1. Impact dans la SNBC

Le lithium est l'élément incontournable des batteries : il entre dans la composition des électrolytes. 71% de sa consommation mondiale est d'ailleurs destinée à la fabrication des batteries et l'AIE estime que le besoin annuel en lithium sera multiplié par treize d'ici 2040<sup>(1)</sup>.

## 2. Présentation et utilité

A l'origine utilisé dans la fabrication de verreries, céramiques, graisses lubrifiantes ou de l'aluminium, le lithium est désormais principalement mobilisé pour produire des piles et des batteries.<sup>(2)</sup> Il se distingue par sa légèreté et sa forte capacité à libérer l'un de ses électrons, ce qui lui permet de facilement générer un courant électrique. L'électrolyte est constitué d'ions de lithium (Li+), d'où le nom de lithium-ion couramment utilisé. Il peut aussi être présent dans les cathodes des batteries.

## 3. Contexte de marché, enjeux et criticité

Estimées à 21 millions de tonnes<sup>(2)</sup>, les réserves en lithium seront insuffisantes pour répondre à la demande croissante après 2050. Les réserves disponibles sont surtout concentrées à 60% en Amérique latine (Argentine, Bolivie, Chili)<sup>(3)</sup>.

Au premier niveau de la chaîne de valeur, la production minière est contrôlée à 80% par l'Australie, l'Argentine et le Chili<sup>(3)</sup>. La Bolivie, qui détient une grande partie des réserves de lithium dans le désert du Salar, se voit dans l'incapacité d'extraire cette ressource à cause des conflits sur la gestion de l'eau. Cette dernière est en quantité insuffisante pour subvenir à la fois aux besoins des communautés locales et aux industries minières<sup>(4)</sup>. Sous le contrôle chinois à hauteur de 58%, le raffinage du lithium est une activité stratégique pour la Chine puisqu'elle permet de vendre des batteries au monde entier<sup>(3)</sup>. Finalement, le lithium n'est pratiquement pas recyclé au dernier niveau de la chaîne de valeur.

Non seulement le lithium va devenir difficilement accessible pour fabriquer des batteries, mais il restera également très carboné tant que la Chine le raffinerait à partir d'énergies fossiles alors que nous l'utilisons pour décarboner nos activités.

Le lithium est difficilement substituable, et la quasi-totalité des batteries actuelles utilisent cette ressource. De nouvelles technologies alternatives voient le jour comme les batteries sodium-ion<sup>(5)</sup>. Toutefois, elles ne sont pas suffisamment développées pour rivaliser avec les batteries au lithium.

Ainsi, la ressource présente une haute criticité : elle est peu disponible compte tenu du monopole de quelques pays exercé sur ce métal, et aucune technologie n'est suffisamment mature pour s'y substituer.

## SYNTHÈSE DE LA CRITICITÉ



(1) [IEA 2021a], IEA, The Role of Critical Materials in Clean Energy Transitions, Mai 2021

(2) [IFPEN], [Le lithium dans la transition énergétique : au-delà de la question des ressources](#), 2021

(3) [INEC 2022] Rapport Figure 20 – Concentration des pays acteurs dans l'extraction et la première transformation des ressources minérales

(4) [LIBERATION] [Chili : le «salar» s'alarme du boom du lithium](#), 2019

(5) [CNRS] [Des batteries au sodium à recharge ultra-rapide](#), 2019

## SOLUTIONS CIRCULAIRES &amp; RECOMMANDATIONS

**0. Eviter**

Encourager l'économie de la fonctionnalité par l'augmentation des mobilités douces (vélos) ou des transports en commun (train, métro, bus), seulement utilisés par 24% des français pour se rendre à leur travail. Ce chiffre a tendance à augmenter dans les zones très urbanisées<sup>(1)</sup>.

**1. Réduire**

Favoriser des technologies de batteries moins consommatrices en lithium : les batteries LFP réduisent d'un facteur deux la consommation de lithium par rapport aux batteries NMC 333. Les batteries sans lithium peuvent également être utilisées mais des investissements plus conséquents en R&D sont nécessaires pour développer des batteries peu coûteuses qui réduisent ou évitent l'utilisation de cette ressource<sup>(2)</sup>. Les batteries sodium-ion (au sel de sodium) sont une technologie alternative en développement pour éliminer le lithium de l'électrolyseur des batteries.

Augmenter la durée de vie des batteries pour en réduire le nombre nécessaire en circulation. Les batteries LFP permettent d'atteindre 2000 cycles de charges/décharges sans perte de performance, alors que les batteries NMC les atteignent difficilement.<sup>(2)</sup> Des investissements sont là encore nécessaires pour baisser les coûts.

Reconditionner/réparer les batteries : changer les cellules défectueuses pour ne pas jeter celles qui sont encore fonctionnelles. Par exemple, l'objectif du projet Re-factory de Renault est d'atteindre 20 000 réparations d'ici 2030<sup>(3)</sup>.

Ecoconcevoir le produit pour faciliter sa maintenance et sa réparabilité, permet de baisser les coûts de réparation, d'allonger sa durée de vie, et d'empêcher la consommation d'une nouvelle batterie entière.

**2. Réutiliser et réemployer**

Réemployer les batteries de la mobilité dans des applications stationnaires lorsque leur autonomie est devenue insuffisante pour gérer l'intermittence des énergies renouvelables et stabiliser les réseaux de basse tension électriques qui les relient. La durée de vie des batteries est ainsi allongée et moins de batteries neuves sont nécessaires.

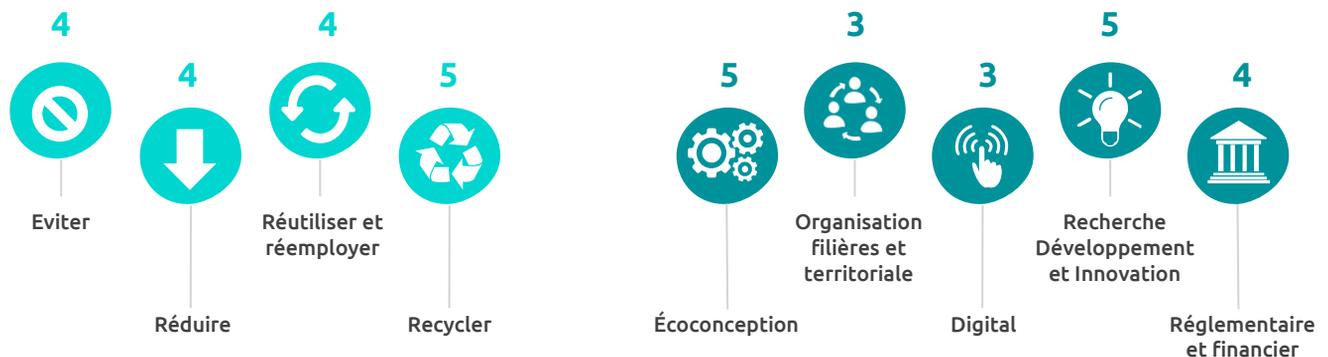
**3. Recycler**

Recycler le lithium dans toutes les filières : le taux de recyclage du lithium est inférieur à 1% toutes filières confondues<sup>(4)</sup>. Il existe quelques entreprises comme Recupyl, qui recyclent des piles et des accumulateurs pour obtenir des poudres métalliques, dont des poudres de lithium. Le constructeur Renault a annoncé la création d'un consortium avec Veolia et Solvay, pour recycler le lithium des batteries, afin de le réutiliser en boucle courte dans de nouvelles batteries<sup>(2)</sup>.

**4. Solutions Amont/Aval**

Investir dans les potentiels miniers disponibles afin de sécuriser les approvisionnements français et de limiter la dépendance envers les autres pays. Un gisement important de saumures hydrothermales a été découvert dans la nappe de Trias en Alsace du nord, et contiendrait 1 million de tonnes de lithium<sup>(5)</sup>. Exploiter ces gisements permettra de fabriquer des batteries. Développer une activité d'extraction en France renforcerait la souveraineté énergétique.

## SYNTHÈSE DES LEVIERS &amp; EFFORTS CIRCULAIRES NÉCESSAIRES



(1) [INSEE] [La voiture reste majoritaire pour les déplacements domicile-travail, même pour de courtes distances](#), 2021

(2) [IEA 2021a], IEA, [The Role of Critical Materials in Clean Energy Transitions](#), Mai 2021

(3) [RENAULT GROUP] [Groupe Renault, Veolia et Solvay : les batteries d'aujourd'hui seront celles de demain](#), 2021

(4) ANALYSE CAPGEMINI – IFPEN, BRGM, UNEP

(5) [BRGM] [Le lithium \(Li\) – éléments de criticité](#), 2020

## R2 - COBALT



## À RETENIR

**Rôle dans la SNBC** : le cobalt est un métal principalement utilisé dans l'électrification de la mobilité - véhicules électriques et batteries. Il se retrouve également dans les éoliennes.

**Enjeu ressource** : risque de pénurie en raison d'une demande multipliée par 6 d'ici 2050, des réserves limitées, et du monopole chinois exercé sur le cobalt.

**Solutions majeures** : investir dans les potentiels miniers disponibles, favoriser des technologies de batteries moins consommatrices de cobalt, et mettre en place le recyclage des batteries.

## DESCRIPTION, RISQUES ET ENJEUX

## 1. Impact dans la SNBC

Le cobalt est un composant important utilisé dans les cathodes des batteries lithium-ion et nickel-manganèse-cobalt (NMC). Principalement destiné à la fabrication des batteries, 80% de sa consommation mondiale, il est aussi présent dans les aimants des turbines d'éoliennes<sup>(1)</sup>. D'après l'AIE, le besoin mondial en cobalt sera au moins multiplié par six d'ici 2040<sup>(2)</sup>.

## 2. Présentation et utilité

Métal incontournable dans de nombreux domaines stratégiques comme l'aérospatial et la défense, le cobalt se distingue par son point de fusion élevé (1495°C) et sa capacité à conserver sa résistance ainsi que ses propriétés magnétiques à de fortes températures. Grâce à ces caractéristiques, il est par exemple utilisé en superalliage dans les turbines à gaz. Dans le secteur des batteries, le cobalt est apprécié parce qu'il stabilise le cycle de charge et de décharge des batteries, ce qui augmente leur durée de vie et leur capacité.

Le marché se divise principalement en trois grandes familles de batteries. Très utilisées pour leur haut rapport qualité/prix, les batteries nickel-manganèse-cobalt (NMC) constituent 70% du parc des véhicules légers. Elles sont suivies par les batteries nickel-cobalt-aluminium (NCA) qui équipent 20% de ce parc, puis des batteries au lithium-fer-phosphate (LFP) qui, peu répandues dans ce secteur, sont toutefois prédominantes sur le marché des véhicules lourds<sup>(2)</sup>.

Si les batteries à base de cobalt équipent aujourd'hui 90% des véhicules légers, leur part de marché devrait se réduire à 60% en 2040<sup>(2)</sup> : le marché sera alors constitué de batteries moins consommatrices en cobalt comme les NMC811 et de nouvelles technologies sans cobalt telles que les LFP ou les batteries ion-sodium.

## 3. Contexte de marché, enjeux et criticité

Les réserves accessibles de cobalt sont particulièrement faibles par rapport à la demande mondiale qui double tous les dix ans. Au rythme d'exploitation actuel, le gisement accessible serait entièrement consommé en une cinquantaine d'années.

Avec 70% de l'extraction du cobalt réalisée en République Démocratique du Congo (RDC), puis 10% supplémentaires répartis entre l'Australie et la Russie<sup>(3)</sup>, c'est presque la totalité de l'extraction mondiale qui est concentrée dans trois pays. Les conflits internes en RDC fragilisent la filière du cobalt toute entière. La Chine, quant à elle, contrôle 63% du raffinage mondial de cette ressource<sup>(3)</sup>.

En outre, les impacts sociaux et environnementaux du cobalt sont particulièrement mauvais. Au global, la criticité du cobalt est forte compte tenu des faibles réserves disponibles et de l'oligopole exercé par quelques pays sur ce métal.

## SYNTHÈSE DE LA CRITICITÉ



(1) [IFPEN], [Le cobalt dans la transition énergétique : quels risques d'approvisionnement ?](#), 2020

(2) [IEA 2021a], IEA, [The Role of Critical Materials in Clean Energy Transitions](#), Mai, 2021

(3) [INEC 2022] Rapport Figure 20 – Concentration des pays acteurs dans l'extraction et la première transformation des ressources minérales



## SOLUTIONS CIRCULAIRES & RECOMMANDATIONS

### 0. Eviter

**Encourager l'économie de la fonctionnalité** par l'augmentation des mobilités douces (vélos) ou des transports en commun (train, métro, bus), seulement utilisés par 24% des français pour se rendre à leur travail. Ce chiffre a tendance à augmenter dans les zones très urbanisées<sup>(1)</sup>.

**Équilibrer la part des technologies de batteries du parc** entre celles au cobalt (NMC, NCA), et celles à base d'autres métaux (LFP, sodium-ion) pour ne pas dépendre d'une seule ressource, sans surconsommer les autres telles que le phosphate et le sodium. Il est également nécessaire d'accélérer la recherche, l'innovation et l'industrialisation sur les technologies sodium-ion ou all solid state battery (ASSB).<sup>(2)</sup> Par exemple, le constructeur Nissan a annoncé travailler sur une nouvelle technologie ASSB sans cobalt et plus efficace.

### 1. Réduire

**Favoriser des technologies de batteries moins consommatrices en cobalt** : les batteries NMC 811 réduisent d'un facteur trois la consommation de cobalt par rapport aux batteries NMC 333.<sup>(2)</sup> Les batteries sans cobalt peuvent également être utilisées mais des investissements plus conséquents en R&D sont nécessaires pour développer des batteries peu coûteuses qui réduisent ou évitent l'utilisation de cette ressource. Il est nécessaire à la fois de financer la R&D et de réglementer avec une visibilité à long terme la baisse de contenu en cobalt par capacité de batterie.

**Augmenter la durée de vie des batteries** pour en réduire le nombre nécessaire en circulation. Les batteries LFP permettent d'atteindre 2000 cycles de charges/décharges sans perte de performance<sup>(2)</sup>, alors que les batteries NMC les atteignent difficilement. Des investissements sont là encore nécessaires pour baisser les coûts.

**Reconditionner/réparer les batteries** : changer les cellules défectueuses pour ne pas jeter celles qui sont encore fonctionnelles. Par exemple, l'objectif du projet Re-factory de Renault est d'atteindre 20 000 réparations d'ici 2030<sup>(3)</sup>.

**Ecoconcevoir le produit pour faciliter sa maintenance et sa réparabilité**, c'est lui permettre de baisser les coûts de réparation, d'allonger sa durée de vie, et d'empêcher la consommation d'une nouvelle batterie entière.

### 2. Réutiliser et réemployer

**Réemployer les batteries de la mobilité dans des applications stationnaires lorsque leur autonomie est devenue insuffisante** pour gérer l'intermittence des énergies renouvelables et stabiliser les réseaux de basse tension électrique qui les relient. La durée de vie des batteries est ainsi allongée et moins de batteries neuves sont nécessaires.

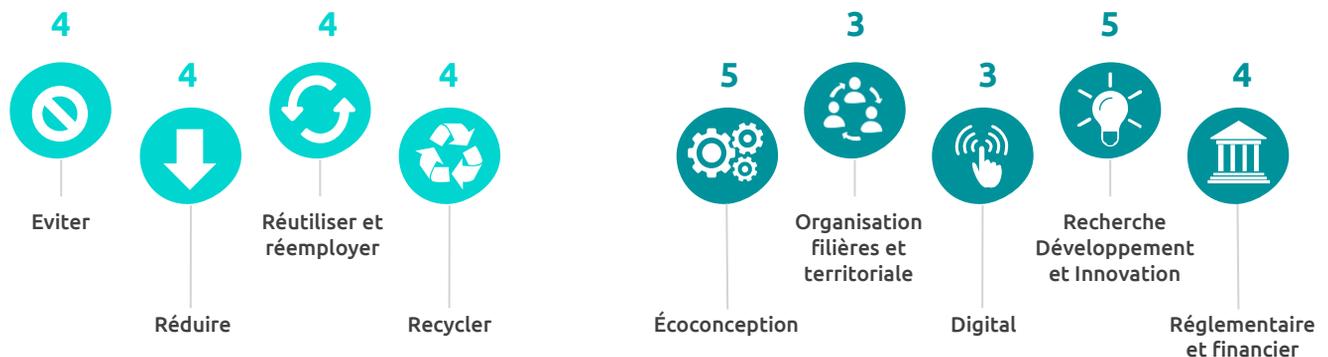
### 3. Recycler

**Recycler le cobalt dans toutes les filières**. Le taux de recyclage du cobalt s'élève à 52% et pourrait être amélioré<sup>(4)</sup>. Par exemple, la société Aérométal est spécialisée dans la valorisation des métaux spéciaux purs. Elle recycle le cobalt des alliages et des superalliages issus des déchets des industries de l'aéronautique et de la défense. En outre, le constructeur Renault a annoncé la création d'un consortium avec Veolia et Solvay pour fabriquer des batteries neuves avec un minimum de 95% de cobalt recyclé<sup>(3)</sup>.

### 4. Solutions amont/aval

**Investir dans les potentiels miniers** disponibles afin de sécuriser les approvisionnements français et de **limiter la dépendance** envers les autres pays.

## SYNTHÈSE DES LEVIERS & EFFORTS CIRCULAIRES NÉCESSAIRES



(1) [INSEE] [La voiture reste majoritaire pour les déplacements domicile-travail, même pour de courtes distances](#), 2021

(2) IEA 2021a], IEA, [The Role of Critical Materials in Clean Energy Transitions](#), Mai, 2021

(3) [RENAULT GROUP] [Groupe Renault, Veolia et Solvay : les batteries d'aujourd'hui seront celles de demain](#), 2021

(4) ANALYSE CAPGEMINI – IFPEN, BRGM, UNEP

## R3 - PLATINOÏDES



## À RETENIR

**Rôle dans la SNBC :** les platinoïdes sont utilisés comme catalyseurs dans les pots d'échappement classiques, dans les piles à combustible pour les véhicules hydrogène et dans les électrolyseurs pour la production d'hydrogène.

**Enjeu ressource :** les gisements sont concentrés dans trois pays (Afrique du Sud, Russie et Zimbabwe) et les réserves disponibles sont en mesure d'assurer une autonomie mondiale d'une trentaine d'années.

**Solutions majeures :** la disparition des véhicules à moteur thermique peut réduire la demande en platinoïdes mais c'est surtout l'industrialisation des procédés de recyclage qui permettra de résoudre le problème de disponibilité de cette ressource.

## DESCRIPTION, RISQUES ET ENJEUX

## 1. Impact dans la SNBC

Les platinoïdes vont jouer un rôle important dans la décarbonation de la mobilité et des procédés industriels. Utilisés comme catalyseurs dans des piles à combustible (PAC), ils entreront dans la composition des véhicules lourds, bus et cars à hydrogène, qui représenteront jusqu'à 15 % de ces parcs de véhicules en 2050 selon les scénarios Transition(s) 2050 de l'ADEME. Ils entrent aussi dans la composition des électrolyseurs, dont une à plusieurs dizaines de GW existeront pour produire l'hydrogène à destination de la demande croissante de l'industrie, de la production de gaz de réseau décarboné et des transports. Sur le périmètre étudié des PAC pour véhicules et de la production d'hydrogène par électrolyse, la demande en platinoïdes sera multipliée par 200 entre aujourd'hui et 2050. Actuellement les platinoïdes interviennent dans la fabrication du pot catalytique des véhicules conventionnels dont la disparition progressive est attendue. Néanmoins, la fabrication de PAC et d'électrolyseurs nécessite plus de platinoïdes que celle des pots catalytiques.

## 2. Présentation et utilité

La famille des platinoïdes se compose d'éléments aux nombreuses propriétés et difficilement remplaçables : le platine(Pt), le palladium(Pd), le rhodium(Rh), le ruthénium(Ru), l'iridium(Ir) et l'osmium(Os). Bien que ces éléments possèdent des propriétés chimiques similaires, ils se distinguent par leurs propriétés physiques très différentes.

Utilisé dans les pots catalytiques du secteur automobile pour réduire l'émission de particules toxiques<sup>(1)</sup>, le platine est également apprécié dans l'industrie chimique, électronique et dans la bijouterie<sup>(2)</sup>. Dans l'hydrogène, il intervient dans la composition des PAC et des électrolyseurs<sup>(3)</sup>.

Plus rares, le ruthénium, l'iridium et l'osmium sont utilisés en alliage pour des usages de micro niches comme dans la fabrication de valves cardiaques artificielles<sup>(3)</sup>.

## 3. Contexte de marché, enjeux et criticité

Estimées à 14 600 tonnes<sup>(4)</sup>, les réserves mondiales disponibles en platinoïdes seront insuffisantes pour répondre à la demande. En effet, la production annuelle mondiale, estimée à 650 tonnes annuelles, va s'accélérer à mesure que les technologies de l'hydrogène se développeront. Toutefois, cette évaluation des réserves reste imprécise puisque certains pays, dont la Chine, ne publient pas les réserves présentes sur leur territoire.

Par ailleurs, de nature oligopolistique, l'extraction des platinoïdes repose entre les mains de trois acteurs : l'Afrique du Sud qui représente 68% de l'extraction mondiale, suivie de la Russie (17%) puis du Zimbabwe (9%)<sup>(5)</sup>. Si l'extraction de cette ressource est très carbonée, l'enjeu se situe principalement au niveau de la disponibilité en platine, remise en question par l'instabilité économique de l'Afrique du Sud. Finalement, le réemploi direct du platine utilisé dans les PAC est impossible en raison de la dégradation du support et du phénomène de coalescence, regroupement des nanoparticules de platine, lors de la réaction électrochimique. Il est cependant possible de le recycler grâce aux procédés de pyrométallurgie et d'hydrométallurgie.

## SYNTHÈSE DE LA CRITICITÉ



(1) [BRGM] [Impacts des normes antipollution sur la demande mondiale en platinoïdes : cas du platine, du palladium et du rhodium](#), 2018

(2) [BRGM], [Panorama 2012 du marché des platinoïdes](#) 2014

(3) [L'USINE NOUVELLE] [Haro sur le platine](#), 2019

(4) [BRGM] [Panorama 2012 du marché des platinoïdes](#), 2012

(5) [INEC 2022] Rapport Figure 20 – Concentration des pays acteurs dans l'extraction et la première transformation des ressources minérales

## SOLUTIONS CIRCULAIRES & RECOMMANDATIONS

### 0. Éviter

**Encourager l'économie de fonctionnalité** par le transfert de mobilité vers les mobilités douces (vélos) ou les transports en commun (train, métro, bus), qui sont uniquement utilisés par 24 % des français pour se rendre à leur travail. Ce chiffre a tendance à augmenter dans les zones très urbanisées<sup>(1)</sup>.

**Substituer les platinoïdes par d'autres ressources** comme le nickel ou le cuivre dans les composants électroniques même si les performances s'en retrouvent dégradées. L'or peut également se substituer aux platinoïdes mais son prix reste un frein à son utilisation. Un projet européen, *CritCat* (2019), tend à développer la substitution des platinoïdes par des nanoparticules de métaux de transition dans les processus chimiques et les technologies hydrogène<sup>(2)</sup>.

**Réserver l'utilisation des platinoïdes dans des usages stratégiques** : un tiers du platine est dédié au secteur de bijouterie et de la joaillerie<sup>(3)</sup>.

**Privilégier les technologies hydrogène dans les secteurs où elles apportent un réel avantage** : les véhicules hydrogène peuvent stocker plus d'énergie que les véhicules électriques. Ils jouissent donc d'une meilleure autonomie qui, associé à un ravitaillement pratique, permet de réduire le temps de transport des marchandises. Il est donc préférable d'utiliser l'hydrogène pour le transport de marchandises plutôt que de généraliser son utilisation dans des véhicules individuels qui pourront opter pour des technologies de batteries électriques.

**Équilibrer la technologie hydrogène et électrique à batterie dans la mobilité** pour limiter la pression sur les platinoïdes.

### 1. Réduire

**Réduire la consommation des platinoïdes dans les composants**, en particulier dans les pots catalytiques. Un projet européen, *Partial-PGMs* (2019), porte l'ambition de réduire de 35% l'utilisation des platinoïdes<sup>(4)</sup>. Il vise notamment à augmenter la performance des pots catalytiques et à remplacer les platinoïdes par des métaux de transition.

**Substituer une partie du platine par le palladium et le rhodium** : le palladium est l'élément de la famille des platinoïdes le plus proche du platine. Le rhodium possède des propriétés physiques plus éloignées mais peut constituer une piste intéressante de recherche.

**Favoriser des technologies d'électrolyseurs moins consommatrices en ressources** : selon l'AIE, les électrolyseurs alcalins n'utilisent aucune matière critique comme les platinoïdes présent dans les électrolyseurs PEM.

### 2. Réutiliser et réemployer

**Industrialiser les procédés de recyclage du platine**. Les procédés de recyclage par pyrométallurgie et hydrométallurgie montrent des premiers résultats prometteurs avec un rendement de 98%<sup>(5)</sup>. Puisque les rendements obtenus en laboratoire sont excellents, l'industrialisation de ces technologies permettrait de jouir d'un gisement secondaire important.

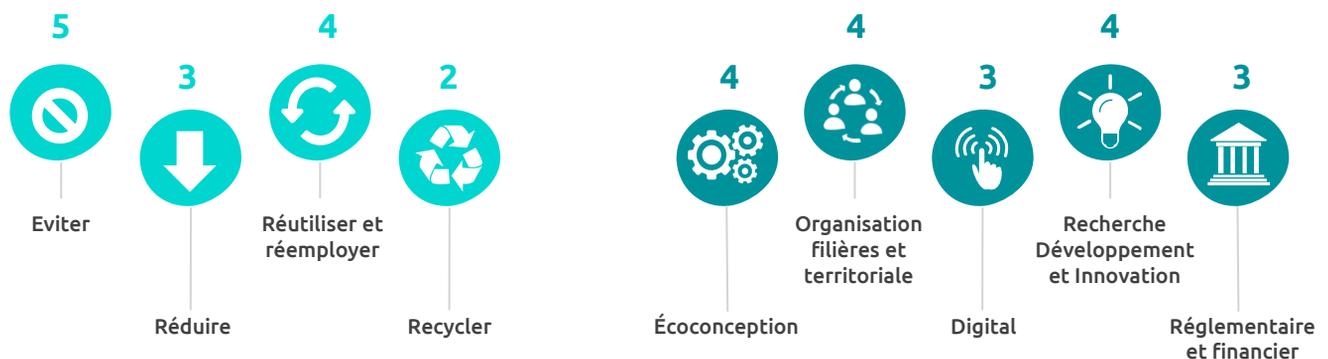
### 3. Recycler

**Augmenter le taux de récupération des platinoïdes pour disposer d'un gisement secondaire plus important**. Le taux de recyclage du platine s'élève à 76% au niveau mondial<sup>(6)</sup>. Pourtant, seulement 29% des platinoïdes utilisés sont issus du gisement secondaire<sup>(5)</sup>. Ainsi, le gisement secondaire en platinoïdes est insuffisant pour satisfaire la demande ce qui pourrait être résolu par l'amélioration du taux de recyclage. Une solution serait donc de consolider la filière de valorisation en s'appuyant sur le savoir-faire du secteur automobile. En effet, le recyclage du platine contenu dans les pots catalytiques est mature et des procédés mis en œuvre pourraient être appliqués dans les autres filières, notamment celle de l'hydrogène.

### 4. Solutions amont/aval

**Ouvrir des mines et des carrières en France** pour limiter la dépendance envers les autres pays. Les carrières d'Imerys Ceramics France dans le Lot et la Dordogne fournissent 44% du silicium (c-Si et a-Si) de fabricants et transformateurs français (Ferropem silicium métal, Voltec). Historiquement, la France produisait du gallium (CIGS) raffiné dans les mines de Salindres (Gard) et de Noyelles-Godault (Pas-de-Calais), qui ont fermé au cours des années 2000.

## SYNTHÈSE DES LEVIERS & EFFORTS CIRCULAIRES NÉCESSAIRES



(1) [INSEE] [La voiture reste majoritaire pour les déplacements domicile-travail, même pour de courtes distances](#), 2021

(2) [CRITCAT] [Rational design of future catalyst materials](#), 2016

(3) [BRGM] [Platinoïdes : le BRGM publie un nouveau panorama sur les métaux du groupe du platine](#), 2014

(4) [PARTIAL-PGMs] [S&T Targets](#)

(5) [CAPGEMINI ENGINEERING] Entretien avec Lucien Duclos, PhD – [Lien thèse](#)

(6) ANALYSE CAPGEMINI – IFPEN, BRGM, UNEP

# R4 - TERRES RARES



## À RETENIR

**Rôle dans la SNBC :** les terres rares sont des métaux essentiellement utilisés dans l'éolien offshore, qui permet de produire de façon plus constante et plus d'heures par an que l'éolien terrestre.

**Enjeu ressource :** un accroissement de la demande ainsi qu'un quasi monopole chinois risquent de créer des conflits et de placer l'Europe dans une situation difficile (prix élevés, pénuries).

**Solutions majeures :** mettre en place un recyclage à grande échelle des terres rares et s'orienter vers des technologies sans terres rares.

## DESCRIPTION, RISQUES ET ENJEUX

### 1. Impact dans la SNBC

Les terres rares sont essentiellement utilisées dans les aimants nécessaires aux éoliennes en mer. Dans les scénarios N1 et N2 de la SNBC et de RTE, l'éolien offshore produit 20 à 25% de l'électricité française en 2050, à égalité ou en seconde place derrière le nucléaire<sup>(1)</sup>. Les premiers parcs sont mis en place actuellement en France, alors qu'il en existe de nombreux et de grande taille depuis une dizaine d'années en Mer du Nord.

### 2. Présentation et utilité

Les terres rares désignent un ensemble de 17 éléments chimiques (le scandium, l'yttrium et les quinze lanthanides). Elles disposent de remarquables propriétés (grande stabilité thermique, conductivité électrique élevée, magnétisme fort) qui ont permis des gains de performance importants pour les technologies, tout en diminuant la quantité de matériaux consommés.

### 3. Contexte de marché, enjeux et criticité

Il n'y a pas de risques d'épuisement géologique des terres rares, même en se projetant à 2050. Néanmoins, la concentration des terres rares sont soumises à un risque géopolitique. Le marché est aujourd'hui dominé par la Chine (62%) suivie par les Etats-Unis, le Myanmar et l'Australie, qui réunissent à eux quatre plus de 90% de l'extraction mondiale<sup>(2)</sup>.

Par leurs rejets, l'extraction et la séparation des terres rares ont des impacts sur l'environnement. Une très forte consommation d'eau est nécessaire : elle peut atteindre des millions de litres par heure<sup>(3)</sup>. En outre, les impacts sociaux sont également particulièrement mauvais. Dans un discours de « civilisation environnementale » de la part du gouvernement chinois, un scénario de raréfaction de la ressource sur le marché est à envisager. En aval dans la chaîne, Pékin exerce également un quasi-monopole dans les activités de séparation des terres rares et dans la production de produits intermédiaires.

En dehors de la Chine, des projets sont en cours pour sécuriser ces approvisionnements. L'Australie a, par exemple, sécurisé ses approvisionnements en accordant des prêts à hauteur de 250 millions de dollars à la seule entreprise non-chinoise, Lynas. D'autres projets d'extraction sont envisagés au Canada, aux États-Unis et en Australie. Dans la transformation à l'aval, Lynas estime aussi nécessaire de développer des projets en Malaisie et aux Etats-Unis.

Les terres rares sont apparues comme une option permettant un gain de performance substantiel. Mais d'autres alternatives existent (notamment pour les aimants permanents) ce qui pourrait permettre d'atteindre les objectifs fixés de la transition bas carbone<sup>(4)</sup>.

## SYNTHÈSE DE LA CRITICITÉ



(1) [IEA 2021a], IEA, The Role of Critical Materials in Clean Energy Transitions, Mai, 2021

(2) [INEC 2022] Rapport Figure 20 – Concentration des pays acteurs dans l'extraction et la première transformation des ressources minérales

(3) [SENAT] Les enjeux stratégiques des terres rares et des matières premières stratégiques et critiques, 2016

(4) [EU 2020a], EU, Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system, Avril 2020



## SOLUTIONS CIRCULAIRES & RECOMMANDATIONS

### 0. Eviter

**Maîtriser et baisser la demande en énergie (MDE)**, ici en électricité.

**Choisir des technologies sans terres rares lorsque cela est possible.** Certains industriels ont déjà communiqué dans ce sens. Par exemple, Renault et Valeo se sont associés pour développer un moteur de nouvelle génération sans terres rares<sup>(1)</sup>. Cela peut se comparer à l'émergence forte des LED qui a permis de réduire la demande liée aux lampes à base de luminophores.

### 1. Réduire

**Optimiser leur utilisation**, en rationalisant leur recours. Siemens a, par exemple, optimisé son besoin au sein des éoliennes en plaçant les aimants dans des emplacements particuliers (appelés joint de grain).

### 2. Réutiliser et réemployer

**Réhabiliter les friches industrielles et minières**, souvent très polluées et qui regorgent de matières valorisables dont les terres rares peuvent faire partie. La dépollution permettrait de valoriser les métaux présents sur le sol français<sup>(2)</sup>.

### 3. Recycler

**Sécuriser le savoir-faire stratégique** français notamment sur le site de séparation et traitement des terres rares situé à La Rochelle qui est aujourd'hui la seule usine hors de Chine à posséder ce savoir-faire.

**Développer des techniques de recyclage efficaces** permettant la séparation des produits contenant des terres rares tout en limitant l'utilisation de produits chimiques toxiques.

**Imposer l'utilisation de niveaux croissants de terres rares issues de recyclage** par le levier réglementaire.

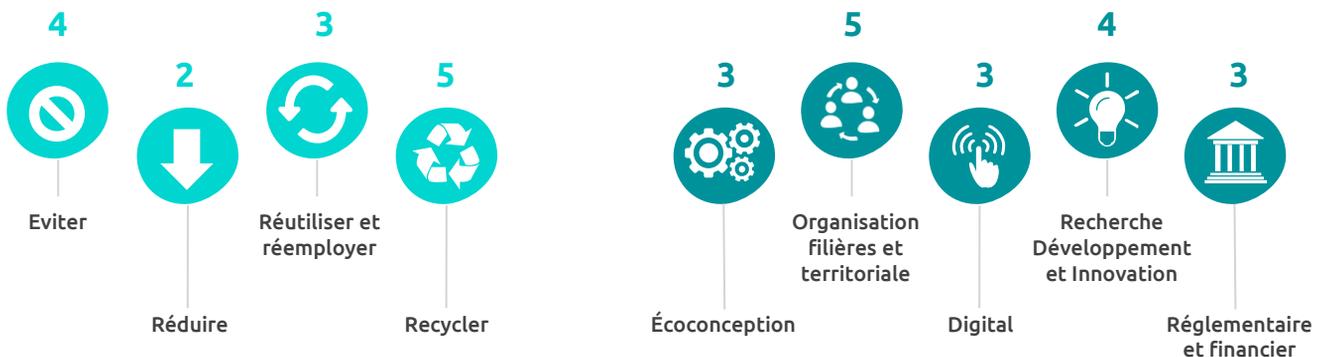
### 4. Solutions amont/aval

**Investir dans les potentiels miniers** disponibles, notamment les gisements français, afin de sécuriser les approvisionnements français et de limiter la dépendance envers les autres pays.

**Développer des alliances internationales**, pour atténuer la dépendance à l'égard de la Chine, à l'image de l'alliance entre l'Allemagne et le Kazakhstan en 2021 pour l'exploration de gisements.

**Réduire le temps d'immobilisation des terres rares dans les produits inutilisés** : certains biens de consommation, dont les appareils numériques, ne sont pas utilisés et sont stockés pendant de nombreuses années. Il est donc nécessaire d'éviter de stocker inutilement ces produits inutilisés et d'organiser les filières de collecte pour revaloriser les terres rares contenues.

## SYNTHÈSE DES LEVIERS & EFFORTS CIRCULAIRES NÉCESSAIRES



(1) [LES ECHOS] [Comment Renault et Valeo poussent leurs pions dans les moteurs électriques, 2022](#)

(2) [SENAT] [Les enjeux stratégiques des terres rares et des matières premières stratégiques et critiques, 2016](#)

## R5 - CUIVRE



## À RETENIR

**Rôle dans la SNBC** : le cuivre est omniprésent dans les technologies bas-carbone et l'électrification. Il joue un rôle central dans la SNBC.

**Enjeu ressource** : en raison de la forte demande à venir, jusqu'à 89% des réserves identifiées risquent d'être consommées d'ici 2050.

**Solutions majeures** : sécuriser les approvisionnements par la structuration d'une filière de recyclage efficace.

## DESCRIPTION, RISQUES ET ENJEUX

## 1. Impact dans la SNBC

Le cuivre tient une place essentielle dans la SNBC : il est massivement utilisé pour la production et le transport de l'énergie. Nucléaire, éolien, solaire photovoltaïque, réseaux électriques, véhicules à hydrogène, électrolyseurs et pompes à chaleur sont autant de domaines dans lesquels le cuivre est une ressource utilisée. De plus les technologies bas-carbone contiennent plus de cuivre que les technologies conventionnelles. En effet, un véhicule électrique contient 50Kg de cuivre, soit 70% de plus qu'un véhicule thermique<sup>(1)</sup>.

## 2. Présentation et utilité

Le cuivre est le métal lourd non-ferreux le plus fréquemment utilisé. Il allie une très haute conductivité thermique et électrique avec une certaine souplesse et résistance à la corrosion. Fort de ces propriétés, le cuivre est utilisé dans de nombreux domaines tels que dans le bâtiment (22%), les infrastructures énergétiques (14%), l'industrie (12%) les biens de consommation (9%), l'automobile (8%)<sup>(2)</sup>.

## 3. Contexte de marché, enjeux et criticité

Selon les différents scénarios, 78% à 89% des réserves de cuivre identifiées seront consommées d'ici 2050 avec la multiplication par quatre du besoin annuel au niveau mondial. La consommation de cuivre primaire s'accélère déjà : un volume de 20 millions de tonnes a été extrait en 2019, tandis que 24 millions de tonnes ont été raffinées par la Chine en 2018<sup>(3)</sup>. Selon l'USGS, les réserves identifiées de cuivre s'élèvent à 2,8 milliards de tonnes auxquelles viennent s'ajouter une estimation de 3,5 milliards de tonnes de réserves non-découvertes à ce jour<sup>(4)</sup>.

Les technologies de recyclage du cuivre sont très matures et permettent d'atteindre des rendements de 98%<sup>(5)</sup> sans que celui-ci ne perde ses propriétés. Pourtant, seulement 29% du cuivre est recyclé selon les usages ce qui permet uniquement de satisfaire 17% des besoins en cuivre actuels. En effet, les biens en fin de vie constitués de cuivre ne sont pas en nombre suffisant et la majeure partie de ce gisement en matière secondaire provient des chutes de production réutilisées en boucle fermée dans les usines de production. Ainsi, le gisement de cuivre secondaire français est insuffisant pour limiter la consommation de cuivre primaire.

Si le cuivre est principalement concentré en Amérique, il reste tout de même relativement réparti autour du globe. Les principaux pays extracteurs sont le Chili (30%), la Chine (9%), le Pérou (9%) et les Etats-Unis (7%)<sup>(6)</sup>. Peu extractrice, la Chine raffine toutefois 40% du cuivre produit avec 4 des 5 plus grosses raffineries sous son pavillon. Elle sécurise ainsi son besoin en cuivre qui représente 50% des besoins mondiaux.

Par conséquent, le marché du cuivre n'est pas le plus oligopolistique, mais il reste tout de même très influencé par la présence chinoise, alors que de fortes tensions sont à prévoir sur cette ressource dans le futur.

## SYNTHÈSE DE LA CRITICITÉ



(1) [ADEME 2022a], ADEME, Les matériaux pour la transition énergétique, un sujet critique, Février 2022

(2) [BRGM], Le cuivre : revue de l'offre mondiale en 2019, 2019

(3) [IFPEN] Le cuivre dans la transition énergétique : un métal essentiel, structurel et géopolitique !, 2020

(4) [USGS] How much copper has been found in the world ?

(5) [UNEP] Recycling Rates of Metals: A Status Report, 2011

(6) [INEC 2022] Rapport Figure 20 – Concentration des pays acteurs dans l'extraction et la première transformation des ressources minérales

## SOLUTIONS CIRCULAIRES & RECOMMANDATIONS

### 0. Éviter

Substituer le cuivre par d'autres ressources comme l'utilisation d'aluminium dans les câbles bien qu'il soit sujet à une perte de conduction par corrosion. La fibre optique est aussi un bon moyen de réduire le volume de cuivre utilisé dans les télécommunications. Enfin, le plastique est une bonne alternative à la tuyauterie en cuivre.

### 1. Réduire

Augmenter la durée de vie des appareils pour diminuer le nombre de remplacements et réduire la consommation en cuivre.

Reconditionner/réparer le produit, c'est éviter de devoir le remplacer pour la moindre panne. Les pannes sont souvent dues à quelques composants défectueux qu'il suffit de remplacer pour retrouver une bonne fonctionnalité du produit.

Écoconcevoir le produit pour faciliter sa maintenance et sa réparabilité pour baisser les coûts de réparation, allonger sa durée de vie, et empêcher la consommation d'un nouveau produit entier (biens de consommation, voiture, ...). Cela permet également de les démonter plus facilement afin de mieux réemployer ou recycler les pièces.

### 2. Réutiliser et Réemployer

Offrir une seconde vie aux différents produits par la mise en place d'une chaîne de valeur dédiée à la réparation de pièces, au démantèlement et à la revente.

Réhabiliter les friches industrielles et minières, souvent très polluées et qui regorgent de matières valorisables dont le cuivre peut faire partie. La dépollution permettrait de valoriser les métaux présents sur le sol français<sup>(1)</sup>.

### 3. Recycler

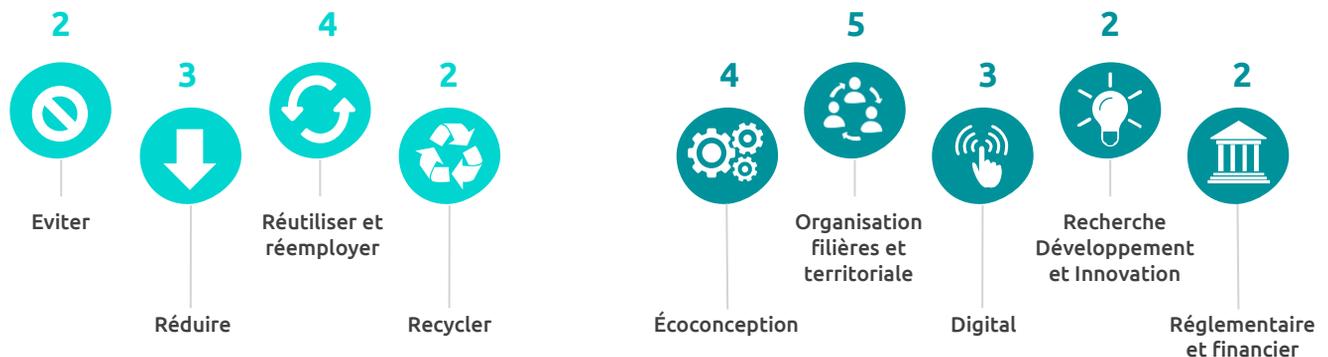
Augmenter le taux de recyclage du cuivre, aujourd'hui de 29%<sup>(2)</sup> : véritable mine urbaine, le recyclage permet de relocaliser les gisements de cuivre et de sécuriser ainsi les approvisionnements. Cette pratique permet aussi de réduire fortement les conséquences environnementales provoquées par l'extraction de cette ressource.

Améliorer le processus de collecte du cuivre pour réduire le coût de son recyclage : une réelle filière doit voir le jour. Il s'agit d'accompagner son développement afin de résoudre les difficultés liées au recyclage du cuivre. Le gisement de cuivre est en effet dispersé dans de nombreux biens de consommation. Ces produits ne sont pas nécessairement regroupés ce qui rend difficile la collecte du cuivre et augmente donc le coût de la matière secondaire.

### 4. Solutions Amont/Aval

Réduire le temps d'immobilisation du cuivre dans les produits inutilisés : certains biens de consommation ne sont pas utilisés et sont stockés durant plusieurs décennies<sup>(3)</sup>. Il est donc nécessaire d'éviter de stocker inutilement ces produits inutilisés pour revaloriser le cuivre qu'ils contiennent.

## SYNTHÈSE DES LEVIERS & EFFORTS CIRCULAIRES NÉCESSAIRES



(1) [SENAT] [Les enjeux stratégiques des terres rares et des matières premières stratégiques et critiques](#), 2016

(2) ANALYSE CAPGEMINI – IFPEN, BRGM, UNEP

(3) [IRIS] [Cuivre : quel avenir pour ce métal essentiel à la transition énergétique ?](#), 2019

## R6 - GRAPHITE



## À RETENIR

**Rôle dans la SNBC** : le graphite est majoritairement utilisé dans le domaine de la mobilité électrique (batteries), et dans une moindre mesure dans la mobilité hydrogène et les électrolyseurs.

**Enjeu ressource** : les réserves disponibles sont en mesure d'assurer une autonomie mondiale d'une cinquantaine d'années, alors que la consommation risque d'être multipliée par 25 d'ici à 2050 et que la Chine possède 65% des parts de marché.

**Solutions majeures** : l'industrialisation des procédés de recyclage devra aider à résoudre une partie du problème de la disponibilité de cette ressource.

## DESCRIPTION, RISQUES ET ENJEUX

## 1. Impact dans la SNBC

Le graphite entre dans la composition des batteries de véhicules électriques, et dans une moindre mesure dans celle des piles à combustible et des électrolyseurs pour la production de l'hydrogène : ces domaines participent de façon majeure à l'électrification et à la transition énergétique. En effet le parc de véhicules légers et lourds, qui se situera entre 40 et 45 millions de véhicules en 2050, sera non seulement électrifié à 90%-99%, mais devra en plus être remplacé une à deux fois dans l'intervalle. Le besoin mondial en graphite pourra être multiplié par 25 d'ici à 2050<sup>(1)</sup>.

## 2. Présentation et utilité

Le graphite naturel est un allotrope du carbone dont les propriétés physico-chimiques particulières sont de conjuguer des propriétés métalliques comme la conductivité thermique, électrique et la flexibilité avec des propriétés non-métalliques telles que la lubrification. Il peut également être obtenu par pyrolyse d'hydrocarbures à partir de pétrole ou de charbon. On l'appelle alors graphite synthétique<sup>(2)</sup>.

En premier lieu utilisé dans la fonderie et la production d'acier (41%) pour son inertie thermique, le graphite sera employé dans la production d'énergie de façon grandissante (20% aujourd'hui)<sup>(2)</sup>.

## 3. Contexte de marché, enjeux et criticité

Estimées entre 110 et 800 millions de tonnes<sup>(3)</sup>, les réserves disponibles de graphite suffiront à répondre aux besoins actuels pendant 50 ans dans le meilleur des cas. Il existe donc un risque de pénurie de graphite, bien qu'il soit possible de le synthétiser, puisqu'il est fabriqué à partir de ressources fossiles.

La production mondiale annuelle de graphite naturel s'élève à 1 million de tonnes, tirée par la Chine avec 65% des parts de marché, suivie par le Mozambique (10%) et le Brésil (8%). Les réserves disponibles, sont quant à elles essentiellement concentrées en Chine (50%), au Mozambique (15%) et en Tanzanie (15%)<sup>(4)</sup>.

Utilisé en friction, le graphite ne peut pas être recyclé puisqu'il se disperse à cause des frottements. De même, il est encore très peu recyclé dans ses autres usages. Toutefois, des projets émergent pour le recycler lorsqu'il provient des batteries et pour développer l'utilisation du graphite recyclé dans les batteries lithium-ion.

## SYNTHÈSE DE LA CRITICITÉ



(1) [INEC 2022] Rapport Figure 21 – Les besoins bruts en ressources pour la transition énergétique vont drastiquement augmenter dans le monde et en France d'ici 2040

(2) [BRGM] [Panorama 2011 du marché du graphite naturel](#), 2011

(3) [USGS] [Mineral Commodity Summaries 2022 – Graphite](#), 2022

(4) [INEC 2022] Rapport Figure 20 – Concentration des pays acteurs dans l'extraction et la première transformation des ressources minérales

## SOLUTIONS CIRCULAIRES &amp; RECOMMANDATIONS

**0. Eviter**

**Encourager l'économie de fonctionnalité** par le transfert de mobilité vers les mobilités douces (vélos) ou les transports en commun (train, métro, bus), qui sont uniquement utilisés par 24 % des français pour se rendre à leur travail. Ce chiffre a tendance à augmenter dans les zones très urbanisées<sup>(1)</sup>.

**Équilibrer l'utilisation du graphite avec celle d'autres ressources.** Dans le domaine de l'hydrogène, le graphite utilisé dans les plaques bipolaires des piles à combustible peut être remplacé par de l'acier inoxydable en contrepartie d'une dégradation du rendement. Dans le domaine des batteries, les microsphères nanostructurées sont à l'étude pour se substituer à l'anode en graphite. Enfin, dans le secteur de la fonderie, le graphite peut être remplacé par de la bauxite ou du carbure de silicium<sup>(2)</sup>.

**Privilégier les technologies hydrogène dans les secteurs où elles apportent un réel avantage :** les véhicules hydrogène peuvent stocker plus d'énergie que les véhicules électriques. Ils jouissent donc d'une meilleure autonomie qui, associé à un ravitaillement pratique, permet de réduire le temps de transport des marchandises. Il est donc préférable d'utiliser l'hydrogène pour le transport de marchandises plutôt que de généraliser son utilisation dans des véhicules individuels qui pourront opter pour des technologies de batteries électriques.

**Équilibrer la technologie hydrogène et électrique à batterie dans la mobilité** pour limiter la pression sur le graphite.

**1. Réduire**

**Réduire la consommation du graphite dans les composants par l'écoconception** des batteries et des piles à combustible. Une collaboration entre Nouveau Monde Graphite et Recyclage Lithion a vu le jour dans l'objectif d'utiliser du graphite recyclé pour les anodes de batteries<sup>(3)</sup>.

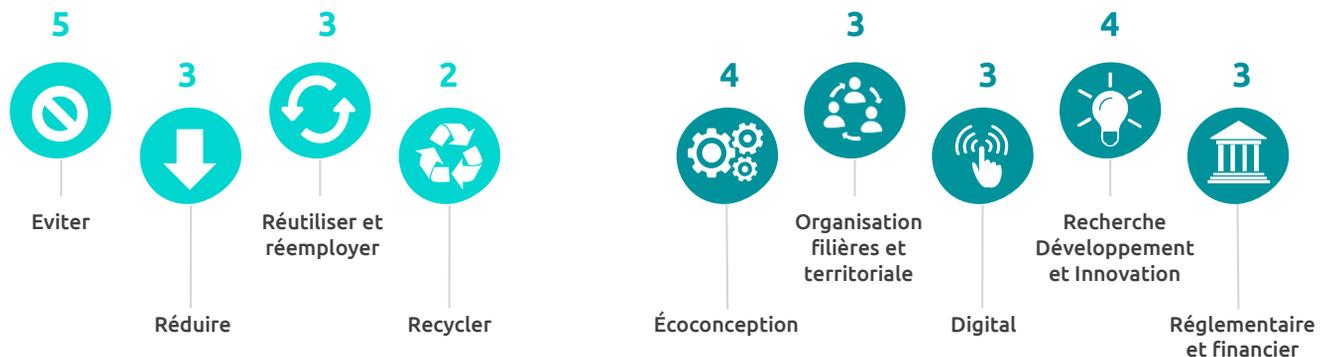
**2. Recycler**

**Développer des procédés de recyclage du graphite.** Les procédés de recyclage par extraction d'électrolyte par dioxyde de carbone sous-critique montre des résultats intéressants pour le recyclage du graphite dans les batteries Li-ION<sup>(3)</sup>. Puisque les rendements obtenus en laboratoire sont excellents, l'industrialisation de ces technologies permettrait de jouir d'un gisement secondaire important.

**3. Solutions Amont/Aval**

**Structurer une filière de collecte et traitement** des batteries et des piles à combustible afin de pouvoir valoriser les ressources (dont le graphite). Avec le déploiement massif des véhicules électriques et des technologies Hydrogène, un réseau d'acteurs locaux permettrait de sécuriser l'approvisionnement et consolider un savoir-faire dans la collecte et le recyclage existant.

## SYNTHÈSE DES LEVIERS &amp; EFFORTS CIRCULAIRES NÉCESSAIRES

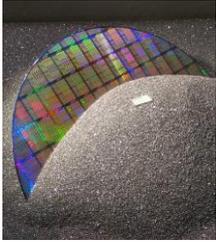


(1) [INSEE] [La voiture reste majoritaire pour les déplacements domicile-travail, même pour de courtes distances](#), 2021

(2) [CAPGEMINI ENGINEERING] Entretien avec Lucien Duclos, PhD – [Lien thèse](#)

(3) [LITHION] [Nouveau monde et recyclage lithion signent une entente de collaboration](#)

# R7 - SILICIUM



## À RETENIR

**Rôle dans la SNBC :** le silicium est un métal principalement utilisé dans le solaire photovoltaïque (panneaux solaires).

**Enjeu ressource :** le silicium est abondant sur terre mais 71% de son extraction et de son raffinage sont contrôlés par des acteurs chinois ce qui pose un risque d'indisponibilité de la ressource et un risque prix.

**Solutions majeures :** investir dans les potentiels miniers disponibles et la transformation. Diversifier le portefeuille de technologies, accélérer la R&D et l'industrialisation en France (C-Si, couches minces, perovskite). Recycler les panneaux solaires en fin de vie.

## DESCRIPTION, RISQUES ET ENJEUX

### 1. Impact dans la SNBC

Le silicium est un composant important utilisé dans la fabrication des cellules photovoltaïques pour la production d'énergie solaire. Aujourd'hui doté d'une puissance de 10 GW, le parc solaire installé atteindra 70 GW en 2050 pour le scénario de production énergétique le moins axé sur le solaire (N03)<sup>(1)</sup>. Au niveau mondial, l'AIE prévoit que l'installation solaire annuelle sera multipliée entre deux et trois<sup>(2)</sup> d'ici 2040, avec une production en silicium qui devra suivre.

### 2. Présentation et utilité

De nombreuses technologies de panneaux solaires sont accessibles sur le marché. A la première place, la technologie à base de cristaux de silicium (c-Si) équipe 95%<sup>(3)</sup> du parc en raison de son faible coût de production. Elle est suivie des technologies à couches minces, tellure de cadmium (CdTe) et cuivre indium gallium sélénium (CIGS), qui représentent seulement 4% des parts de marché. Une autre technologie sans silicium en phase de R&D, le perovskite, pourrait révolutionner le domaine. Enfin, la technologie à base de silicium amorphe (a-Si), qui a joué un rôle important dans le développement des panneaux solaires, tend aujourd'hui à disparaître dans le secteur<sup>(2)</sup>.

Les parts de marché du silicium devraient diminuer à horizon 2050 grâce au développement des technologies à couches minces ou de celle au perovskite. Pourtant, l'AIE prévoit que la technologie leader c-Si devrait encore représenter 60% du parc de panneaux solaires en 2050<sup>(2)</sup>.

Essentiel dans la fabrication des cellules photovoltaïques, notamment pour améliorer la coulabilité et réduire la dilatation thermique, le silicium est aussi prisé dans d'autres secteurs. Une fois raffiné, seulement 18% de sa production actuelle est dédiée à la fabrication des panneaux solaires, tandis que 41% des volumes sont destinés aux alliages d'aluminium et 35% à la fabrication de polymères tels que le silicone.

### 3. Contexte de marché, enjeux et criticité

Si le silicium est l'un des éléments les plus abondants de la croûte terrestre, la concentration des acteurs au niveau de l'extraction et de la production primaire (désoxydation du minerai) pose des problèmes de disponibilité de la ressource. En effet, la Chine, qui contrôle 71% de l'extraction et de la production primaire<sup>(4)</sup>, a limité ses exportations de silicium pendant la crise économique de la Covid, ce qui a provoqué de peu la fermeture de la société Ferropem. Avec 3% de la production minière et 4% de la production primaire mondiale, la France n'est pas suffisamment présente sur la chaîne de valeur pour prévenir les risques de pénurie<sup>(5)</sup>.

Enfin, le silicium possède une mauvaise empreinte carbone. En effet, son raffinage nécessite une grande quantité d'énergie. Ainsi, sa production en Chine à partir d'énergies fossiles est particulièrement polluante.

## SYNTHÈSE DE LA CRITICITÉ



(1) [RTE 2021], RTE, Futurs énergétiques, Principaux résultats, Octobre, 2021

(2) [IEA 2021a], IEA, The Role of Critical Materials in Clean Energy Transitions, Mai, 2021

(3) [BRGM 2019], BRGM, Fiche de criticité, Silicium métal, juillet 2019

(4) [INEC 2022] Rapport Figure 20 – Concentration des pays acteurs dans l'extraction et la première transformation des ressources minérales

(5) [BRGM] Fiche de criticité – Silicium métal, 2019

## SOLUTIONS CIRCULAIRES & RECOMMANDATIONS

### 0. Éviter

**Équilibrer la part des technologies de cellules photovoltaïques du parc** entre celles au silicium (c-Si, a-Si), à couches minces (CdTe, CIGS), et futures (perovskite). Le but est d'éviter une dépendance envers une seule ressource, en limitant la consommation sur le silicium, sans amener à une surconsommation des autres ressources (cadmium, tellurium, ...). Il est également important d'accélérer la recherche, l'innovation et le passage à l'échelle industrielle sur les technologies perovskite et à couches minces : l'Institut Photovoltaïque d'Île-de-France (IPVF) travaille actuellement sur des couches de perovskite associées au silicium pour fabriquer des cellules à haute performance et à faible coût. Selon l'AIE cette association pourrait réduire la consommation en silicium de 10% d'ici 2040<sup>(1)</sup>.

### 1. Réduire

**Augmenter la durée de vie des panneaux solaires** pour diminuer le nombre de remplacements. La durée de vie actuelle est comprise entre 20 et 40 ans. Les pousser dans leur durée de vie maximale est un moyen efficace d'atténuer la tension sur les ressources. Lorsque les parcs arrivent au bout de leur 20 ans<sup>(2)</sup> de tarif d'achat subventionné, les développeurs ont tendance à déconstruire le parc existant pour en construire un neuf, plus performant, afin d'obtenir une nouvelle période de support financier. Laisser ces parcs en fonctionnement, quitte à adapter les modalités de financement public ou privé, permettrait un meilleur arbitrage entre performance et durée d'exploitation.

**Reconditionner/réparer les panneaux solaires défectueux.** Les pannes des panneaux solaires sont souvent dues à quelques cellules photovoltaïques défectueuses qu'il suffit de remplacer.

**Ecoconcevoir le produit pour faciliter sa maintenance et sa réparabilité,** permet de baisser les coûts de réparation, d'allonger la durée de vie et d'empêcher la consommation d'un nouveau panneau entier.

### 2. Réutiliser et réemployer

**Réemployer les cellules photovoltaïques** encore fonctionnelles des panneaux solaires pour le dépannage d'autres panneaux.

**Revendre les panneaux en baisse de performance pour une seconde vie,** sur des habitations, ou pour certains usages nécessitant une faible consommation électrique (radars pédagogiques, feux de circulation). Une autre solution est d'investir pour inventer des modèles opérationnels et modèles d'affaires qui permettent l'exploitation d'installations utilisant des matériels reconditionnés dans des conditions suffisantes de fiabilité.

### 3. Recycler

**Recycler les pertes lors de la fabrication et la mise en forme du silicium.** Les chutes des lingots de silicium sont actuellement récupérées à hauteur de 80%<sup>(3)</sup>, puis réinjectées en boucle courte pour fabriquer d'autres lingots. La start-up Rosie propose des solutions pour récupérer le silicium ultra-pur perdu lors de la production de panneaux solaires.

**Développer des activités de recyclage en France.** Cela sera utile pour contrer les élévations potentielles de prix du fait de la forte concentration des acteurs. Des investissements sont à mener pour développer des filières de recyclage du silicium dans les panneaux solaires et les alliages d'aluminium, qui sont possibles, mais encore trop coûteux.

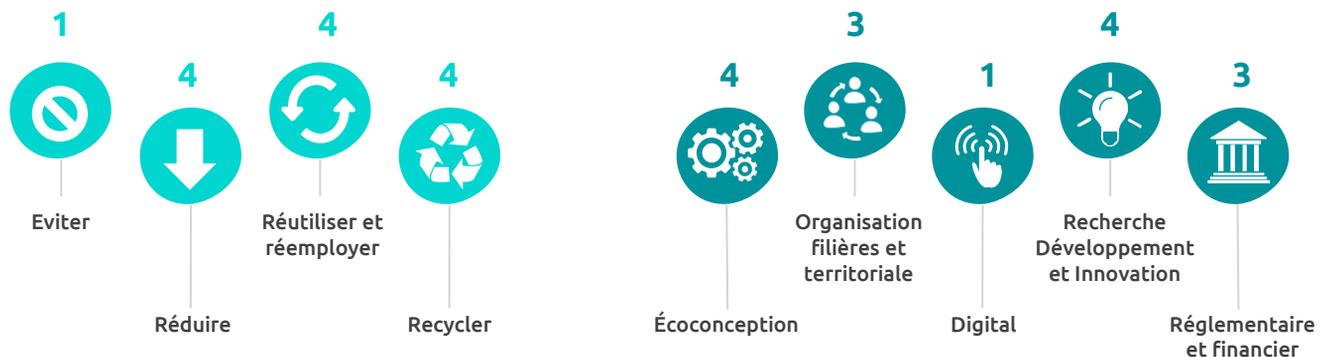
**Développer les activités de R&D** visant à faciliter la séparation et le traitement des éléments lors du recyclage. Financée par l'Union Européenne, le projet de recherche ReProSolar vise à développer un processus de récupération du silicium des panneaux solaires<sup>(4)</sup>.

### 4. Solutions amont/aval

**Ouvrir des carrières de quartz en France** pour limiter la dépendance envers les autres pays. Le quartz est le minerai d'où est extrait le silicium. Les carrières d'Imerys Ceramics France dans le Lot et la Dordogne fournissent 44% du silicium des fabricants et transformateurs français (Ferropem silicium métal, Voltec)<sup>(5)</sup>.

**Renforcer la stratégie d'approvisionnement au niveau français et européen** pour diversifier les fournisseurs et limiter les risques d'élévation des prix.

## SYNTHÈSE DES LEVIERS & EFFORTS CIRCULAIRES NÉCESSAIRES



(1) [IEA 2021a], IEA, The Role of Critical Materials in Clean Energy Transitions, Mai, 2021

(2) [CRE] Appel d'offres portant sur la réalisation et l'exploitation d'installations de production d'électricité à partir de l'énergie solaire « Centrales au sol », 2021

(3) [BRGM], Chaîne de transformation du silicium métal, recyclage et montée de la Chine sur le marché du polysilicium en 2019

(4) [PV MAGAZINE] Un nouveau procédé pour recycler le silicium, l'argent et le verre des panneaux photovoltaïques en fin de vie, 2021

(5) [MINISTÈRE] Mission d'expertise du projet d'extension de la carrière de quartz de Theidrac (Lot) : enjeux et recommandations, 2016

# R8 - ALUMINIUM



## À RETENIR

**Rôle dans la SNBC** : l'aluminium est une des ressources structurantes de la SNBC, car omniprésente dans les technologies bas-carbone.

**Enjeu ressource** : en raison de la forte augmentation de la demande, il y a un risque d'épuisement des ressources.

**Solutions majeures** : il faut structurer une filière de récupération et de valorisation afin de sécuriser et relocaliser les approvisionnements.

## DESCRIPTION, RISQUES ET ENJEUX

### 1. Impact dans la SNBC

L'aluminium est omniprésent dans la construction et les technologies de la transition énergétique. Ainsi, le besoin en aluminium continuera de croître, tiré par la construction neuve et l'électrification de la mobilité.

### 2. Présentation et utilité

Fabriqué à partir d'alumine issu du raffinage de la bauxite, l'aluminium est apprécié pour ses propriétés dans de nombreux usages. Tout comme le cuivre, c'est un métal léger qui possède une haute malléabilité ainsi qu'une bonne conductivité thermique et électrique<sup>(1)</sup>. De plus, l'aluminium est particulièrement résistant à la corrosion et il offre un remarquable ratio force / poids.

### 3. Contexte de marché, enjeux et criticité

La bauxite, premier maillon de la chaîne de valeur de l'aluminium, est essentiellement produite en Australie (30%), en Guinée (22%) et en Chine (16%). Contrôlée à 57% par la Chine<sup>(2)</sup>, la production d'aluminium, autrefois réalisée par les pays industrialisés, est désormais relocalisée dans les pays extracteurs de bauxite : les Etats-Unis, le Canada et l'Australie ne produisent aujourd'hui plus que 10% de l'aluminium au niveau mondial.

Si les estimations des réserves de bauxite sont comprises entre 55 et 75 milliards de tonnes<sup>(1)</sup>, l'UE a évalué cette ressource au niveau critique en 2020<sup>(3)</sup>. En effet, la consommation cumulée de bauxite attendue sera comprise entre 20 et 50 milliards de tonnes en 2050 au niveau mondial.

Par conséquent, le recyclage est un élément clé de la sécurisation d'approvisionnement européen en aluminium : deuxième consommatrice d'aluminium au niveau mondial, l'Europe extrait moins d'1% de la bauxite, ce qui l'amène à importer 87% de son besoin en aluminium primaire<sup>(1)</sup>.

## SYNTHÈSE DE LA CRITICITÉ



(1) [IFPEN] [L'aluminium dans la transition énergétique : quel avenir pour ce métal « roi du monde moderne »?](#), 2021

(2) [INEC 2022] Rapport Figure 20 – Concentration des pays acteurs dans l'extraction et la première transformation des ressources minérales

(3) [EUROPEAN COMMISSION] [Critical raw materials](#)

SOLUTIONS CIRCULAIRES & RECOMMANDATIONS

0. Eviter

N/A

1. Réduire

Augmenter la durée de vie des appareils pour diminuer le nombre de remplacements et réduire la consommation en aluminium.

Reconditionner/réparer le produit pour éviter de devoir le remplacer pour la moindre panne. Les pannes sont souvent dues à quelques composants défectueux qu'il suffit de remplacer pour retrouver une bonne fonctionnalité du produit.

Écoconcevoir le produit pour faciliter sa maintenance et sa réparabilité afin de baisser les coûts de réparation, d'allonger sa durée de vie et d'empêcher la consommation d'un nouveau produit entier. Cela permet également de les démonter plus facilement afin de mieux réemployer ou recycler les pièces.

2. Réutiliser et Réemployer

Offrir une seconde vie aux différents produits par la mise en place d'une chaîne de valeur dédiée à la réparation de pièces, au démantèlement et à la revente.

Réhabiliter les friches industrielles et minières, souvent très polluées et qui regorgent de matières valorisables dont l'aluminium peut faire partie. La dépollution permettrait de valoriser les métaux présents sur le sol français.

3. Recycler

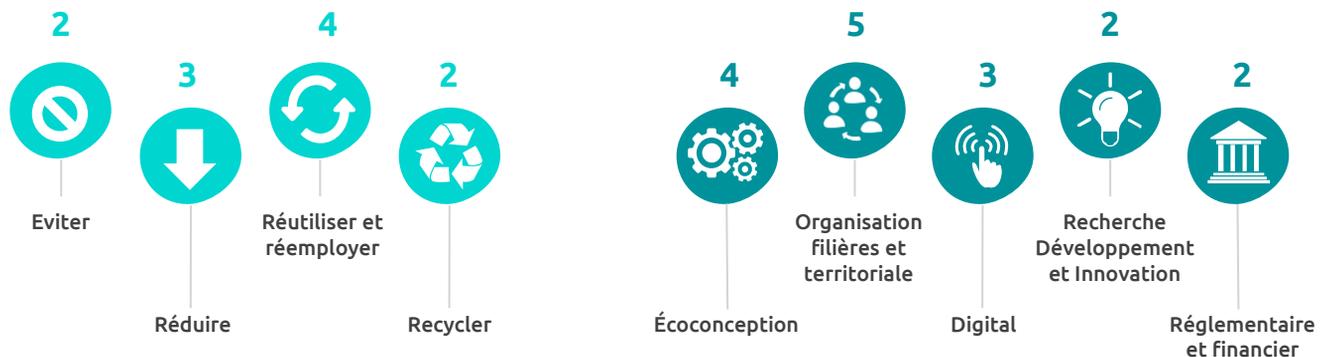
Augmenter le taux de recyclage de l'aluminium : véritable mine urbaine, le recyclage permet de relocaliser les gisements d'aluminium et de sécuriser ainsi les approvisionnements. En effet, le taux de recyclage de l'aluminium est uniquement estimé à 51%<sup>(1)</sup>, tandis que le rendement de son procédé de valorisation s'élève à 98%<sup>(2)</sup>. Cette pratique permet aussi de réduire fortement les conséquences environnementales provoquées par l'extraction de cette ressource.

Améliorer le processus de collecte de l'aluminium pour réduire le coût de son recyclage : une réelle filière doit voir le jour. Il s'agit d'accompagner son développement afin de résoudre les difficultés liées à son recyclage. Le gisement d'aluminium est en effet dispersé dans de nombreux biens de consommation. Ces produits ne sont pas nécessairement regroupés ce qui rend difficile sa collecte et augmente donc le coût de la matière secondaire.

4. Solutions Amont/Aval

Réduire le temps d'immobilisation de l'aluminium dans les produits inutilisés : certains biens de consommation ne sont pas utilisés et sont stockés durant des dizaines d'années. Il est donc nécessaire d'éviter de stocker inutilement ces produits inutilisés pour revaloriser le cuivre qu'ils contiennent.

SYNTHÈSE DES LEVIERS & EFFORTS CIRCULAIRES NÉCESSAIRES



(1) ANALYSE CAPGEMINI – IFPEN, BRGM, UNEP

(2) [ECOINFO] [Le recyclage des métaux](#), 2014

## R9 - NICKEL



## À RETENIR

**Rôle dans la SNBC :** le nickel est un métal présent dans le nucléaire, les éoliennes, l'électrification de la mobilité (batteries), dans les pompes à chaleur et la géothermie.

**Enjeu ressource :** limiter la dépendance dans l'extraction du nickel, et dans la fabrication de ses produits transformés.

**Solutions majeures :** investir dans les potentiels miniers disponibles et écoconcevoir les produits afin de mieux les réparer et les démonter pour le réemploi et le recyclage.

## DESCRIPTION, RISQUES ET ENJEUX

## 1. Impact dans la SNBC

Le nickel est un métal incontournable dans la fabrication des aciers inoxydables présents dans la quasi-totalité des domaines : plus de 70% de l'utilisation mondiale en nickel est destinée à la production de ce type d'acier<sup>(1)</sup>. Le nickel est également présent dans les cathodes des batteries nickel-manganèse-cobalt (NMC) et nickel-cobalt-aluminium (NCA). D'après l'AIE, le besoin mondial en nickel sera au moins multiplié par 19 d'ici 2040 et 62 d'ici 2050<sup>(2)</sup>.

## 2. Présentation et utilité

Le nickel est apprécié pour sa souplesse, sa malléabilité ainsi que pour sa résistance à l'oxydation.<sup>(1)</sup> Facile à allier avec d'autres métaux, il est très présent dans les alliages métalliques. Tout particulièrement utilisé dans les aciers inoxydables austénitiques, il est également employé dans la fabrication d'alliages spéciaux, dans les revêtements et de façon grandissante dans les batteries électriques. Les aciers inoxydables, qui sont la principale utilisation du nickel, sont devenus indispensables de par leur bonne résistance à la corrosion et leurs propriétés mécaniques équivalentes aux aciers alliés. Très prisé et utilisé à grande échelle, cet alliage suscite des tensions et une élévation rapide des prix lorsque la production perd en cadence.

## 3. Contexte de marché, enjeux et criticité

Estimées à 94 millions de tonnes<sup>(1)</sup>, les réserves en nickel devraient suffire pour répondre à la demande mondiale en croissance. C'est notamment le taux élevé de recyclage (66%) de la ressource qui contribue à limiter son épuisement. Environ 60% de l'acier inoxydable est fabriqué à partir de matières recyclées<sup>(3)</sup>.

La production minière de nickel est en grande partie contrôlée par l'Indonésie, les Philippines et la Russie<sup>(4)</sup>, représentant 52,9% de l'extraction. Avec 8,1% de l'extraction mondiale, la France se trouve en quatrième position grâce à ses mines en Nouvelle-Calédonie.<sup>(1)</sup> Quant à la Chine, l'Indonésie et le Japon, ils produisent 51%<sup>(4)</sup> des produits transformés à base de nickel. La Chine, qui représente à elle seule 31,2 % de cette production, a montré sa volonté de contrôler totalement ce marché. Elle s'est en effet hissée au premier rang mondial de la production d'acier inoxydable avec 52% des parts de marché en 2015 contre 2% en 2000<sup>(1)</sup>. Le risque que la Chine exerce un monopole sur ce marché dans les prochaines décennies est ainsi probable, ce qui pourrait entraîner des risques de pénurie ou une forte augmentation des prix sur les produits transformés à base de nickel.

Particulièrement mauvais, les impacts sociaux et environnementaux du nickel sont liés à la forte consommation en énergie de son extraction et de son raffinage, à la destruction de la biodiversité lors de l'extraction et à l'usage conséquent de l'eau qui peut entraîner des conflits avec les populations locales comme c'est le cas en Indonésie.

## SYNTHÈSE DE LA CRITICITÉ



(1) [IFPEN] [Le nickel dans la transition énergétique : pourquoi parle-t-on de métal du diable ?](#), 2021

(2) [INEC 2022] Rapport Figure 21 – Les besoins bruts en ressources pour la transition énergétique vont drastiquement augmenter dans le monde et en France d'ici 2040

(3) [ISSF] [Champion of recycling](#), 2019

(4) [INEC 2022] Rapport Figure 20 – Concentration des pays acteurs dans l'extraction et la première transformation des ressources minérales

## SOLUTIONS CIRCULAIRES &amp; RECOMMANDATIONS

**0. Eviter**

Utiliser davantage les alliages sans nickel comme c'est le cas des aciers inoxydables martensitique et ferritique<sup>(1)</sup>. Ces deux familles constituent en effet une bonne alternative pour éviter ou réduire la consommation de nickel. Equilibrer l'utilisation de toutes ces familles est une solution pour ne pas dépendre d'une seule ressource, et ne pas en surconsommer d'autres comme le chrome qui est contenu dans l'acier inoxydable ferritique.

**1. Réduire**

Augmenter la durée de vie des appareils pour diminuer le nombre de remplacements, et réduire la consommation en nickel, notamment dans les infrastructures de la transition énergétique comme les éoliennes, où il peut facilement être envisagé de doubler leur durée de vie. Reconditionner/réparer le produit, c'est éviter de devoir le remplacer pour la moindre panne. Les pannes sont souvent dues à quelques composants défectueux qu'il suffit de remplacer pour retrouver une bonne fonctionnalité du produit.

Écoconcevoir le produit pour faciliter sa maintenance et sa réparabilité, c'est lui permettre de baisser les coûts de réparation, d'allonger sa durée de vie, et d'empêcher la consommation d'un nouveau produit entier (éolienne, voiture, pompe à chaleur). Cela permet également de les démonter plus facilement afin de mieux réemployer ou recycler les pièces.

**2. Réutiliser et Réemployer**

Offrir une seconde vie aux différents produits par la mise en place d'une chaîne de valeur dédiée à la réparation de pièces, au démantèlement et à la revente allant de l'éolienne complète à l'utilisation des pièces comme pièce de rechange.

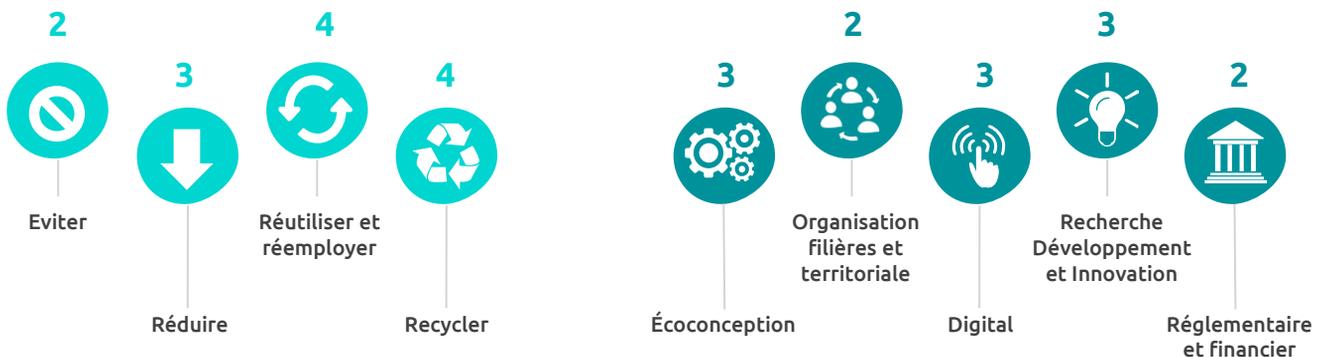
**3. Recycler**

Recycler le nickel dans toutes les filières. Le nickel est aujourd'hui recyclé à 66% toutes filières confondues<sup>(2)</sup>. L'acier inoxydable, qui contient du nickel, est recyclé à 80%, et ce chiffre frôle même les 100% dans le bâtiment<sup>(3)</sup>.

**4. Solutions Amont/Aval**

Investir dans les potentiels miniers disponibles afin de sécuriser les approvisionnements français et de limiter la dépendance envers les autres pays. Il est également envisageable d'augmenter le taux d'extraction des mines en Nouvelle-Calédonie et de réserver l'utilisation de cette ressource aux entreprises françaises ou européennes.

## SYNTHÈSE DES LEVIERS &amp; EFFORTS CIRCULAIRES NÉCESSAIRES



(1) [ACCU] [Quelle est la différence entre les aciers inoxydables ferritiques, austénitiques et martensitiques?](#)

(2) ANALYSE CAPGEMINI – IPFEN, BRGM, UNEP

(3) [BRGM] [Le nickel \(Ni\) – éléments de criticité](#), 2020

## R10 - ACIER



## À RETENIR

**Rôle dans la SNBC** : l'acier est l'une des ressources structurantes de la SNBC, puisqu'elle est omniprésente dans les technologies bas-carbone.

**Enjeu ressource** : il s'agit d'une ressource peu critique en comparaison avec les autres. Compte tenu des quantités produites, elle est toutefois une ressource très émettrice de carbone.

**Solutions majeures** : la filière de récupération et de valorisation de l'acier doit être mieux structurée afin de réduire l'empreinte environnementale et augmenter le degré d'indépendance vis-à-vis de cette ressource.

## DESCRIPTION, RISQUES ET ENJEUX

## 1. Impact dans la SNBC

Très largement utilisé dans de nombreux secteurs, l'acier est indispensable pour l'ensemble des domaines traités dans cette étude. En particulier, les véhicules électriques, l'éolien en mer, le bâtiment neuf, le solaire et l'éolien terrestre en sont les plus grands consommateurs. A eux seuls, ils mobilisent plus de 90% du besoin en acier du secteur de l'énergie dans le scénario A.

## 2. Présentation et utilité

L'acier est un alliage métallique contenant du fer, du carbone et d'autres éléments métalliques. Ses propriétés varient en fonction de son traitement, de la nature et de la teneur de ces éléments. De nombreuses classifications existent ainsi pour rendre compte de ses caractéristiques comme le point de fusion, la conductibilité thermique ou électrique. Elles peuvent être regroupées en deux grandes familles qui servent des usages différents : les aciers de qualité alliés et les aciers spéciaux non alliés de plus grande pureté et répondant à des exigences supérieures. De façon générale, il s'agit un matériau particulièrement apprécié dans le secteur de la construction pour ses propriétés élastiques, ductiles et de résistance à la rupture<sup>(1)</sup>.

Dans le domaine des véhicules électriques, les moteurs contiennent une quantité significative d'acier de haute technicité pour applications électrotechniques<sup>(2)</sup>.

De plus, le nickel, le béton et l'acier représentent 98% du poids total d'une éolienne terrestre. S'agissant des éoliennes en mer, les flotteurs en acier seront privilégiés par rapport aux flotteurs en béton et atteindront 75% de leur déploiement<sup>(3)</sup>. La construction neuve consomme également une grande quantité d'acier. Dans une moindre mesure, l'acier sera utilisé pour développer les réseaux électriques et de chaleur. Par exemple, 570 kT/an d'acier sera nécessaire pour le renouveler le réseau électrique<sup>(4)</sup>.

## 3. Contexte de marché, enjeux et criticité

L'acier est un matériau peu substituable qui représente 23% des émissions directes de GES de l'industrie lourde française. Il fait d'ailleurs partie des secteurs à décarboner en priorité<sup>(5)</sup>. De plus, la Chine est un acteur important du domaine. Elle contrôle en effet 59% de la production mondiale d'acier en 2020<sup>(6)</sup>. Pour autant, l'extraction et la transformation des éléments nécessaires à la fabrication de l'acier ne font pas l'objet de monopoles. Les réserves d'acier sont par ailleurs largement suffisantes pour répondre aux besoins mondiaux. Il s'agit également d'un alliage facilement recyclable, ne perdant pas ses propriétés à la suite de sa valorisation. Par conséquent, l'acier est une ressource peu critique en comparaison avec les autres.

## SYNTHÈSE DE LA CRITICITÉ

INDEX GLOBAL	Réserves Disponibles, Volumes	Monopole extraction et transformation	Ressource stratégique & conflits d'usage	Substituabilité	Recyclabilité	Impacts sociaux et environnementaux
2,0	1	2	1	4	1	3

(1) [TECHNIQUES DE L'INGENIEUR], [Acier : définition et propriétés](#)

(2) [EU 2020b], EU, Critical Raw Materials For Strategic Technologies and Sectors in the EU, Septembre 2020

(3) [ADEME 2022a], ADEME, Les matériaux pour la transition énergétique, un sujet critique, Février 2022

(4) [SURFER 2020a], ADEME, BRGM, Inventaire des besoins en matière, énergie, eau et sols des technologies de la transition énergétique, Novembre 2020

(5) [ADEME 2021a], ADEME, Transition(s) 2050, Novembre 2021

(6) [USGS], [Iron and steel](#), 2022

## SOLUTIONS CIRCULAIRES & RECOMMANDATIONS

### 0. Éviter

**Diminuer le parc de véhicules par l'économie de fonctionnalité.** Développer la mobilité comme service plutôt que la propriété des véhicules. Développer les services de covoiturage et de multimodalité pour faciliter les déplacements, et limiter la croissance du parc automobile. En milieu urbain et périurbain, basculer vers les petits véhicules électriques qui requièrent quelques kg de batteries au lieu de plusieurs centaines de kg : triporteurs en milieu professionnel, voiturettes type Citroën AMI, vélos à assistance électrique ou les transports en commun (train, métro, bus), qui ne sont utilisés actuellement que par 24 % des français pour se rendre à leur travail<sup>(1)</sup>.

**Réduire la consommation d'énergie électrique finale**, en misant notamment sur une meilleure efficacité énergétique dans l'industrie, le tertiaire et l'habitat.

**Favoriser la rénovation à la construction neuve** pour diminuer le besoin en acier. La rénovation nécessite en effet moins d'acier que la construction neuve, dans une proportion de 17 à 55 fois moins selon l'étude SURFER de l'ADEME selon que l'on est sur la rénovation de maisons individuelles ou de bureaux tertiaires.

**Maîtriser l'évolution des surfaces par ménage et par personne** pour diminuer le besoin en acier. L'habitat collectif peut ainsi être développé en améliorant sa qualité, en particulier dans ses espaces partagés.

**Optimiser l'usage du parc immobilier existant** pour éviter la construction neuve. Par exemple, l'augmentation du taux d'occupation des bâtiments vacants, écoles et bureaux vides, permettrait d'économiser la construction de nombreux logements.

### 1. Réduire

**Optimiser le besoin en matériaux grâce à la modélisation** pour améliorer le dimensionnement et ainsi diminuer les quantités d'acier mobilisées dans les véhicules électriques, les éoliennes, les bâtiments et les réseaux électriques et de chaleur.

**Augmenter la durée de vie des éoliennes.** Aujourd'hui, les éoliennes terrestres ont une durée de vie de 25 ans alors que celle des fondations est de 50 ans : elles sont limitées par leurs éléments mécaniques et électroniques comme les turbines ou les boîtes de vitesse. Il est donc nécessaire de mettre en place une filière de réparation afin de doubler leur durée de vie.

### 2. Réutiliser et Réemployer

**Réemployer autant que possible les matériaux issus de la rénovation du réseau électrique**, notamment pour les pylônes en béton et en acier qui sont toujours opérationnels. Enedis valorise déjà les ferrailles de ses pylônes dans les filières de la construction.

**Pratiquer la déconstruction sélective et organiser les chantiers de déconstruction** pour rendre possible le recyclage de l'ensemble des ressources. Le passage à l'échelle du processus de dépose sélective des matériaux au moment de la déconstruction facilitera le tri des déchets et rendra l'acier recyclé plus compétitif.

### 3. Recycler

**Favoriser le tri des déchets « à la source »** afin d'optimiser leur recyclage dans les filières adéquates. Cela est d'autant plus vrai pour le cuivre et l'acier qui sont facilement recyclables.

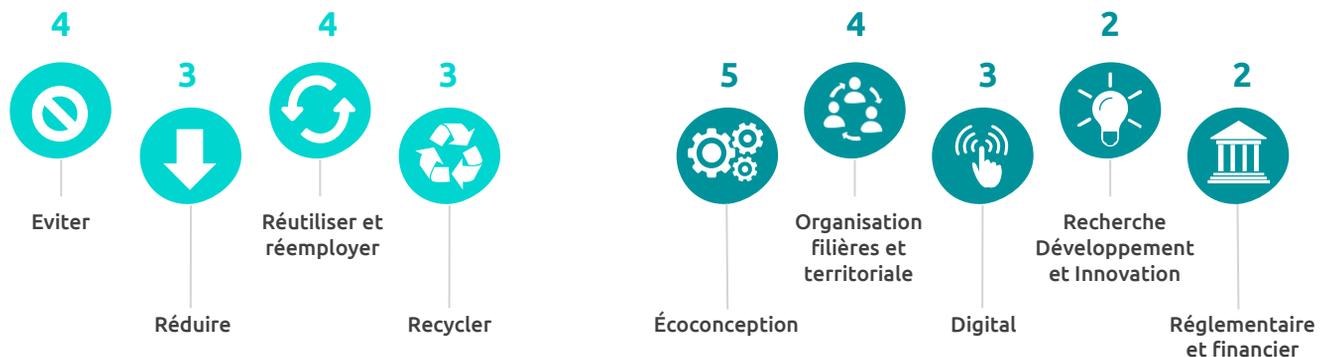
**Recycler l'acier dans toutes les filières.** Le taux de recyclage moyen de l'acier s'élève à 78%<sup>(2)</sup>. Pour l'acier inoxydable, qui contient du nickel, il s'élève à 80% tandis qu'il est pratiquement de 100% dans le secteur du bâtiment<sup>(3)</sup>. De plus, le recyclage de l'acier permet d'économiser de grandes quantités d'énergie : « chaque tonne de ferraille recyclée permet d'éviter 40% de la consommation énergétique primaire d'une tonne d'acier »<sup>(4)</sup>.

**Garantir le recyclage de tous les véhicules** conformément à la directive européenne 2000/53/CE sur le véhicule hors d'usage (VHU) qui fixe un taux minimal de réutilisation et de recyclage de 85% en masse du VHU et un taux de 95% pour la réutilisation et valorisation. En France, 200 000 à 500 000 véhicules ne seraient pas traités comme le stipule cette directive selon FEDEREC<sup>(5)</sup>.

### 4. Solutions Amont/Aval

**Réduire le temps d'immobilisation de l'acier dans les produits inutilisés** : certains biens de consommation ne sont pas utilisés et sont stockés durant des dizaines d'années. Il est donc nécessaire d'éviter de stocker inutilement ces produits inutilisés pour revaloriser le cuivre qu'ils contiennent.

## SYNTHÈSE DES LEVIERS & EFFORTS CIRCULAIRES NÉCESSAIRES



(1) [INSEE] [La voiture reste majoritaire pour les déplacements domicile-travail, même pour de courtes distances](#), 2021

(2) ANALYSE CAPGEMINI – IFPEN, BRGM, UNEP

(3) [FILAIR], [L'inox, et en plus il est recyclable !](#), 2018

(4) [FEDEREC] [Évaluation environnementale du recyclage en France selon la méthodologie de l'analyse de cycle de vie](#), 2017

(5) [L'USINE NOUVELLE] [Au cœur de la filière française de déconstruction des véhicules hors d'usage](#), 2021

## R11 - BETON



## À RETENIR

**Rôle dans la SNBC :** construction de bâtiments, génie civil (production d'énergie, réseaux...).

**Enjeu ressource :** avec l'augmentation des besoins, des pénuries localisées en sable et granulats pourront mettre sous tension certains chantiers tandis que des quantités considérables de déchets satureront les déchèteries autour des grandes densités urbaines.<sup>(1)</sup>

**Solutions majeures :** les pratiques de la déconstruction sélective doivent passer à l'échelle pour réemployer le béton sur le chantier ou le valoriser. En parallèle, les outils de modélisation seront également précieux pour limiter le surdimensionnement et ainsi réduire le besoin en ressources.

## DESCRIPTION, RISQUES ET ENJEUX

## 1. Impact dans la SNBC

Le béton est utilisé dans la construction neuve et la rénovation des bâtiments, domaines indispensables pour diminuer le besoin en énergie des secteurs résidentiels et tertiaires. Il intervient également dans le BTP en génie civil pour la construction des infrastructures énergétiques nécessaires à l'exploitation des biomasses (réseaux de chaleur, les centrales biomasses, etc.) ou à l'électrification (fondation des éoliennes, centrales nucléaires, etc.).

## 2. Présentation et utilité

Economique, moulable et résistant, le béton se place au premier rang des matériaux de construction<sup>(1)</sup>. Il est particulièrement utilisé dans le secteur du bâtiment (fondations, radiers, murs etc.), de la viabilisation (bordures, canalisations, etc.) et de l'aménagement (trottoirs, puits, passerelles etc.)<sup>(1)</sup>.

Le béton se compose d'un mélange de granulats, de sable, et d'eau, aggloméré par du ciment. Le dosage de ce mélange permet d'obtenir des caractéristiques variées pour répondre à différents besoins. Par exemple, le béton armé, mélange d'acier et de béton, résiste aux compressions et aux forces de traction.

Par ailleurs, la consommation de béton varie selon que l'on rénove ou que l'on construit. En effet, la rénovation nécessite 600 à 6000 fois moins de béton de la construction neuve respectivement de maisons individuelles et de bâtiments collectifs. De la même façon, les technologies de production d'énergie consomment des quantités de béton variées. Par exemple, le nucléaire en nécessite 48 g/kWh, l'éolien en mer 31 g/kWh, tandis que l'éolien terrestre et le solaire photovoltaïque en consomment respectivement 793 g/kWh et 1455 g/kWh<sup>(2)</sup>. En outre, le béton est également utilisé dans la construction des réseaux de chaleur et des réseaux électriques. Par exemple, les réseaux électriques consommeront 5000 kT de béton chaque année.

## 3. Contexte de marché, enjeux et criticité

La France dispose des carrières suffisantes pour produire les granulats nécessaires à la fabrication du béton. Néanmoins, les granulats sont parfois peu accessibles au niveau local en raison des conflits liés à l'implantation des carrières. Avec l'augmentation des besoins, des pénuries localisées en béton pourront mettre sous tension certains chantiers. L'accessibilité en béton constitue donc un enjeu principal de la ressource<sup>(2)</sup>.

La construction neuve génère en outre, avec la déconstruction, des quantités considérables de déchets de béton peu valorisés au sein même de la filière<sup>(3)</sup>. En croissance, la production de ces déchets risque de saturer les déchèteries. La magnitude des tonnages concernés augmentera ainsi les pressions croissantes autour des grandes densités urbaines.

## SYNTHÈSE DE LA CRITICITÉ



(1) [ARA 2021a], Région Auvergne-Rhône-Alpes, ID Friches, Octobre 2021

(2) [ADEME 2022a], ADEME, Les matériaux pour la transition énergétique, un sujet critique, Février 2022

(3) [HQEGBC 2018a], Alliance HQE GBC, 15 leviers pour agir - Cadre de définition de l'économie circulaire dans le bâtiment, Janvier 2018

## SOLUTIONS CIRCULAIRES & RECOMMANDATIONS

### 0. Eviter

Favoriser la rénovation à la construction neuve pour diminuer le besoin en béton et les déchets générés.

Maîtriser l'évolution des surfaces par ménage et par personne pour diminuer le besoin en béton et les déchets générés<sup>(1)</sup>. L'habitat collectif peut ainsi être développé en améliorant sa qualité, en particulier dans ses espaces partagés.

### 1. Réduire

Développer l'usage du béton biosourcé pour limiter les dommages sur l'environnement et séquestrer le carbone.

Optimiser le besoin en matériaux grâce à la modélisation pour améliorer le dimensionnement et ainsi diminuer les quantités de béton mobilisées.

Rallonger la durée de vie des bâtiments en améliorant leur transformabilité et leur réversibilité dès l'étape de conception.

Augmenter la durée de vie des éoliennes et des panneaux solaires. Aujourd'hui la durée de vie des éoliennes terrestres atteint 25 ans alors que celle des fondations est de 50 ans. Les éléments mécaniques et électroniques comme les turbines ou les boîtes de vitesse des éoliennes doivent donc être réparés afin de préserver les fondations et utiliser ainsi moins de béton. La durée de vie des panneaux solaires, comprise entre 20 et 40 ans, peut également être prolongée grâce au remplacement des cellules photovoltaïques défectueuses.

Développer les réseaux électriques intelligents pour dimensionner le réseau au juste nécessaire et ainsi permettre d'économiser du béton.

### 2. Réemployer et réutiliser

Faciliter la démontabilité des matériaux pour favoriser la rénovation lors de la conception des bâtiments.

Aménager le chantier pour réemployer le béton concassé issu de la déconstruction sur le même site.

Réemployer le béton non-contaminé dans la construction des nouvelles centrales nucléaires : issu du démantèlement, le béton peut être réemployé pour construire de nouveaux réacteurs. Cela permettrait d'éviter la production de béton neuf et le traitement d'une grande quantité de déchets.

Réemployer autant que possible les bétons issus de la rénovation du réseau, notamment pour les pylônes en béton qui sont toujours opérationnels. Par exemple, Enedis recycle déjà 100% des poteaux en béton<sup>(2)</sup> mais il est ensuite utilisé comme remblai routier alors qu'il pourrait être réemployé dans la filière.

Réaliser la construction neuve sur des friches industrielles et commerciales vieillissantes pour optimiser l'utilisation du foncier et diminuer les besoins en béton.

### 3. Recycler

Pratiquer la déconstruction sélective et organiser les chantiers de déconstruction pour rendre possible le recyclage du béton. Le passage à l'échelle du processus de dépose sélective du béton au moment de la déconstruction facilitera le tri des déchets et rendra le béton recyclé plus compétitif<sup>(3)</sup>.

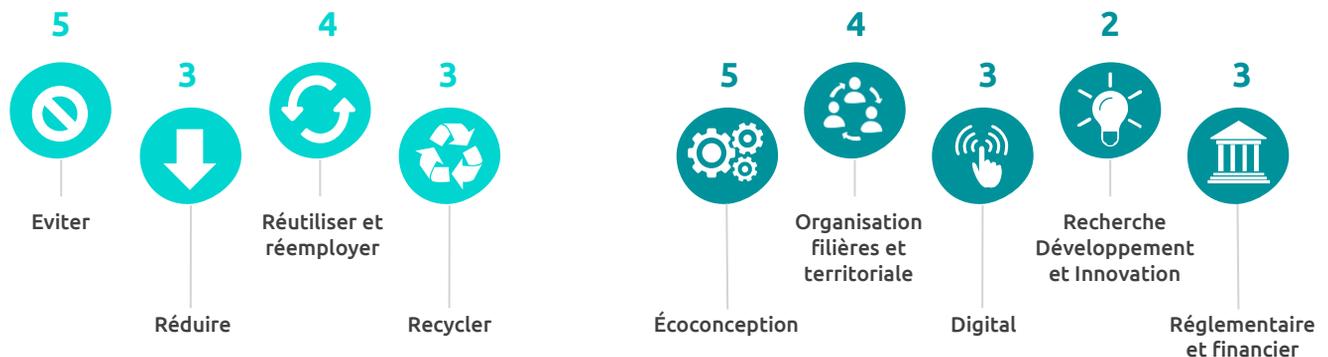
### 4. Solutions amont/aval

Développer des solutions chez les assureurs pour mieux accompagner les acteurs de la construction dans la fiabilisation des nouvelles techniques constructives et le suivi de la qualité du béton recyclé.

Développer les points de collecte et de recyclage des déchets du bâtiment pour densifier le maillage territorial. Dans certaines régions, les points de collecte sont trop éloignés des chantiers ou sont en nombre insuffisant par rapport au nombre d'entreprises du bâtiment. En effet, les granulats recyclés manquent de compétitivité en raison du coût élevé de leur transport lié aux distances parcourues.

Automatiser les centres de tri des déchets en béton du bâtiment pour affiner le tri et ainsi améliorer leur valorisation.

## SYNTHÈSE DES LEVIERS & EFFORTS CIRCULAIRES NÉCESSAIRES



(1) [ADEME 2021a], ADEME, Transition(s) 2050, Novembre 2021

(2) [ENEDIS 2021a], ENEDIS, Economie circulaire : 1 an après la loi Anti-Gaspillage, Enedis est au rendez-vous, Février 2021

(3) [ARA 2021a], Région Auvergne-Rhône-Alpes, ID Friches, Octobre 2021

# R12 - BOIS-FORÊT



## À RETENIR

**Rôle dans la SNBC :** fournir matériaux à faible contenu carbone et énergie.

**Enjeu ressources :** les surfaces forestières, limitées par nature, doivent répondre aux besoins en bois d'œuvre, bois d'industrie, bois-énergie et création de puits carbone.

**Solutions majeures :** soutenir une sylviculture dynamique, équilibrer la balance commerciale et développer l'exploitation du gisement de bois hors forêts.

## DESCRIPTION, RISQUES ET ENJEUX

### 1. Impact dans la SNBC

Essentiel dans la SNBC, le bois-forêt permet de stocker du carbone de façon naturelle et de produire de l'énergie renouvelable lorsque la forêt dont il est issu est gérée durablement. La récolte forestière est aujourd'hui de 56 Mm<sup>3</sup> pour l'ensemble des besoins, aboutissant à une part énergie d'environ 113 TWh. Le potentiel pourrait monter à 75 Mm<sup>3</sup> par an en 2050 avec une part énergie disponible de l'ordre de 165 TWh<sup>(1)</sup>.

### 2. Présentation et utilité

La filière du bois s'organise autour de deux gisements : le bois forêt et le bois hors forêt. Ce dernier est constitué des déchets verts produits par les collectivités, les vignobles ou les vergers ; des coproduits des industries du bois comme les connexes de scierie ; et du bois de rebut, par exemple issu de la déconstruction ou de meubles en fin de vie.

Grâce à son organisation en trois niveaux, la filière valorise ces deux gisements pour produire de la matière et de l'énergie. Au premier niveau, une partie du bois issu des forêts et des déchets verts sort du circuit commercial pour être auto-consommé en chaleur. L'autre partie est valorisée en matière, c'est le cas du bois d'œuvre (BO) et du bois industrie (BI), puis le reste, appelé bois énergie (BE), est utilisé pour produire de l'énergie. Au second niveau, une partie des connexes de transformation du BO et du BI sont récupérés puis envoyés en BE. Enfin, le troisième niveau concerne la réintégration des bois de rebut dans la filière pour une valorisation énergétique<sup>(1)</sup>.

Sous forme de matière brute, de plaquette ou de granulé, le bois énergie est utilisé afin de produire de la chaleur, de l'électricité, mais également du gaz avec l'arrivée de la pyrogazéification<sup>(2)</sup>, jusqu'à une hauteur de 50 à 65 TWh<sup>(1)</sup>. Le bois-forêt permet donc de générer de l'énergie issue de la biomasse sous les deux formes solide et gazeuse.

### 3. Contexte de marché, enjeux et criticité

La criticité de la ressource bois-forêt tient à sa disponibilité. S'agissant du gisement issu de la forêt, la filière est sous tension en raison du taux élevé des exportations, des conflits d'usage entre la valorisation matière et énergie et du niveau de prélèvement contraint pour la préservation du puits de carbone naturel et le renouvellement des forêts<sup>(1)</sup>.

Toutefois, la mobilisation du bois hors forêt tend à baisser le niveau de criticité de la ressource puisque son intégration augmente le gisement disponible de façon significative. Ainsi, la ressource bois-forêt est relativement peu critique à condition d'être gérée de façon raisonnée.

## SYNTHÈSE DE LA CRITICITÉ

INDEX GLOBAL	Réserves Disponibles, Volumes	Monopole extraction et transformation	Ressource stratégique & conflits d'usage	Substituabilité	Recyclabilité	Impacts sociaux et environnementaux
2,3	3	1	4	3	1	2

(1) [ADEME 2021a], ADEME, Transition(s) 2050, Novembre 2021, analyse Capgemini

(2) [ADEME 2018a], ADEME, Un mix de gaz 100 % renouvelable en 2050 ?, Janvier 2018



## SOLUTIONS CIRCULAIRES & RECOMMANDATIONS

### 0. Éviter

**Maîtriser et baisser la demande en énergie (MDE)**, 50% à 60% de la consommation de chaleur pour l'ensemble du parc bâti peut être évitée grâce à la rénovation ou la construction neuve, ce qui permet d'économiser des ressources en biomasse.

**Équilibrer la valorisation du bois entre l'énergie et la matière** pour conserver le stockage du carbone et baisser les émissions de CO<sub>2</sub> puisque la transformation du bois est moins consommatrice en énergie que celle des autres matériaux. Le BO et le BI constituent, en France, un stock estimé à 380 MtCO<sub>2</sub>eq<sup>(1)</sup>.

**Protéger les forêts des grands incendies** afin d'éviter la perte de ce stock de carbone et la diminution du gisement mobilisable en énergie. Un tiers de la forêt française est sensiblement exposé à ce risque.

### 1. Réduire

**Améliorer le rendement des équipements de chauffage** : le remplacement des équipements de chauffage individuels peu performants et l'amélioration du bâti permet de réduire les besoins unitaires de 5 à 10 % pour le premier, et de 45% à 60% pour le second<sup>(2)</sup>. Dit autrement, cela permet aussi de servir plus de ménages avec la même quantité de bois.

**Réduire la consommation de bois dans les chaufferies** en poursuivant les recherches sur l'amélioration du rendement.

### 2. Réutiliser et réemployer

**Maximiser l'utilisation des déchets de bois dans le processus de pyrogazéification et de chaufferie** afin de concilier la production de suffisamment de gaz renouvelable et de chaleur avec la préservation du puit carbone naturel de la France. L'utilisation de déchets de bois permettrait de préserver en partie les forêts. Dans son plan déchets, le comité stratégique de la filière bois prévoit d'en valoriser 0,9 Mt en énergie. Cela correspond à environ 5 TWh valorisables en chaleur directe et en gaz par pyrogazéification.

**Valoriser les déchets de bois** issus des opérations de déconstruction. Pour assurer un maillage territorial fin, prévoir des plateformes de stockage et soutenir le développement des scieries mobiles comme l'initiative de Valdélia.

### 3. Recycler

**Augmenter le recyclage du papier, du carton et des connexes de BO en BI** pour piéger le carbone autrefois absorbé par les forêts. 60% du papier et du carton seront issus du recyclage en 2050<sup>(2)</sup>.

### 4. Solutions amont/aval

**Encourager l'utilisation du bois dans la construction** par la voie législative afin d'augmenter le stock carbone et d'accroître le gisement disponible pour les usages énergétiques. L'augmentation des connexes générés par la transformation du BO augmentera le gisement disponible pour la production d'énergie.

**Soutenir le développement d'une sylviculture dynamique et encourager la gestion mutualisée des forêts entre secteur public et privé** : sans sylviculture dynamique, les ressources en biomasse seraient insuffisantes. Cette gestion pourrait augmenter la surface forestière de 25% d'ici 2050. De plus, 60%<sup>(3)</sup> des ressources supplémentaires sont concentrées dans les forêts privées sous-exploitées.

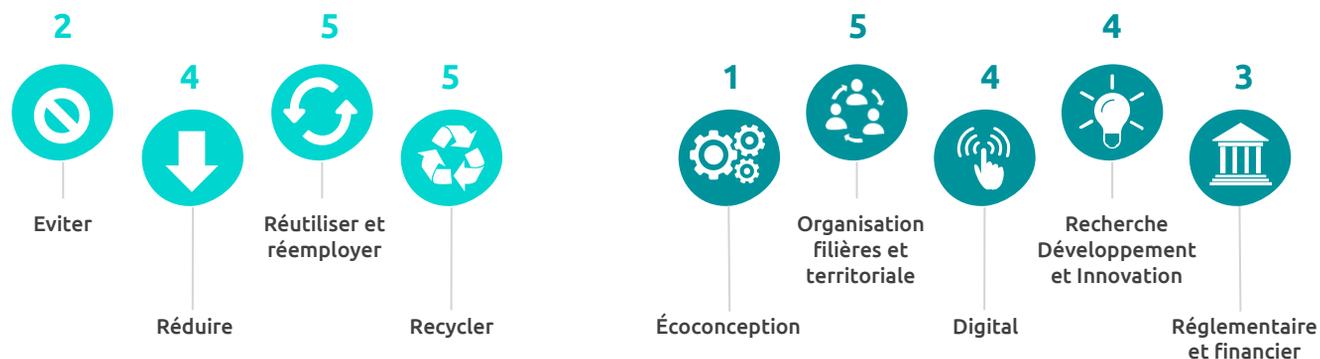
**Utiliser des outils technologiques de suivi et de pilotage intelligents**, notamment de cartographie, pour mieux évaluer la disponibilité forestière et ainsi faciliter la gestion de la forêt.

**Viser l'équilibre commercial (hypothèse du modèle) ou une balance commerciale positive qui satisfait en priorité le marché intérieur du bois**. Avec 32% de la récolte de bois exportée, la filière française est déjà sous tension alors que l'énergie biomasse reste encore peu développée<sup>(4)</sup>. Limiter les importations pour réduire l'impact carbone du transport.

**Importer du bois énergie exclusivement issu de forêts gérées de façon durable** afin que l'énergie produite soit considérée comme renouvelable.

**Augmenter les soutiens financiers et investir dans un développement local** afin de pérenniser la filière bois énergie.

## SYNTHÈSE DES LEVIERS & EFFORTS CIRCULAIRES NÉCESSAIRES



(1) [INRAE 2017a], INRAE, Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique ?, Novembre 2017

(2) [ADEME 2021a], ADEME, Transition(s) 2050, Novembre 2021, analyses Capgemini

(3) [ADEME 2016a], IGN, ADEME, FCBA, Disponibilités forestières pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035, Février 2016

(4) [AGRESTE 2021a], AGRESTE, Synthèses conjoncturelles - commerce extérieur bois et dérivés, Mai 2021

# R13 - AGRICULTURE



## À RETENIR

**Rôle dans la SNBC :** fournir alimentation et énergie, en particulier pour la production de gaz vert.

**Enjeu ressource :** les surfaces agricoles, limitées par nature, doivent répondre aux besoins en alimentation humaine et animale, en énergies et en création de puits carbone.

**Solutions majeures :** encourager le développement des cultures intermédiaires à vocation énergétique pour éliminer la concurrence entre l'usage énergétique et l'usage alimentaire des cultures. Améliorer le rendement des technologies pour réduire le besoin en ressources agricoles.

## DESCRIPTION, RISQUES ET ENJEUX

### 1. Impact dans la SNBC

Jusqu'à présent peu valorisées en énergie, les ressources agricoles prennent un rôle croissant dans la SNBC pour la production de biomasse gazeuse ou liquide. Alors que les ressources agricoles ne produisent qu'environ 3 TWh de biométhane injecté actuellement, elles ont le potentiel de fournir jusqu'à 123 TWh de gaz vert par méthanisation d'ici 2050<sup>(1)</sup>.

### 2. Présentation et utilité

Les ressources agricoles mobilisables pour la production d'énergie sont de nature animale et végétale. Il s'agit précisément des cultures intermédiaires, d'herbes et de fourrages, des résidus de cultures, et des effluents d'élevage.<sup>(1)</sup> Plantées entre deux récoltes, les cultures intermédiaires sont utilisées pour améliorer la structure du sol, piéger le nitrate et conserver la biodiversité en été et en hiver. Une fois récoltées, elles sont restituées au sol pour fertiliser les terres.

Lors de leur décomposition, ces ressources organiques produisent une quantité de méthane spécifique. Le potentiel méthanogène, quantité maximale de méthane émis, est alors utilisé pour calculer l'énergie primaire espérée pour chacune de ces ressources.

Utilisées pour produire du biogaz ou du biométhane, ces ressources ne sont pas toutes mobilisées dans les mêmes procédés : la méthanisation peut être produite à partir de l'ensemble des ressources agricoles citées préalablement, la pyrogazéification mobilise essentiellement les ressources lignocellulosiques, tandis que la gazéification hydrothermale privilégie la valorisation de gisements qui ne sont actuellement pas mobilisés.

### 3. Contexte de marché, enjeux et criticité

Bien que les ressources agricoles ne soient pas considérées comme très critiques, elles restent tout d'abord limitées par les surfaces cultivables. De plus, particulièrement concernées par les conflits d'usage elles sont stratégiques pour assurer la souveraineté alimentaire, le développement des bioplastiques et la souveraineté énergétique avec la production de biomasse gazeuse<sup>(2)</sup>. Enfin, les substituts aux ressources agricoles comme les déchets et le bois seront déjà utilisés au maximum pour fabriquer du gaz renouvelable nécessaire dans le mix en 2050, ce qui rend les ressources agricoles indispensables. La mobilisation de la biomasse agricole pour la production de gaz doit alors respecter la priorité des usages alimentaires et le maintien des puits de carbone naturels.

## SYNTHÈSE DE LA CRITICITÉ



(1) [ADEME 2018a], ADEME, Un mix de gaz 100 % renouvelable en 2050 ?, Janvier 2018

(2) [SENAT 2021a], Sénat, Rapport d'information, La méthanisation dans le mix énergétique, enjeux et impacts, Septembre 2021

## SOLUTIONS CIRCULAIRES &amp; RECOMMANDATIONS

**0. Eviter**

**Baisser la consommation de viande en France.** Les français consomment en moyenne 123 g de viande par jour, qui requièrent 4 300 m<sup>2</sup> de surface agricole. Dans la décennie passée la consommation a baissé de 10%. Les scénarios Transition(s) 2050 envisagent des baisses de 10% à 70% dans la consommation d'ici 2050. Baisser de 30% la consommation carnée libère 17% de la surface agricole pour d'autres usages comme l'énergie<sup>(1)</sup>. Bien que la diminution de la consommation de viande entraîne une réduction des effluents d'élevage, il est plus intéressant de récolter davantage de résidus de cultures et de cultures intermédiaires puisque leur potentiel méthanogène est supérieur.

**Maîtriser et baisser la demande en énergie (MDE), ici en chaleur.** 50% à 60% de la consommation de chaleur de l'ensemble du parc bâti peut être évitée grâce à la rénovation ou la construction neuve. Cette diminution des besoins permet d'économiser des ressources en biomasse énergie.

**1. Réduire**

**Encourager le développement des cultures intermédiaires à vocation énergétique et accompagner les agriculteurs dans le choix des espèces les plus appropriées.** Ce type de culture s'intercale entre deux cultures alimentaires, et permet d'économiser d'autant l'usage de surface agricole utile en 2050. Elle limite donc la compétition entre la valorisation énergétique et l'usage alimentaire des cultures. Toutefois, il est important que les espèces sélectionnées soient adaptées au climat, dotées du meilleur potentiel méthanogène et qu'elles n'entraînent aucune conséquence sur les récoltes alimentaires suivantes. Les pratiques d'ensilage et de désilage sont également essentielles pour éviter les pertes de potentiel méthanogène au cours de la période de stockage<sup>(2)</sup>.

**Améliorer le rendement des technologies de pyrogazéification et de gazéification hydrothermale** pour réduire la quantité de ressources agricoles nécessaire. Une augmentation du rendement de la pyrogazéification de 5%, estimé actuellement à environ 63%, permettrait d'économiser d'autant la surface agricole nécessaire.

**Valoriser les effluents d'élevage, les résidus de cultures et les cultures intermédiaires qui ne sont pas employés dans la fertilisation des terres :** ces ressources peuvent être mobilisées pour produire du biogaz ou du biométhane.

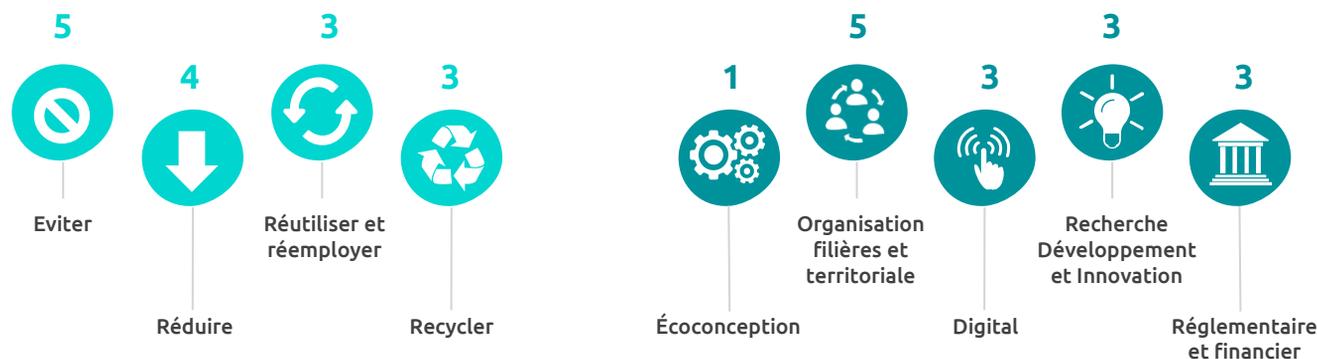
**Utiliser le digestat issu du processus de méthanisation pour fertiliser les terres.** Ce qui permet de diminuer le recours aux engrais fossiles.

**2. Solutions Amont/Aval**

**Utiliser des outils numériques,** notamment de cartographie, pour augmenter les rendements tout en limitant l'impact environnemental avec l'agriculture de précision. Cette technologie permet d'améliorer la connaissance des sols et ainsi d'augmenter les rendements.

**Réorganiser les filières industrielles et développer l'écologie industrielle et territoriale** pour que les coproduits soient facilement récupérables.

## SYNTHÈSE DES LEVIERS &amp; EFFORTS CIRCULAIRES NÉCESSAIRES



(1) [ADEME 2021a], ADEME, Transition(s) 2050, Novembre 2021

(2) [PERSPECTIVES AGRICOLES] Cultures de biomasse : zoom sur le potentiel méthanogène des CIVE, 2021

# R14 - DECHETS



## À RETENIR

**Rôle dans la SNBC :** les déchets constituent des ressources à la fois comme matières et comme sources d'énergie.

**Enjeu ressource :** en première intention, réduire le volumes de déchets. En seconde intention, les valoriser.

**Solutions majeures :** améliorer la performance de la filière de valorisation, utiliser le gisement de déchets stockés ou enfouis pour produire de l'énergie et accélérer le développement des technologies de pyrogazéification et gazéification hydrothermale.

## DESCRIPTION, RISQUES ET ENJEUX

### 1. Impact dans la SNBC

La réussite de la SNBC dépend des émissions liées à nos besoins énergétiques mais également des flux de matière relatifs à notre besoin en ressources et aux déchets générés.

Si 72% des déchets sont aujourd'hui valorisés en France, 87 Mt de déchets restent inutilisés<sup>(1)</sup>. Cette partie des déchets, stockés ou enfouis, émet du méthane dans l'atmosphère ou pollue les écosystèmes. La valorisation matière et énergétique de ce gisement permet donc de répondre aux objectifs du paquet de l'économie circulaire, adopté à la Commission Européenne en 2017. Ce dernier exige en particulier un taux de recyclage des déchets municipaux de 65% et fixe le plafond de leur rejet en installations de stockage des déchets non dangereux (ISDND) à 10% des volumes initiaux<sup>(1)</sup>.

### 2. Présentation et utilité

Les ménages, les collectivités et les entreprises, émettent différentes formes de déchets. Il s'agit par exemple des déchets du BTP, des déchets fermentescibles, des coproduits de l'industrie agroalimentaire, des liqueurs noires, des boues de station d'épuration, des déchets verts ou des déchets de bois. Ces déchets peuvent être utilisés séparément après une étape de tri ou en mélange comme c'est le cas des combustibles solides de récupération (CSR), spécialement préparés pour une valorisation en énergie, et des déchets résiduels envoyés en ISDND<sup>(2)</sup>. La présente étude a identifié le potentiel primaire disponible de CSR à 59 TWh, et à 51 TWh pour les autres déchets cités.

Bien que le déchet soit par définition inutile et abandonné par son propriétaire, il est aussi considéré comme une ressource pour un nombre croissant d'acteurs économiques. Suivant sa nature, le déchet est alors valorisé sous forme de matière, utilisé pour fertiliser les terres et pour produire de l'énergie par ordre de priorité.

Différentes technologies sont mobilisées pour produire du gaz, de la chaleur et de l'électricité à partir des déchets. Le biogaz peut être directement produit dans les ISDND, produit par méthanisation à partir de déchets issus des activités agricoles, d'industries agroalimentaires, boues de stations d'épuration..., produit par pyrogazéification à partir de déchets de bois et de CSR ou produit par gazéification hydrothermale à partir de déchets de biomasse humides qui ne sont pas valorisés à l'heure actuelle. Les chaufferies et les centrales de cogénération produisent de la chaleur et de l'électricité à partir de déchets triés et utilisent les CSR, gisement également mobilisé par la pyrogazéification<sup>(3)</sup>.

### 3. Contexte de marché, enjeux et criticité

La disponibilité est le critère déterminant pour évaluer la criticité de la ressource déchet : elle varie en fonction de leur nature. Les déchets les moins critiques sont les déchets résiduels, non triés par les usagers, qui ne font pas l'objet de compétition d'usage à l'heure actuelle et qui doivent justement trouver des voies de valorisation.

Au contraire, les déchets triés sont un peu plus critiques : ils sont les plus demandés, en particulier pour une valorisation en matière et en compostage, comme dans le cas des papiers, cartons et déchets fermentescibles. Ce gisement est également moins disponible en raison des limites techniques du système de collecte et de traitement des déchets.

Il convient ainsi d'utiliser au mieux le gisement de déchets restant en énergie par méthanisation, pyrogazéification, gazéification hydrothermale, chaleur et électricité. Néanmoins, une gestion rigoureuse de ce gisement deviendra nécessaire à mesure que le niveau de tension sur les déchets augmentera.

## SYNTHÈSE DE LA CRITICITÉ



(1) [ADEME 2020b], ADEME, Déchets - Chiffres clé Edition 2020, Septembre 2020

(2) [ADEME 2018a], ADEME, Un mix de gaz 100 % renouvelable en 2050 ?, Janvier 2018

(3) [PGAZ 2021a], GRDF GRTGAZ SPEGNN TERECA, Perspectives Gaz 2020, Juin 2021



## SOLUTIONS CIRCULAIRES & RECOMMANDATIONS

### 0. Éviter

**Éviter la production de déchets.** En 2018, la France produisait 5,1 tonnes de déchets par habitant alors que l'Italie en générait seulement 1,5 tonnes par habitant<sup>(1)</sup>.

**Utiliser en priorité les déchets pour la matière et le compostage, en second lieu pour l'énergie :** l'usage matière permet de stocker du carbone comme la forêt et permet de se substituer à des sources fossiles d'énergie. La valorisation en énergie des déchets est donc à éviter lorsque ces derniers peuvent être valorisés en matière.

**Maîtriser et baisser la demande en énergie (MDE).** 50% à 60% de la consommation en chaleur du parc bâti peut être évitée grâce à la rénovation ou la construction neuve, ce qui permet d'économiser les ressources en déchets.

### 1. Réduire

**Maximiser le tri à la source des biodéchets** pour faciliter la mise à disposition rapide du gisement fermentés cible. La loi AGECE rend ce tri à la source à partir de 2023.

**Valoriser les déchets urbains et industriels habituellement stockés ou enfouis** pour éviter les émissions de gaz à effet de serre provoquées par leur décomposition. Selon la banque mondiale, les déchets solides étaient à l'origine de 5% des émissions globales en 2016, soit 1,6 milliards de tCO2<sup>(2)</sup>.

### 2. Réutiliser et réemployer

**Accélérer le développement des technologies** de collecte et de traitement des déchets afin d'augmenter la taille du gisement mobilisable en énergie.

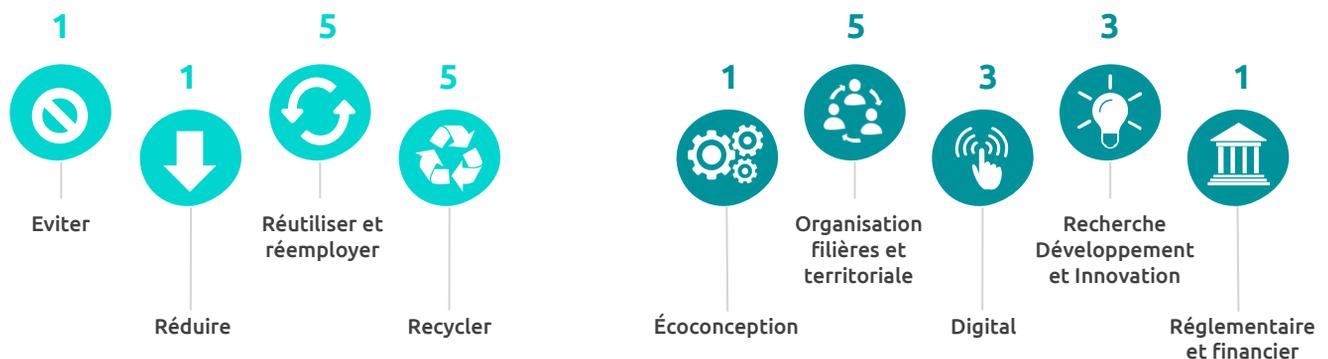
### 3. Solutions amont/aval

**Améliorer la performance de la filière de valorisation par le développement de l'écologie industrielle et territoriale** afin de permettre des prix compétitifs et d'exploiter, autant que possible, les déchets délaissés pour la production d'énergie. La filière de valorisation devra se réorganiser autour de nouveaux acteurs et faciliter les échanges de déchets grâce à la digitalisation pour que leurs coproduits soient facilement récupérables.

**Viser l'équilibre commercial (le modèle se base sur cette hypothèse) ou une balance commerciale** positive pour les déchets. Le solde commercial des déchets français atteignait 3 milliards d'euros en 2018, une meilleure valorisation au sein de l'hexagone pourrait faire basculer cet équilibre. En effet, l'ADEME estime que la France devra importer 1Mt de CSR en 2050 pour satisfaire les besoins en gaz des ménages ainsi que ceux de l'industrie<sup>(3)</sup>.

**Mobiliser le gisement de déchets pour les technologies les plus pertinentes** lorsqu'une compétition d'usage intervient entre des technologies pour la valorisation en énergie. Plusieurs facteurs peuvent alors entrer en compte tels que la saisonnalité, le transport et le rendement de la technologie. La gestion du gisement de déchets mobilisable sera alors optimisée et l'énergie finale injectée sera maximale.

## SYNTHÈSE DES LEVIERS & EFFORTS CIRCULAIRES NÉCESSAIRES



(1) [MTE] [Rapport sur l'état de l'environnement](#), 2021

(2) [LA BANQUE MONDIALE], [Selon un nouveau rapport, la production mondiale de déchets augmentera de 70% d'ici 2050 si rien ne change rapidement](#), 2018

(3) [ADEME 2021a], ADEME, Transition(s) 2050, Novembre 2021

