

TECHNOLOGIES DURABLES ÉMERGENTES

ÉDITION 2023



TECHNOLOGIES DURABLES ÉMERGENTES

Édition 2023

AUTEURS CLÉS :

Élodie Le Cadre Loret,
Jan Mertens,
Jean-Pierre Keustermans,
Céline Denis.

CO-AUTEURS :

Laurent Baraton, Sanae Bouaichi,
Gaspard Bouteau, Julie Clavreul,
Sidney Castin, Jim Gripekoven,
Olivier Ledent, Fanny Magné,
Adeline Miquelot, Julien Merlin,
Jonas Pigeon, Stijn Scheerlinck,
Zarea Mures.

SOMMAIRE

Édito : De la science du climat au génie climatique.....4

INTRODUCTION 7

La transition énergétique : un système intégrant plusieurs systèmes7

Carburants CirculAIR : transformer de manière entièrement circulaire
l'électricité bas carbone en e-carburants !.....9

Ce rapport se concentre sur les technologies actuellement émergentes
qui pourraient faire partie de ce nouveau système..... 13

1. TENDANCES ÉMERGENTES 14

Enjeu matériel critique : exemples de PV et de batteries
à l'échelle du terawatt 16

La géoingénierie gagne du terrain dans la lutte contre
le changement climatique 30

2. TECHNOLOGIES ÉMERGENTES.....44

Solutions fondées sur la nature..... 46

Énergie solaire spatiale..... 60

L'hydrogène turquoise par pyrolyse ?..... 68

Production de carburants solaires par chimie induite par la lumière..... 76

Bibliographie..... 86

ANNEXE : Niveaux de maturité technologique 94

Conception graphique, recherche iconographique et conception de schémas et illustrations :
Agence Gaya (gayacom.fr)

DE LA SCIENCE CLIMATIQUE AU GÉNIE CLIMATIQUE



Les scientifiques appuient généralement leur réflexion sur la question « quoi ? » et ils ont très bien réussi à modéliser le climat et à décrire des scénarios probables, a déclaré John Anderson, le président de la National Academy of Engineering des États-Unis dans une interview de septembre 2022 (Engineering the Transition to Net-Zero Carbon Emissions | National Academies).

« Les ingénieurs réfléchissent plutôt à partir de la question « comment ? ». Maintenant que nous connaissons les objectifs, nous devons nous demander comment les atteindre – par quels moyens pouvons-nous parvenir à une économie à zéro émission nette de carbone ? », a-t-il demandé.

La tempête est imminente. Il est grand temps d'agir.

Le dernier rapport du Groupe de travail III du GIEC, publié au printemps 2022, ne laisse aucun doute scientifique sur le fait que le changement climatique actuel est induit par l'homme. Le sentiment d'urgence s'est encore accru durant l'été 2022 avec la survenue d'événements météorologiques plus extrêmes, tels que des incendies et des inondations dans le monde entier, et une sécheresse exceptionnellement sévère en Europe. Le défi ne réside pas tant dans le développement de technologies à partir de zéro que dans la montée en gamme de ce qui existe déjà dans les laboratoires des universités, des centres de recherche, des start-ups et des entreprises. L'« industrialisation » de ces technologies pose un grand défi : il ne suffit pas de montrer qu'une technologie fonctionne en laboratoire ou dans un petit prototype pour qu'une entreprise s'en empare et la déploie massivement.

Dans de nombreux cas, il existe un « écart commercial » significatif qui rend la technologie peu attractive pour les entreprises en raison du risque financier élevé qui lui est associé. Mais il n'est pas impensable que la société, en raison de ce sentiment accru d'urgence, ne tolère plus longtemps « l'excuse » de ce hiatus commercial et impose le déploiement à grande échelle des technologies nécessaires, malgré les risques financiers.

Cela pourrait être le cas en particulier dans des secteurs comme l'aviation, le transport maritime, les industries de l'acier et du ciment, le transport à longue distance d'énergie (renouvelable) et le stockage à long terme d'énergie (renouvelable). Ces secteurs représentent environ un tiers de nos besoins énergétiques. Des contraintes thermodynamiques importantes doivent être prises en compte dans la

recherche de solutions. Mais même si nous réduisons les émissions dès maintenant, les événements extrêmes – comme les inondations, les sécheresses, les tornades et la fonte des glaces en Arctique – ne disparaîtront pas dans les années, ni même dans les décennies à venir. Nous devons donc nous adapter tout en continuant à développer les nombreuses actions climatiques que nous avons déjà identifiées afin d'atteindre notre objectif d'une société à zéro carbone net.

En outre, nous devons peut-être envisager des efforts en matière d'ingénierie climatique et avoir une discussion ouverte et scientifique sur les risques et les avantages de cette approche, qui ne sont pas encore pleinement compris. Notre décision d'inclure le sujet (parfois) tabou de la géoingénierie dans ce document se veut une contribution à cette discussion. Le sujet ne doit absolument pas être considéré comme une voie à suivre pour continuer à utiliser les combustibles fossiles à l'avenir, quel qu'il soit. Le boisement et le reboisement, par exemple, présentent un grand potentiel mais, bien que moins controversés que certaines autres idées, leur impact sur l'environnement local reste à évaluer. Cela vaut également pour plusieurs autres technologies d'ingénierie climatique qui semblent prometteuses mais dont les impacts à long terme doivent être étudiés en détail. Pour être clair, le génie climatique ne doit jamais être considéré comme une « solution miracle », une solution unique et rapide aux problèmes de la planète et certainement pas comme une excuse pour poursuivre notre économie basée sur les combustibles fossiles. Mais à mesure que la société progresse dans la lutte contre le changement climatique, nous devons peut-être le considérer comme une solution potentielle – et qui pourrait devenir nécessaire pour atteindre nos objectifs climatiques. C'est pourquoi ce débat est indispensable.

ENGIE, leader de la transition énergétique mondiale, promeut une collaboration approfondie dans tous les secteurs et pays, ainsi qu'entre entreprises et industries, pour s'attaquer aux problèmes auxquels nous sommes confrontés conjointement afin de mettre en œuvre des solutions. Le défi à relever est trop important pour une seule entreprise, une seule industrie, un seul pays, et même un seul continent. Nous avons rédigé ce document dans l'espoir d'inspirer tous ceux qui souhaitent participer à cette transition. Bref, il s'agit d'un appel à une collaboration mondiale par-delà toutes les frontières.

Jan Mertens,

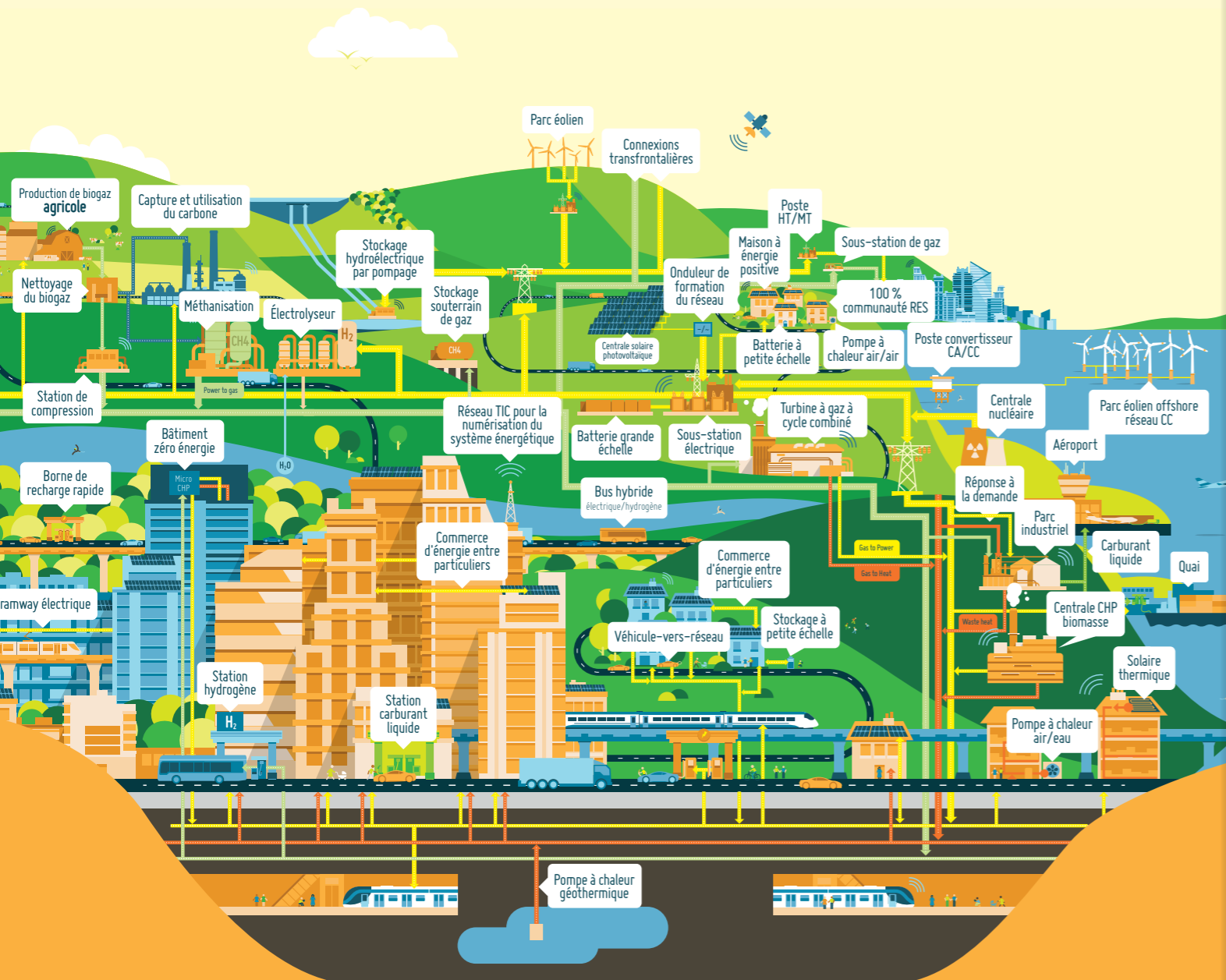
Responsable des affaires scientifiques ENGIE, Professeur à l'Université de Gand

INTRODUCTION

La transition énergétique : un système intégrant plusieurs systèmes.

Le succès de la transition énergétique neutre en carbone exige d'orchestrer un réseau complexe intégrant diverses technologies. Dans ce contexte, l'efficacité énergétique et la circularité resteront importantes, et il faudra réfléchir davantage à la manière dont les rejets d'une industrie peuvent servir d'intrants à une autre. Cette symbiose industrielle nécessitera non seulement des solutions techniques mais aussi non techniques, telles que des cadres réglementaires. Le biogaz est un exemple intéressant de pensée circulaire, notamment en ce qui concerne l'utilisation de biodéchets comme matières premières. Il ne fait aucun doute que l'électricité jouera un rôle crucial et, bien plus qu'aujourd'hui, elle sera intégrée non seulement du point de vue de la gestion de la demande, c'est-à-dire de l'adéquation entre consommation et production, mais elle sera également étroitement liée au réseau de gaz et vice versa. Les molécules fabriquées à partir de la biomasse ou de l'électricité renouvelable seront nécessaires non seulement pour le stockage et le transport d'énergie renouvelable à long terme, mais aussi pour certaines industries lourdes à réduire (ciment, acier, verre...) ainsi que pour la mobilité lourde (transport maritime, aviation...).

L'intégration et l'orchestration complexes de toutes ces technologies sont parfaitement décrites dans la figure ETIP SNET VISION 2050. On y apprend que des investissements majeurs seront indispensables pour le déploiement à grande échelle de dispositifs de conversion et de stockage d'énergie, pour la modernisation et l'extension des réseaux énergétiques et pour l'utilisation de solutions numériques. La version animée de la figure ETIP SNET présente notre sélection des tendances et technologies durables émergentes décrites dans ce document. Cela nous rappelle que ce que nous présentons ici dans ce document n'est qu'une (petite) partie de l'ensemble du réseau de technologies intégrées. Pour illustrer cette interconnexion et cette symbiose industrielle, nous expliquons ci-dessous le concept de carburant CIRcuLAIR, qui lie l'électricité aux molécules.

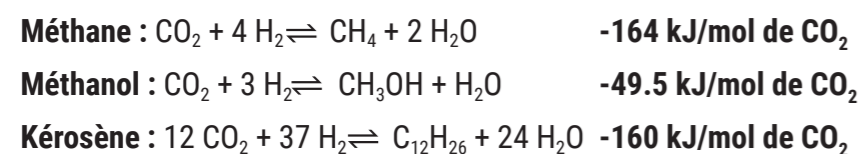


Carburants CircuAIR : transformer de manière entièrement circulaire l'électricité bas carbone en e-carburants !

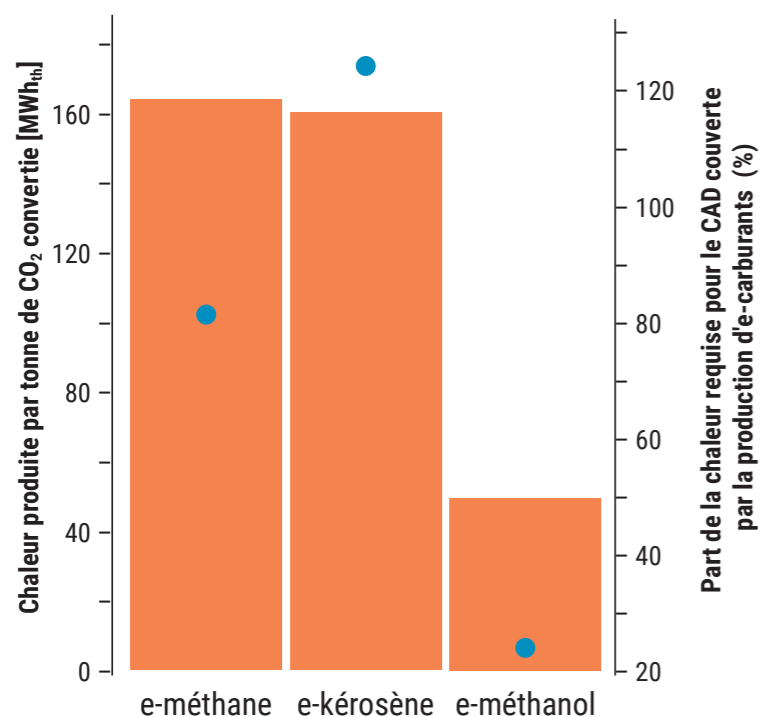
La réaction entre le CO₂ et l'H₂ en e-carburants produit de l'eau qui peut servir à produire du H₂. Elle produit également de la chaleur qui peut servir à capter le CO₂ présent dans l'air.

La chaleur provenant de la synthèse des e-carburants, avec la chaleur récupérée à partir de l'électrolyse de l'eau, suffit pour faire fonctionner le captage d'air direct (CAD).

La synthèse des e-carburants est exothermique et produit de la chaleur (et de l'eau).

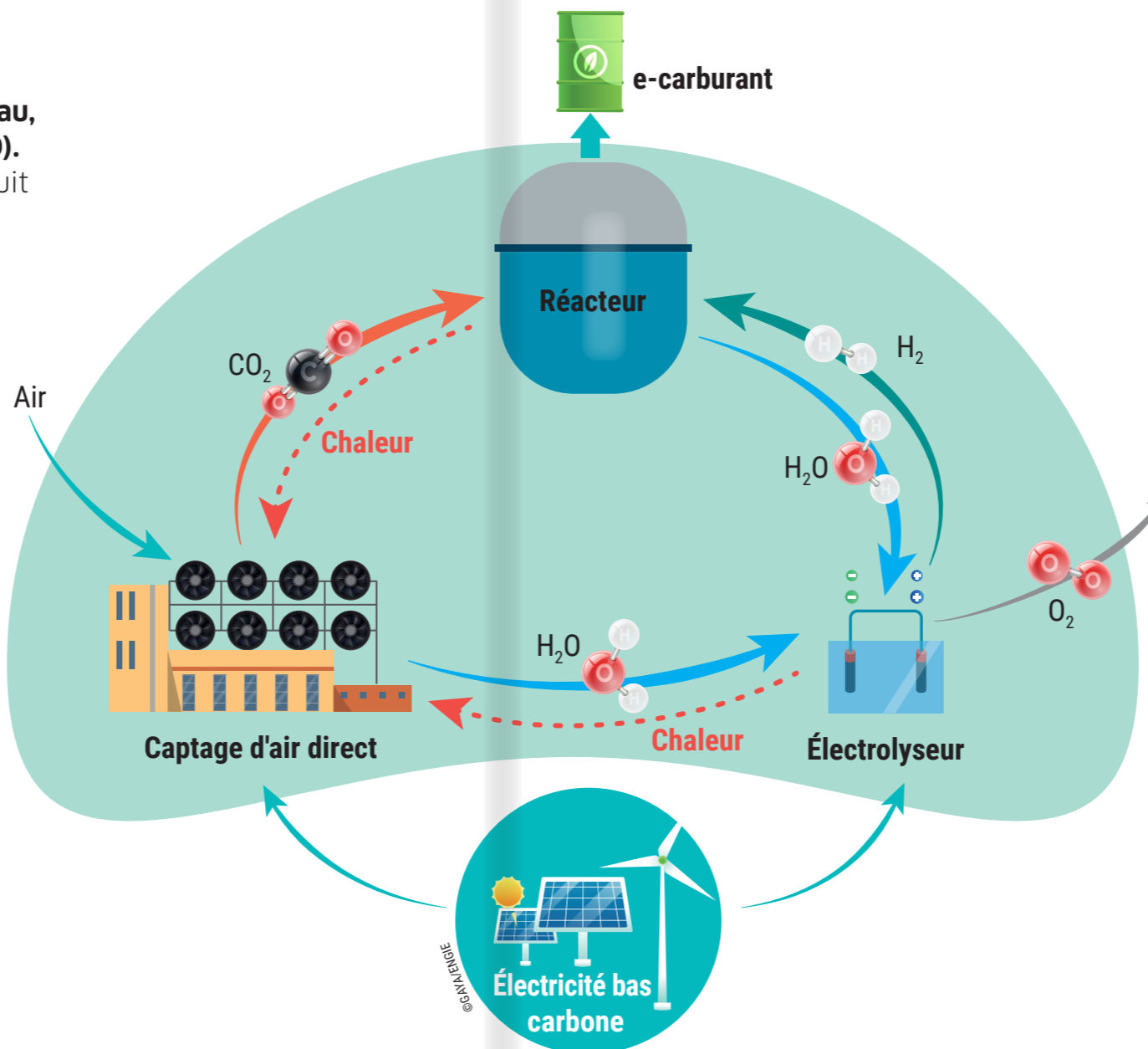


C₁₂ pris en moyenne sur l'intervalle kérosène (C₈-C₁₆)



● Le point représente la part de chaleur nécessaire au CAD qui est couverte par la production d'e-carburants

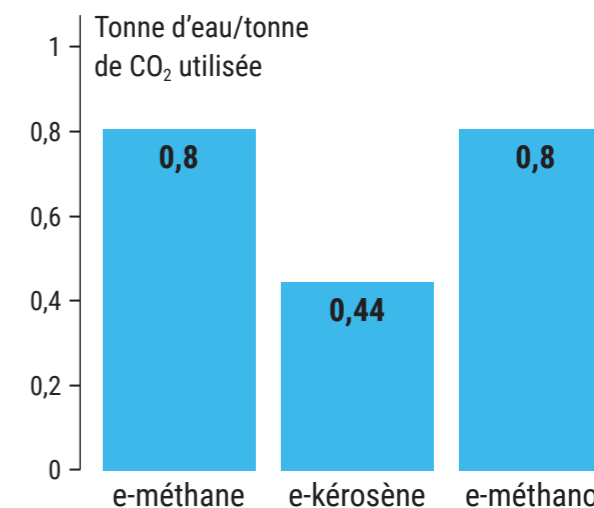
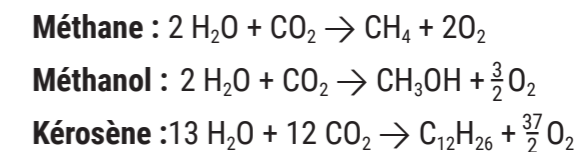
Part de la chaleur nécessaire au CAD et couverte par la production d'e-carburants (%).



La synthèse des e-carburants est exothermique et produit de la chaleur (et de l'eau).

L'eau provenant de la synthèse des e-carburants avec la récupération de l'eau du CAD suffit à faire fonctionner l'électrolyse de l'eau pour la production de H₂.

Malgré la production d'eau pendant la production des e-carburants, le bilan hydrique global est négatif en raison de l'eau nécessaire pour produire du H₂ :



Quantité d'eau nécessaire par tonne de CO₂ utilisée pour produire différents e-carburants (en tonnes d'eau).

Pourquoi convertir de l'électricité à faible teneur en carbone en e-carburants de manière entièrement circulaire ?

Tout d'abord, les solutions de CAD basse température peuvent aujourd'hui capter, en fonction des conditions climatiques, entre 0,8 et 2 tonnes d'eau^[1-2-3] par tonne de CO₂.

En outre, si l'on compare ce chiffre avec les besoins en eau (voir figure ci-dessus), on constate qu'il y a suffisamment d'eau à prélever dans l'air pour produire des e-carburants. De plus, si nécessaire, il est possible de récupérer davantage d'eau à partir de la synthèse des e-carburants.

Cet aspect est particulièrement crucial dans les zones arides, car l'accès à l'eau potable sera un co-bénéfice intéressant de la transition vers une économie de type Power-to-X.



Quels sont les défis à relever pour atteindre la circularité ?

De nombreux défis, tant au niveau de la recherche que des entreprises, restent à relever :

- possibilité d'une légère montée en température de l'électrolyse de l'eau,
- la co-capture d'eau et de CO₂ à partir du CAD,
- la récupération de l'eau et la pureté requise.

L'identification des meilleurs processus pour produire des e-carburants : méthanisation biologique versus catalytique du CO₂ et du H₂ en e-carburants, co-électrolyse de l'eau du CO₂ en e-carburants...

D'un point de vue économique, nous devons comparer le coût du CO₂ provenant du CAD à celui issu de la mer et à celui provenant de la biomasse. Le coût de l'électricité renouvelable et l'accès à une électricité renouvelable abondante et bon marché sont également des aspects essentiels. Enfin, du point de vue du marché, quel e-carburant convient le mieux à quelle application ?

Ce rapport se concentre sur les technologies émergentes qui pourraient faire partie de ce nouveau système.

Énergie solaire spatiale

Solutions basées sur la Nature

Hydrogène turquoise

Carburants synthétiques

Géoingénierie

Matériaux Critiques



1

TENDANCES ÉMERGENTES

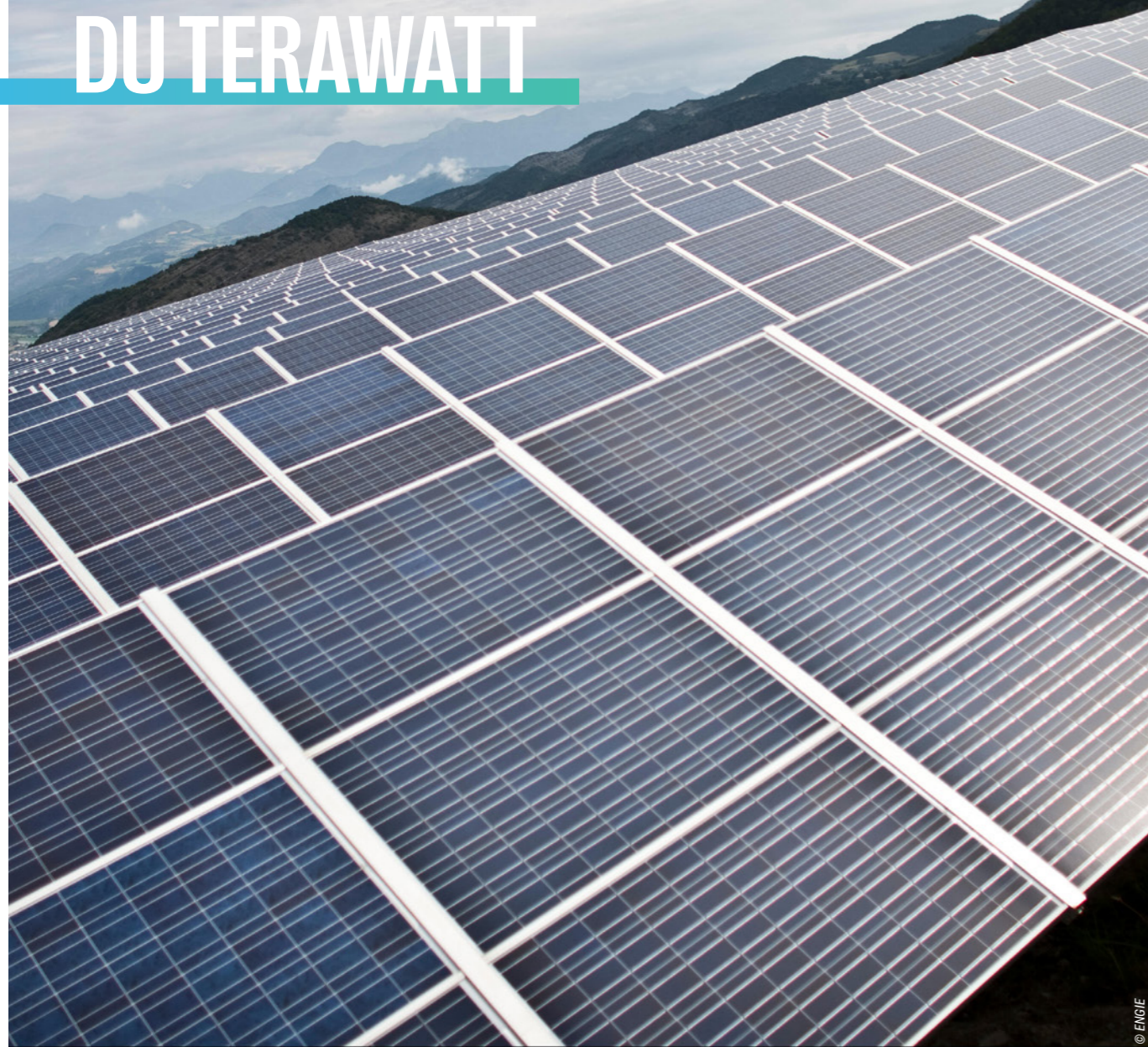
**ENJEU MATÉRIEL CRITIQUE :
EXEMPLES DE PV ET DE
BATTERIES À L'ÉCHELLE
DU TERAWATT**



**LA GÉOINGÉNIERIE
GAGNE DU TERRAIN
DANS LA LUTTE CONTRE
LE CHANGEMENT
CLIMATIQUE**



ENJEU MATÉRIEL CRITIQUE : EXEMPLES DE PV ET DE BATTERIES À L'ÉCHELLE DU TERAWATT



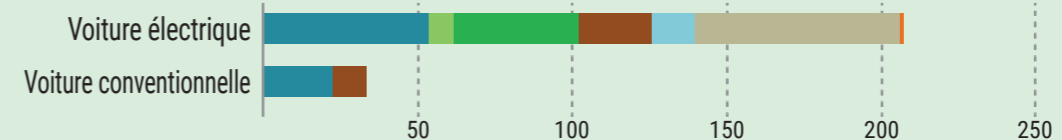
© ENGIE

La transition en termes d'énergie et de mobilité est gourmande en métaux et fait face à des défis en termes de durabilité. L'augmentation exponentielle des énergies renouvelables soulève des problèmes matériels critiques.

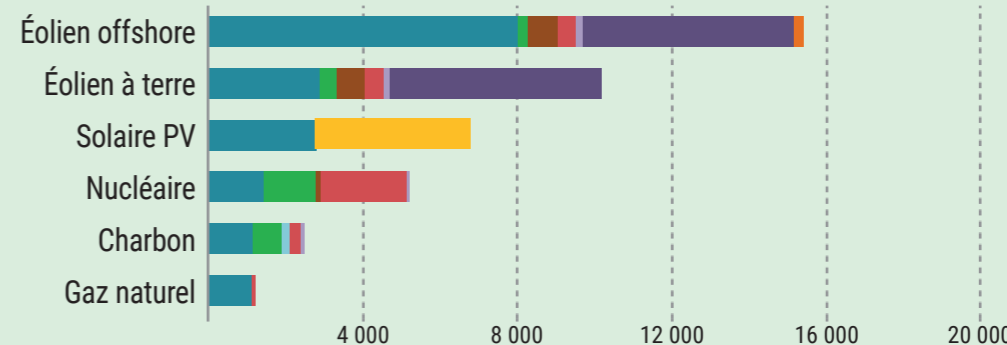


| En 2022, le solaire atteint le seuil de 1 TW. ^[1] |

Transport (kg/véhicule)



Génération d'électricité (kg/MW)

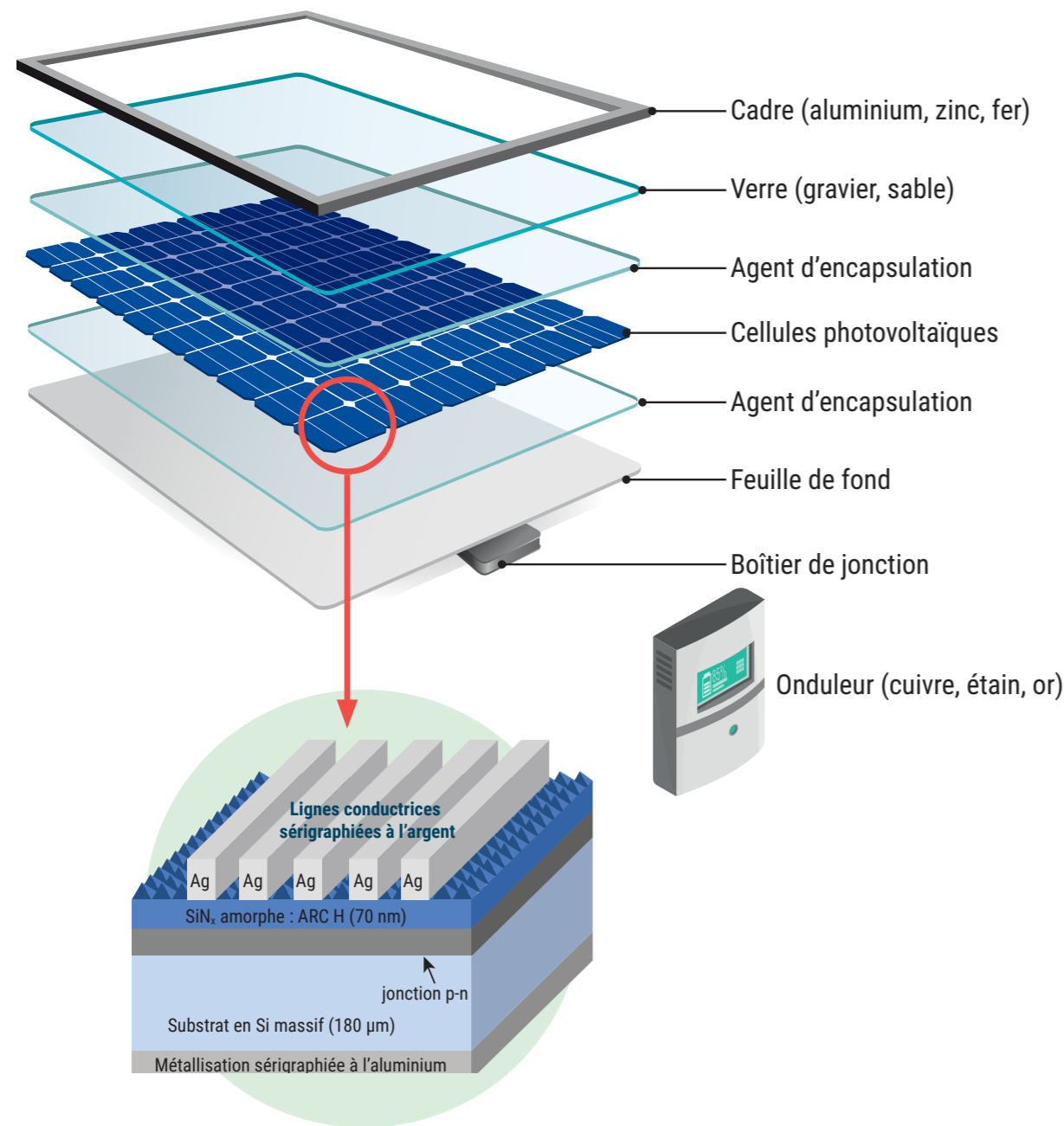


Notes : kg = kilogramme ; MW = mégawatt. Acier et aluminium non inclus

| Minéraux utilisés dans certaines technologies d'énergie propre. ^[2] |

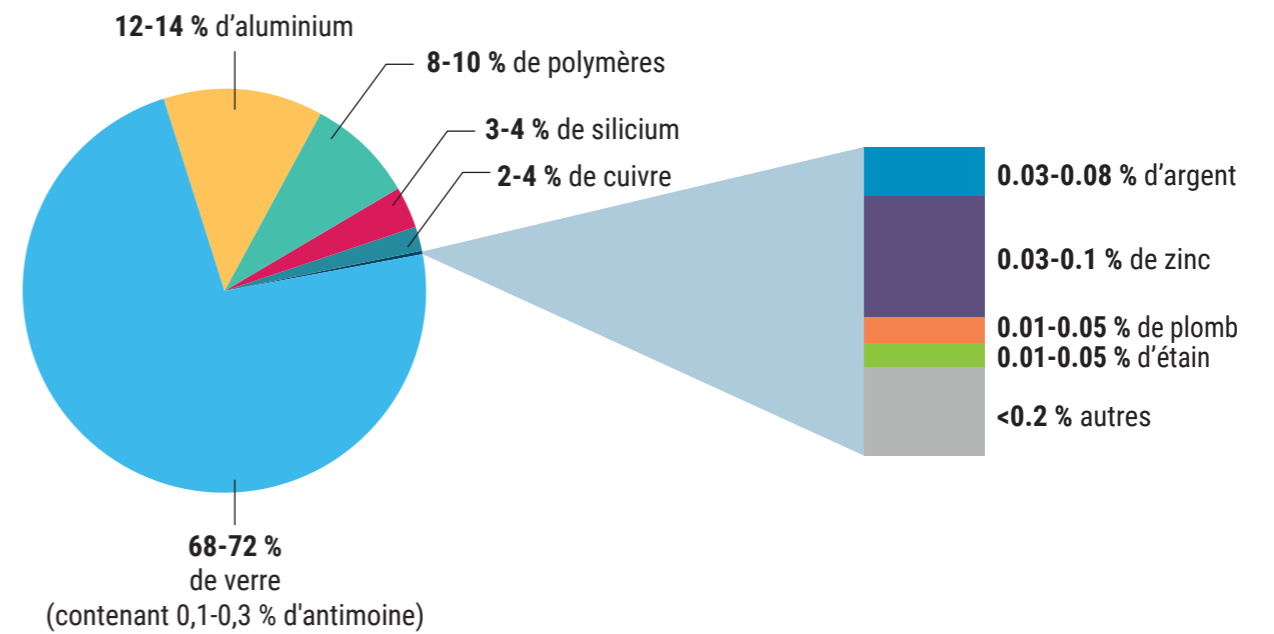
Que contiennent les panneaux photovoltaïques ?

Les panneaux photovoltaïques reposent principalement sur la technologie du silicium cristallin (c-Si), qui représente environ 95 % des parts de marché et devrait rester dominante dans un avenir proche, en plus des technologies plus récentes telles que : le tellure de cadmium (CdTe), le sélénure de cuivre, d'indium et de gallium (CIGS), et la pérovskite. [3]



| La structure du module solaire c-Si : la plupart des minéraux sont utilisés pour produire des cellules PV. [4-5] |

Les cellules c-Si dominent le marché du PV et le verre est le principal matériau transformé en termes de poids, tandis que le polysilicium et l'argent sont les plus importants en termes de valeur.



| Composition pondérée typique d'un module PV c-Si – technologie PERC. [6] |

Les empreintes environnementales ont été réduites de 60 à 75 % depuis 2011*. [7]

Catégorie d'impact	Valeur	Unité	Évolution depuis 2011
Émissions de GES	42,5	gCO ₂ -éq	-60 %
Combustibles fossiles	0,54	MJ	-55 %
Particules	3,63	10 ⁻⁹ incidences en termes de maladie	-69 %
Acidification	0,36	mmol H ⁺ -éq	-63 %
Pénurie d'eau	7,49	L eau-éq	-75 %

| Les impacts environnementaux du cycle de vie d'1 kWh d'électricité en courant alternatif. [7] |

TENDANCE DE LA DEMANDE TECHNOLOGIQUE

167 GW
EU 2020

x 6

1 043 GW
EU 2050

Principales matières premières concernées* :

- Aluminium
- Germanium
- Plomb
- Argent
- Borate
- Or
- Nickel
- Étain
- Cuivre
- Fer
- Silicium
- Zinc

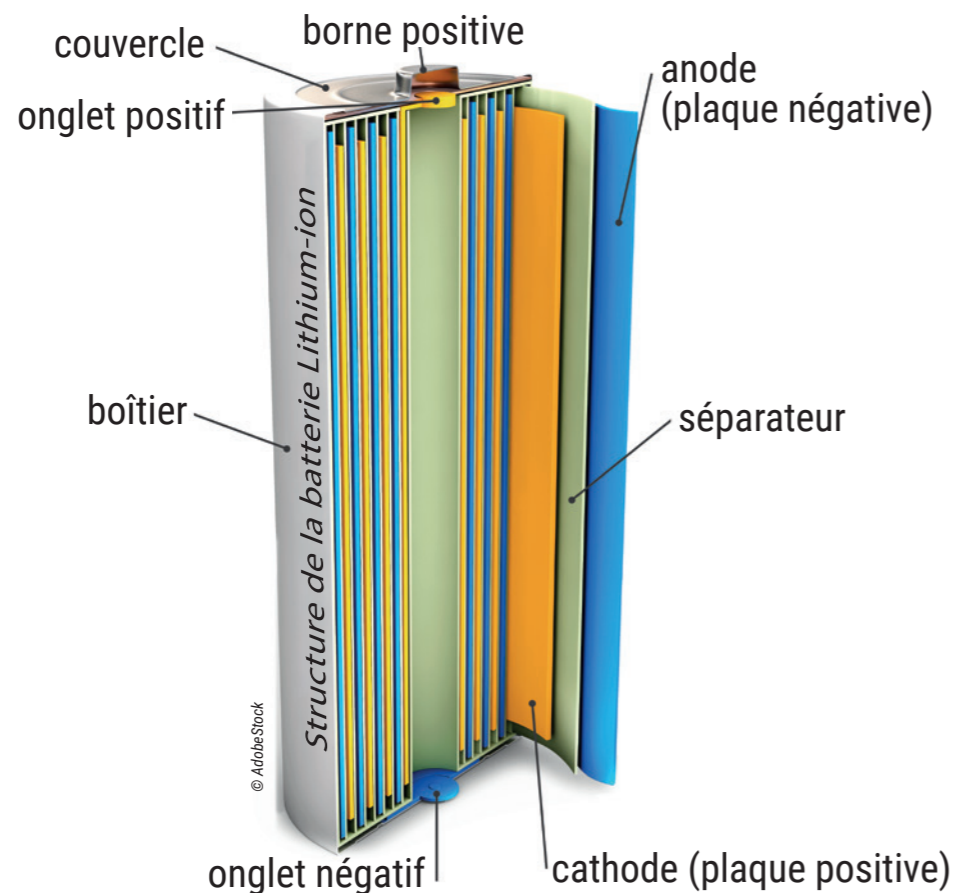
* En rouge : matières premières critiques selon l'évaluation du risque d'approvisionnement par la Commission de l'Union Européenne en 2020.

Source [8-9]

*L'évaluation s'appuie sur les données de 2017-2019, avec une efficacité de module de 19,5, un rendement annuel européen moyen de 975 kWh/kWp, et en supposant un taux de dégradation linéaire de 0,7 %/an, une durée de vie de 30 ans pour le panneau et de 15 ans pour l'onduleur. [6]

Que contient une batterie Li-ion ?

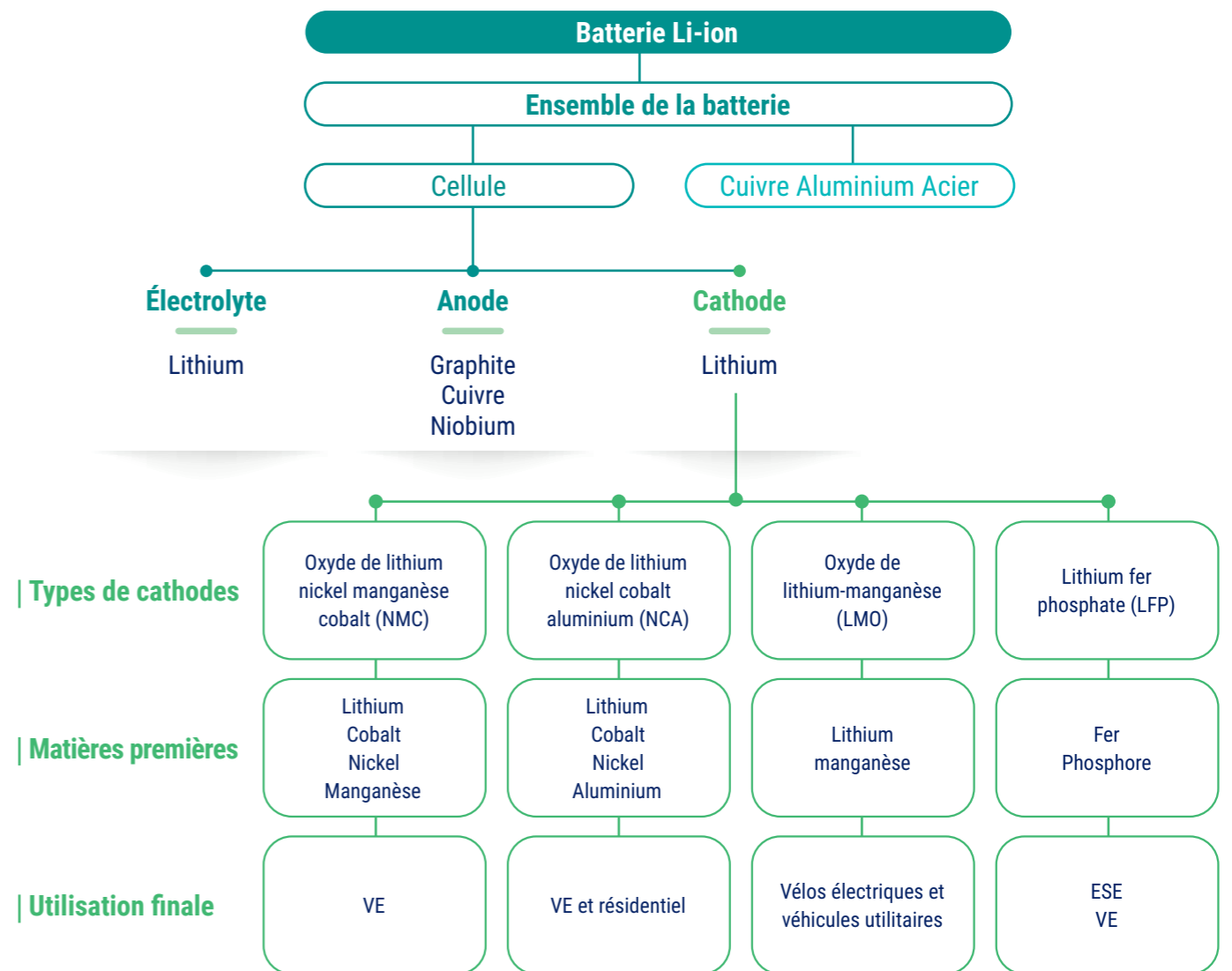
La batterie Li-ion est la batterie la plus polyvalente ; elle évolue constamment, pour des performances toujours plus élevées, tout en atténuant les problèmes critiques de sécurité et de matériaux problématiques critiques.



| Structure d'une cellule au lithium. |

Une batterie Li-ion est composée d'une anode, d'une cathode et d'un séparateur placés dans un électrolyte. Il existe différents types de cathodes, qui permettent d'obtenir une densité énergétique, une durée de vie, une stabilité thermique et une puissance spécifique différentes pour la batterie, et qui sont donc utilisés dans différentes applications.

Les cathodes contiennent les matériaux les plus critiques, à savoir le lithium, le cobalt et le nickel dans des proportions différentes.



| Schéma montrant différentes matières premières impliquées dans la batterie Li-ion. Inspiré par [8] |

TENDANCE DE LA DEMANDE TECHNOLOGIQUE

19 GWh EU 2020 **x 37** 700 GWh EU 2050

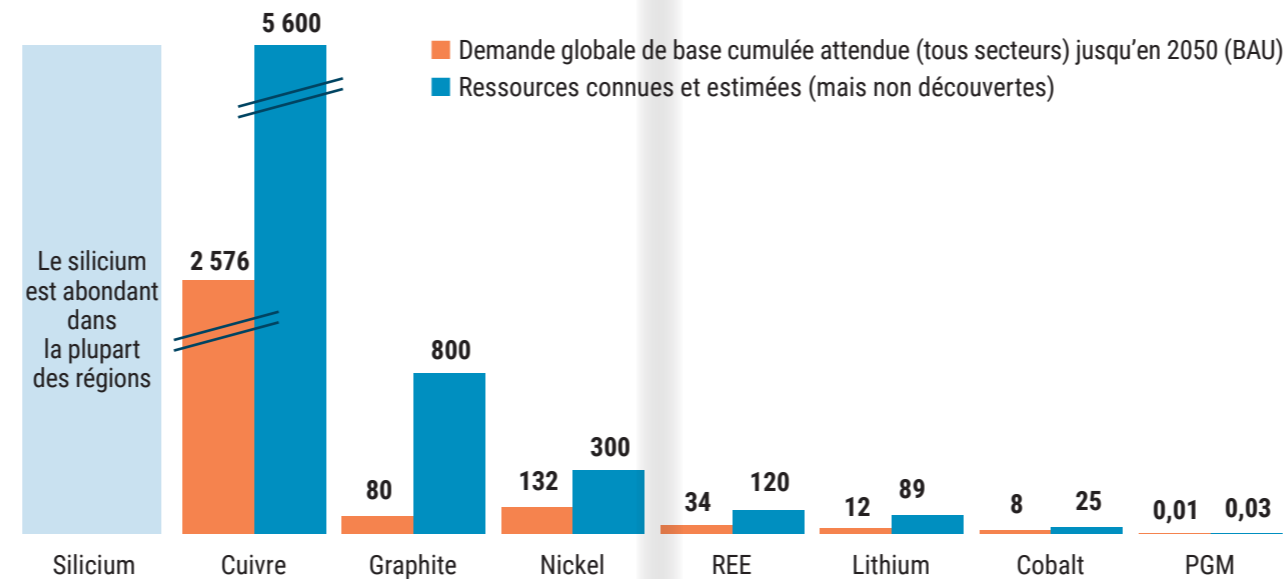
Principales matières premières concernées* :

- Bauxite
- Cobalt
- Cuivre
- Fluorine
- Minerai de fer
- Lithium
- Manganèse
- Graphite naturel
- Nickel
- Niobium
- Phosphore
- Silicium métal
- Titane

* En rouge : matières premières critiques selon l'évaluation du risque d'approvisionnement par la Commission de l'Union Européenne en 2020.

Source [8-9]

Les solutions en matière d'énergies renouvelables reposent sur des métaux présents en abondance dans la croûte terrestre, mais les obstacles peuvent provenir de leur répartition géographique, de capacités minières insuffisantes, de la concentration des entreprises, et des risques géopolitiques, environnementaux et sociaux.



Les ressources mondiales connues et ressources encore non découvertes dans la croûte terrestre, en mégatonnes métriques.^[10]



Enjeux des panneaux photovoltaïques

Matières premières

- Borates : 42 % de l'offre mondiale provient de la Turquie, 0 % de l'UE.
- Germanium : 80 % de la production provient de Chine.
- Indium : La Chine est le premier producteur.

Matériaux traités

- La Chine couvre environ 70 % de la capacité de production de polysilicium.
- L'Europe dispose actuellement de 26 GW de capacité de production de polysilicium. Cette production est ensuite exportée vers la Chine pour y être transformée.
- Des pénuries et une volatilité des prix sont à prévoir pour le polysilicium.

Composants

- Le rôle de la Chine est à ce stade quasi monopolistique : la production de plaquettes est la plus concentrée, puisque 97 % de la capacité mondiale se trouve en Chine.
- Elle est même concentrée à l'intérieur de la Chine : 42 % de la capacité est regroupée dans une seule province chinoise et 14 % dans une seule installation en 2021.
- Selon les capacités de construction prévues, il est probable que cette situation perdure.

Source [1-2-8-9]

Défis de la batterie Li-ion

Matières premières

- **Concentration géographique élevée** de l'extraction :
 - Niobium : 92 % provient du Brésil,
 - Cobalt : 70 % provient de la **République démocratique du Congo (RDC)**,
 - Graphite : 71 % provient de Chine,
 - Lithium : 50 % provient de l'Australie,
 - Phosphore : 72 % de la demande de l'UE provient du Kazakhstan).
- **Les ressources sont suffisantes mais la capacité d'extraction est limitée** à moyen terme (notamment pour le lithium).
- La demande en lithium, cobalt et graphite devrait atteindre respectivement **90, 18 et 2 fois la production actuelle**.

Matériaux traités

- 50 à 70 % du lithium et du cobalt sont raffinés en Chine. La Finlande, le Canada et la Norvège étant les autres principaux fournisseurs de cobalt.
- Les opérations de raffinage de l'UE se situent en Finlande et en Belgique et fournissent 70 % de la demande intérieure actuelle (7).

Composants

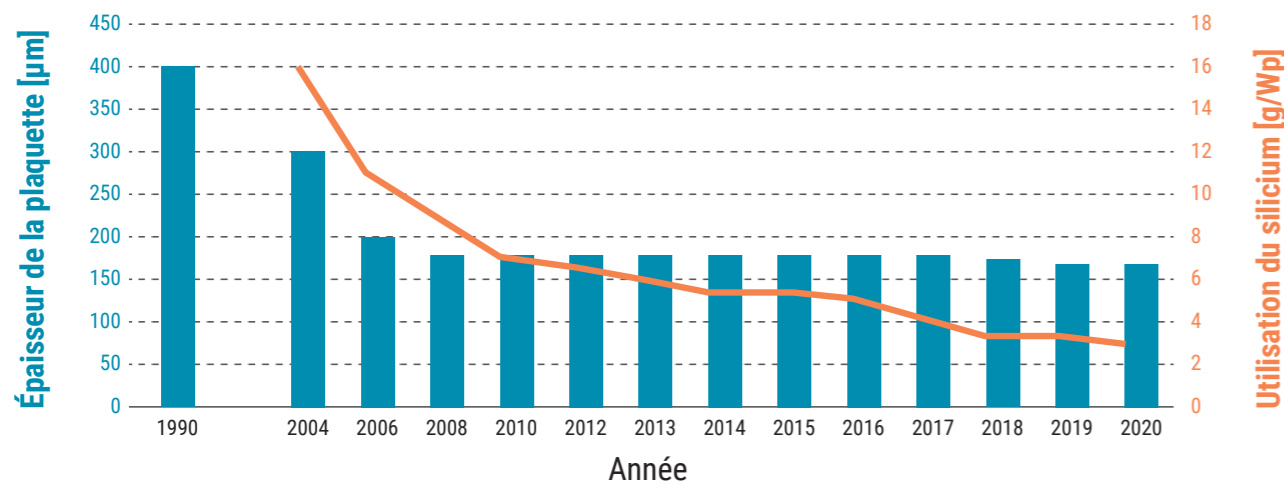
- **La Chine** abrite respectivement 70 % et 85 % des capacités de production de cathodes et d'anodes.
- **La Corée et le Japon** jouent également un rôle important.
- **L'Europe manque de capacité** pour la production de composants.

Source [1-2-8-9]

Cependant, des solutions existent pour atténuer la rareté des matériaux et réduire le risque de pénurie.

1. Réduction des matériaux et développement d'une conception améliorée et plus durable.

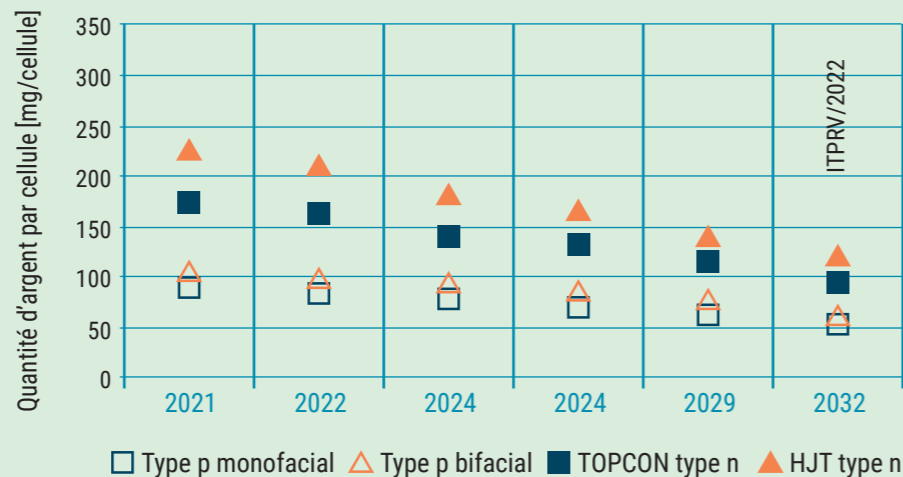
Le coût et l'efficacité des panneaux solaires se sont améliorés ces dernières années et devraient continuer à le faire au cours des prochaines décennies. Par exemple, la réduction de l'épaisseur de la plaquette a permis de limiter les besoins en silicium et en argent.



L'épaisseur de la plaquette (µm) et l'utilisation du silicium (g/Wp) ont considérablement diminué au fil des années. [3]

La quantité d'argent par cellule a diminué de 80 % depuis 2008 grâce à une meilleure métallisation des pâtes et devrait encore diminuer de 25 % en 2030.

Évolution de la quantité d'argent par cellule (mg/cellule). [11]

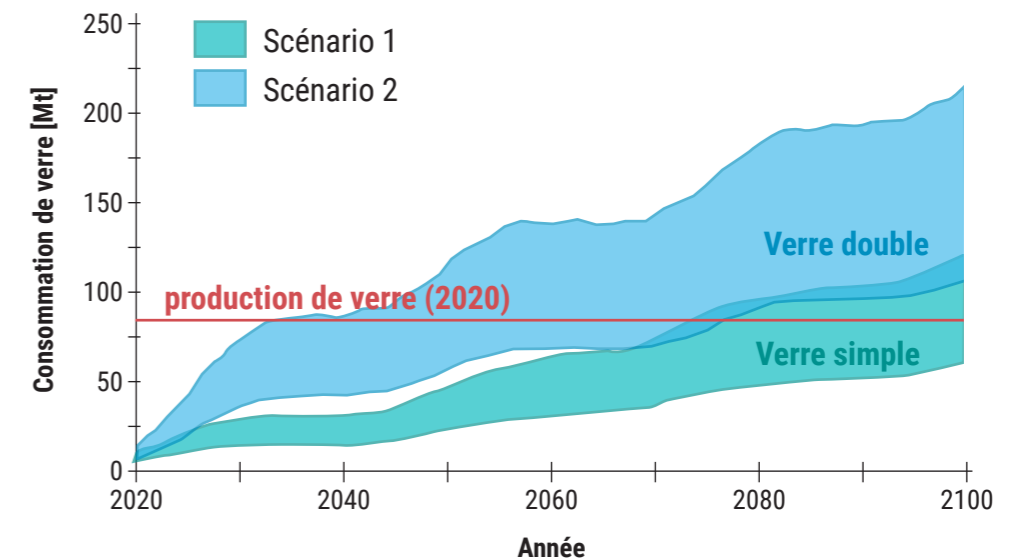


La poursuite des progrès technologiques au rythme actuel serait suffisante pour rester dans des limites raisonnables et atteindre les 20-80 TWp photovoltaïques jusqu'en 2050.

D'une part, la demande de verre pourrait encore dépasser la production actuelle de verre flotté. Selon que l'on se base sur des modules à verre simple ou à verre double, la demande actuelle de verre pour le photovoltaïque est du même ordre de grandeur que la production mondiale actuelle de verre flotté, voire dépasse largement la production actuelle.

Du point de vue des ressources, cette situation n'est probablement pas critique puisque les réserves de sable pour la fabrication du verre sont abondantes et répandues et que le verre peut également être recyclé, mais elle nécessite certainement une sérieuse expansion des installations de production au cours des dix prochaines années.

D'autre part, la consommation d'argent pourrait être maintenue aux niveaux actuels.



Consommation de verre pour la fabrication de modules PV. [12]

(calculés avec le modèle REMIND, les scénarios 1 et 2 décrivent un déploiement PV favorable ou non avec une limitation du changement climatique à 1,5 °C ; hypothèses : durée de vie du système de 25 ans ; simple verre = module verre/feuille de fond ; verre double = verre/module verre).



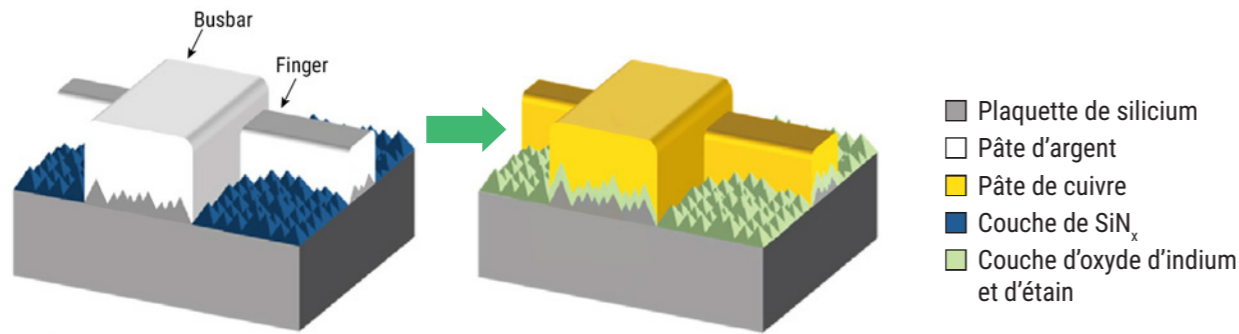
Exemple d'éco-conception. Nouvelle technologie de module (NICE) sans agent d'encapsulation, sans soudure et sans laminage permettant une robustesse accrue et un panneau 100 % recyclable. [13]



2. La substitution de matériaux comme alternative pour réduire la pression sur l'approvisionnement en ressources.

Panneaux photovoltaïques

La substitution de l'argent par le cuivre entraînerait des économies financières directes et réduirait la pénurie de ressources, à condition de ne pas abaisser le rendement. [15]

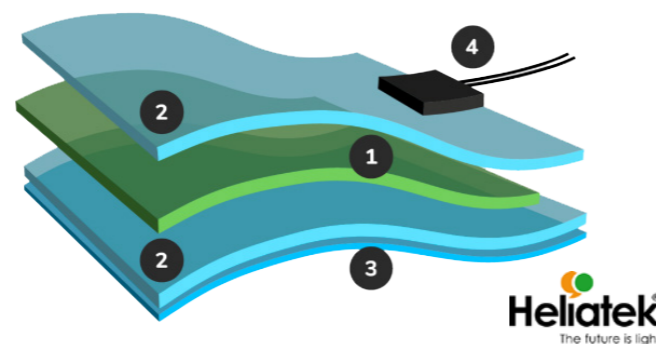


| Substitution de l'argent par le cuivre lors de l'étape de métallisation des cellules. [15] |



Modules PV légers Heliatek sur le bâtiment d'ENGIE Laborelec, Linkebeek, Belgique.

Le photovoltaïque organique (OPV) utilise des matériaux issus du domaine de la chimie organique pour convertir la lumière du soleil en énergie électrique.



- 1 Film porteur avec empilement organique déposé par évaporation
- 2 Encapsulation servant à protéger l'empilement organique contre les influences environnementales
- 3 Adhésif arrière intégré
- 4 Boîte de jonction avec câbles

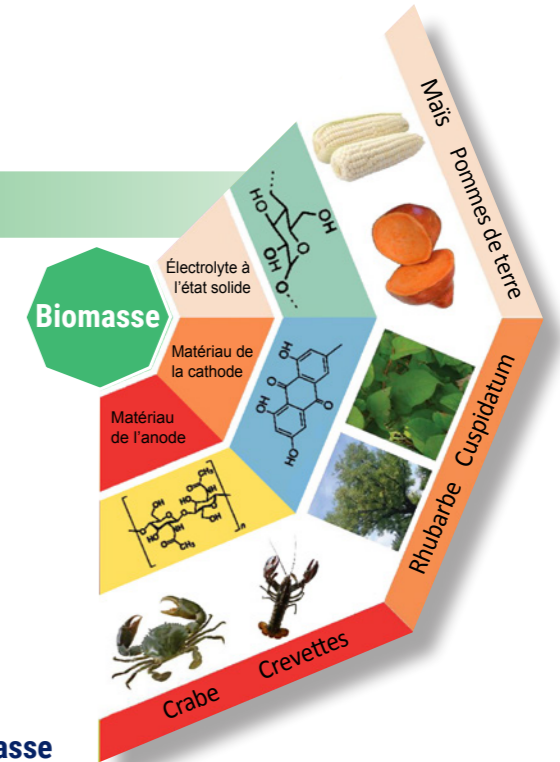
Source [16]

Batterie Li-ion

Approvisionnement basé sur la biomasse :

Les matériaux issus de la biomasse, qui vont des carbones inorganiques multidimensionnels aux biomolécules organiques renouvelables ou aux biopolymères, peuvent contribuer à concevoir des systèmes de « batteries vertes », servant de composants de batteries durables [35]. Cependant, leur utilisation massive pourrait soulever des problèmes environnementaux et éthiques s'ils entraînent en concurrence avec l'industrie alimentaire et fourragère.

Matériaux à base de biomasse pour les batteries secondaires au lithium vert. [17]



Utilisation de lithium fer phosphate (LiFePO4 ou LFP) au niveau de la cathode :

Les batteries lithium-ion et les batteries LFP relèvent de la catégorie des batteries lithium, mais les LFP ont une durée de vie plus longue, ce qui entraîne peu de changements de batterie.

Batterie sodium (Na)-ion : la batterie sodium-ion est un type de batterie rechargeable qui utilise des ions sodium comme porteur de charge. Ce type de batterie est en phase de développement, mais pourrait devenir un moyen moins coûteux que les batteries lithium-ion couramment utilisées pour stocker de l'énergie. Les batteries sodium-ion ont suscité un intérêt croissant grâce à l'abondance naturelle et à la faible toxicité des ressources de sodium. Elles présentent cependant des problèmes de densité énergétique et de sécurité.

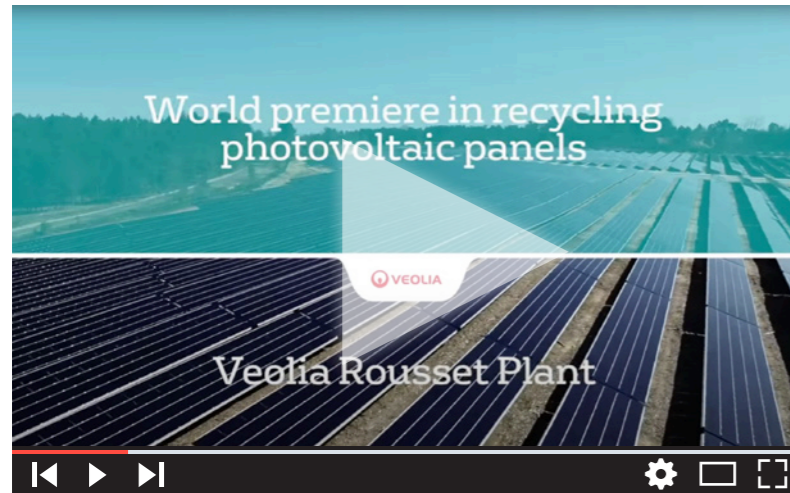


3. Utilisation circulaire des matières premières essentielles pour réduire l'utilisation des ressources primaires et la production de déchets.

Panneaux photovoltaïques

Actuellement, la plupart des procédés de recyclage permettent une récupération élevée du verre et de l'aluminium (environ 80 %), une récupération modérée du cuivre (environ 40 %), mais ne permettent pas de récupérer l'argent et le silicium de haute pureté, car ils nécessitent un traitement thermique coûteux et complexe pour éliminer l'encapsulant polymère.

Toutefois, le projet pilote suivant est en bonne voie :



Vidéo décrivant la nouvelle usine de recyclage de Veolia^[17], qui a développé une usine permettant d'atteindre une efficacité de recyclage de 95 % avec récupération d'Ag et de Si. L'industrie du recyclage des PV devrait connaître une croissance drastique à l'avenir, garantissant une économie de volume importante.^[18]

Batterie Li-ion

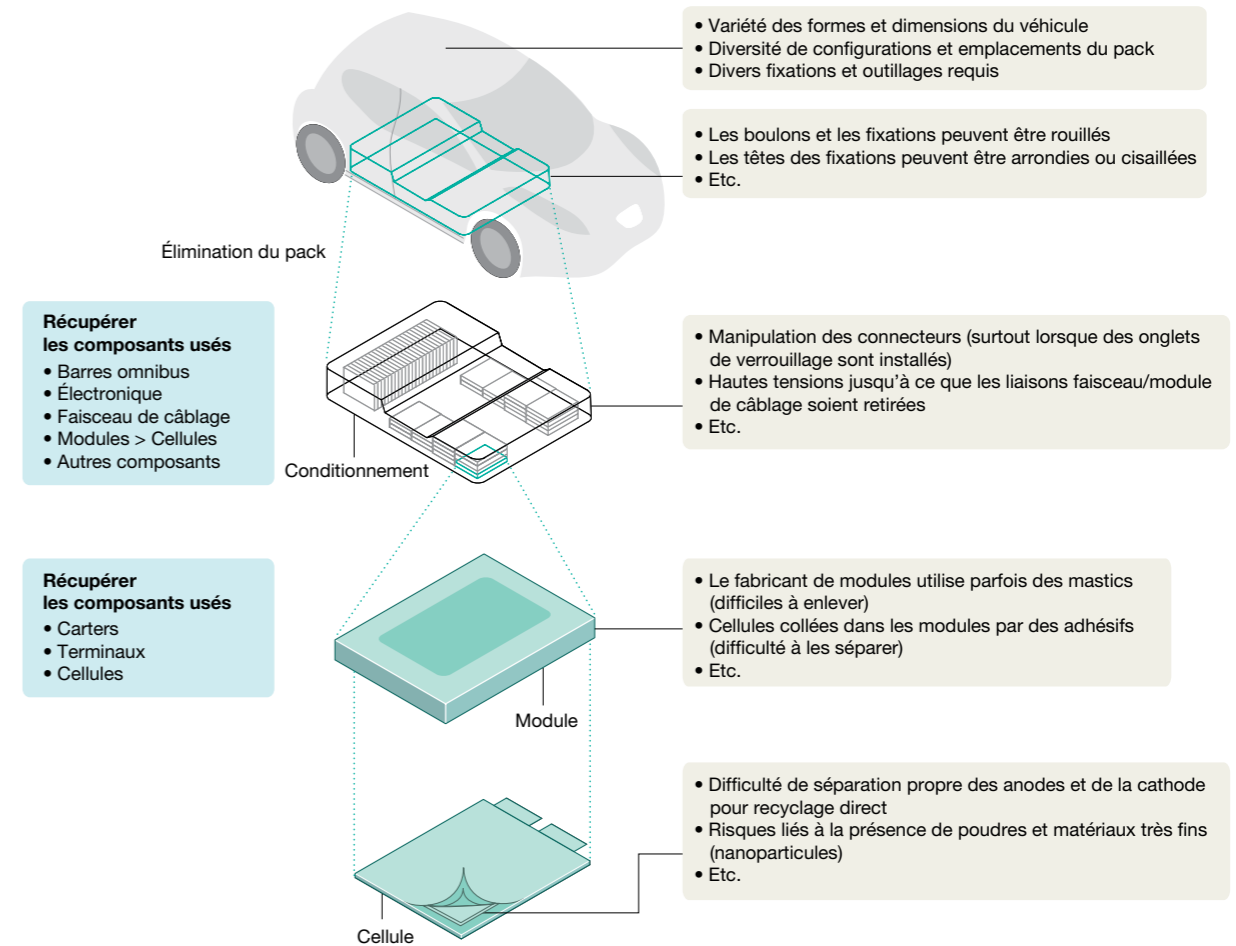
Le taux de recyclage de la batterie Li-ion s'améliorera grâce au processus de recyclage direct émergent (qui ne décompose pas, mais régénère le matériau de la cathode). Le taux de recyclage du lithium en tant qu'intrant est aujourd'hui proche de zéro.

Les **batteries usées de VE** ont encore environ 80 % de leur capacité utilisable, et peuvent être réutilisées pour des applications de seconde vie moins exigeantes, généralement pour le stockage stationnaire.

La société américaine Redwood Materials affirme pouvoir recycler 95 % des métaux utilisés dans les batteries lithium-ion, à un coût inférieur à celui des matériaux vierges. Volkswagen USA, Toyota, Ford et Volvo sont ses principales sources d'approvisionnement^[10].



Le recyclage sera imposé par la réglementation, quel que soit l'élément contenu.

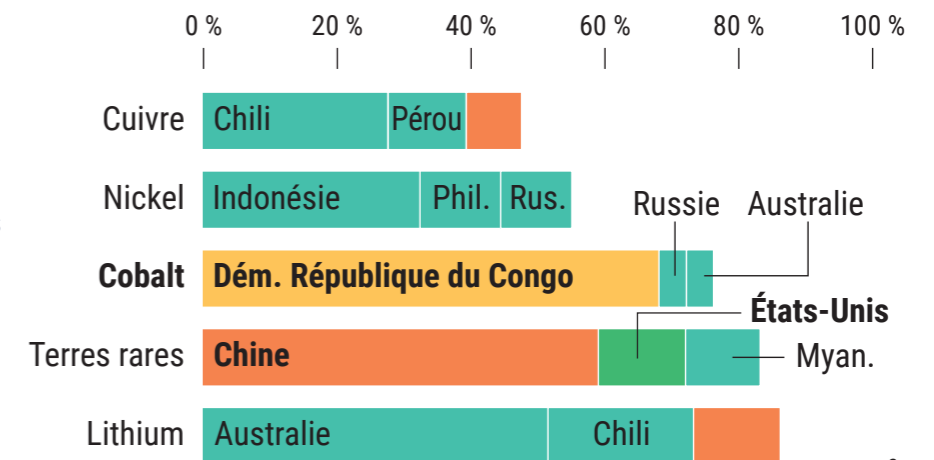


| Schéma présentant les enjeux de démontage à différents niveaux d'échelle. Inspiré par [19] |

4. Production de ressources minérales clés : vers plus d'indépendance grâce à une réflexion mondiale sur la relocalisation.

Où sont produits les métaux à énergie propre

La production des principales ressources minérales est aujourd'hui très concentrée. Ces graphiques montrent les trois principaux producteurs.



Source [20]

LA GÉOINGÉNIERIE GAGNE DU TERRAIN DANS LA LUTTE CONTRE LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les solutions de géoingénierie climatique ne sont plus un tabou pour atteindre les objectifs de température de l'Accord de Paris.

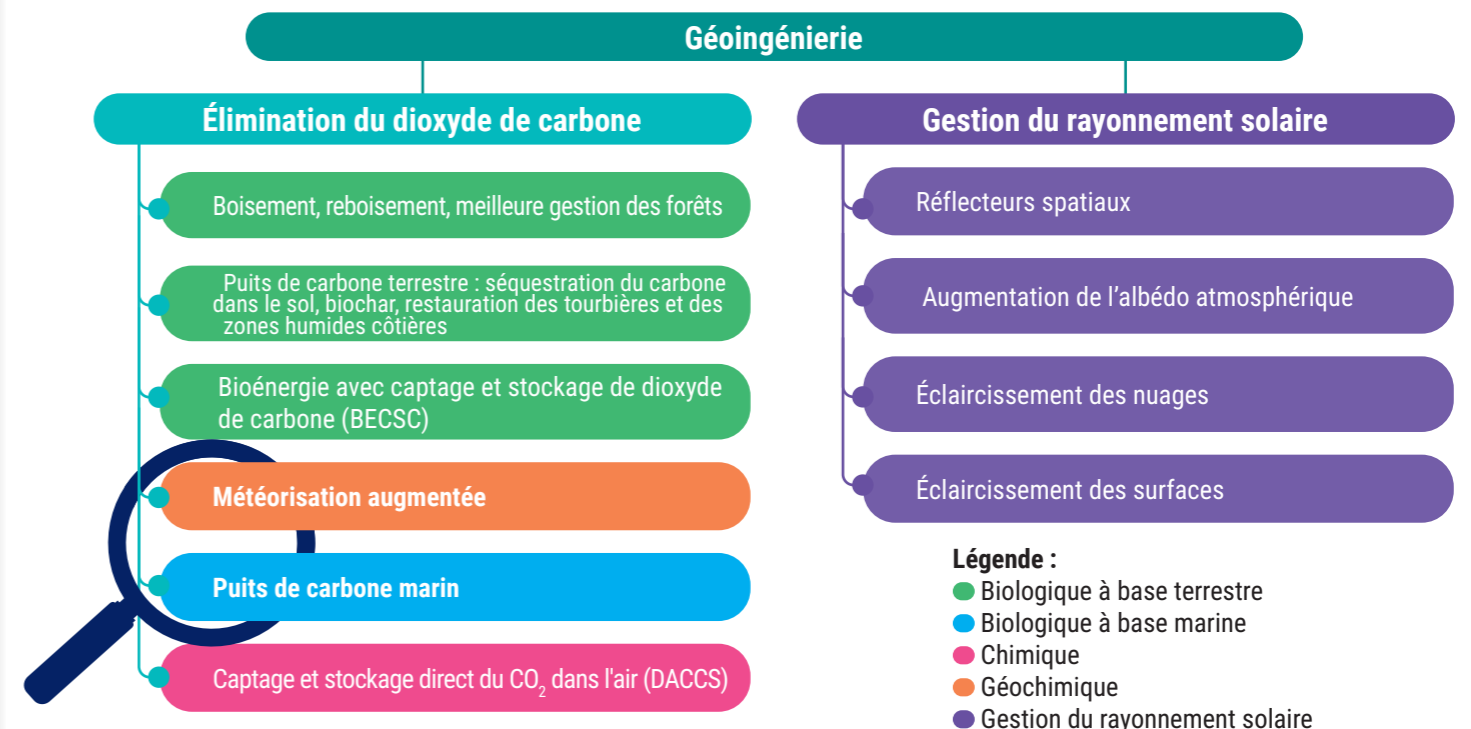
La prise conscience du changement climatique a relancé des discussions souvent controversées sur deux autres approches possibles pour limiter le changement climatique :

- l'élimination des gaz à effet de serre dans l'atmosphère ambiante, en particulier le CO₂ en tant que principal perturbateur climatique, appelée élimination du dioxyde de carbone (EDC)
- la réduction ou le réfléchissement intentionnels du rayonnement solaire dans l'espace afin de minimiser le réchauffement climatique.

Ces approches ont été désignées collectivement sous divers noms, notamment géoingénierie, génie climatique et interventions climatiques. [1-2-3-4]

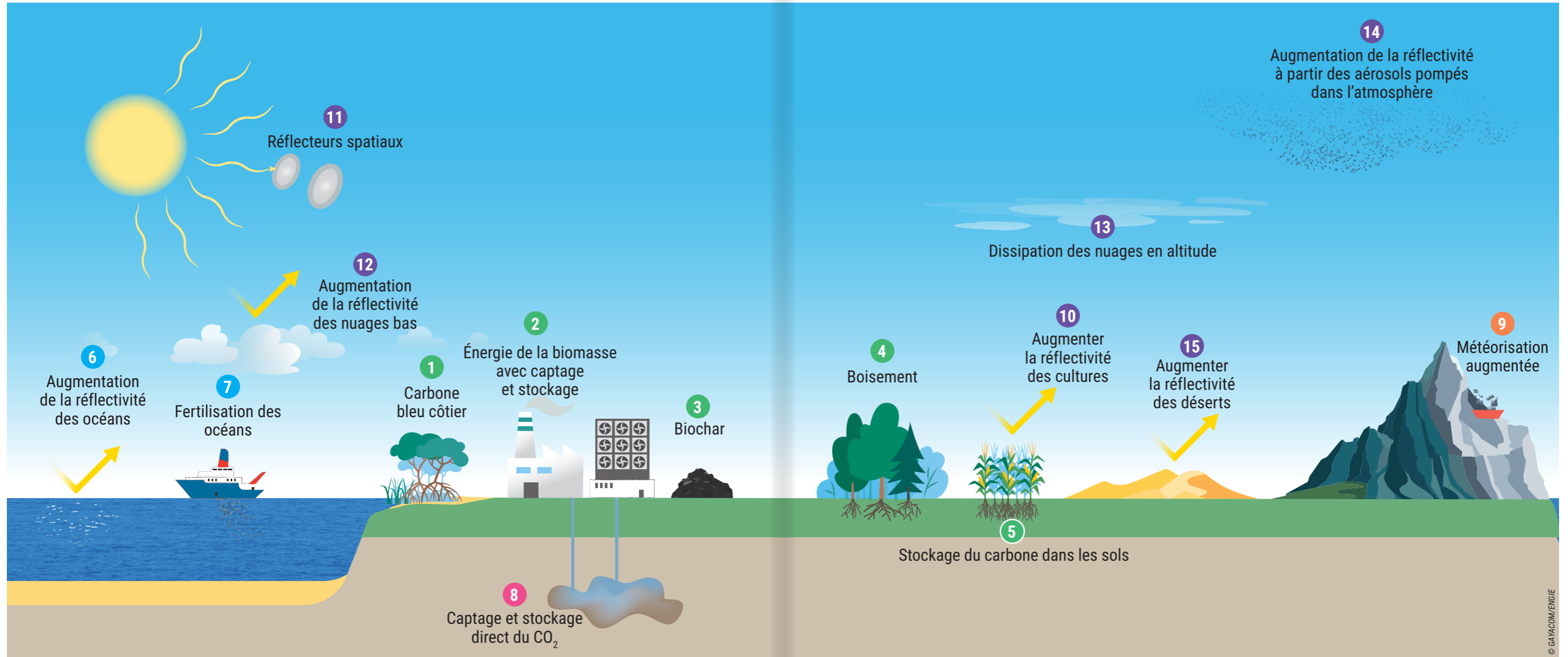
Bien qu'aucune des techniques proposées n'existe encore à des échelles suffisantes pour affecter le climat mondial, leur place ne cesse de croître dans les scénarios de changement climatique et les discussions politiques (p. ex. l'application extensive des techniques d'élimination du CO₂ de l'atmosphère dans un scénario du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)).

Ainsi, la géoingénierie est un terme générique faisant référence à des technologies hétérogènes que le public ne perçoit pas de la même manière. Certaines sont très controversées, d'autres beaucoup moins. Les risques et les avantages de cette approche ne sont pas encore pleinement compris par la communauté scientifique et suscitent un intérêt grandissant.



| Aperçu des techniques de géoingénierie d'après un examen de la documentation. [2] |

Propositions de géoingénierie.



Inspiré par [5-6]

- 1 Carbone bleu côtier** (Reboisement/restauration de la mangrove)
- 2 Énergie de la biomasse avec captage et stockage** (Utilisation de la biomasse à des fins énergétiques et de captage du CO₂)
- 3 Biochar** (charbon riche en carbone, provenant de cultures brûlées, et ajouté au sol)
- 4 Boisement** (Plantation de vastes forêts)
- 5 Stockage du carbone dans les sols**
- 6 Augmentation de la réflectivité des océans** (les microbulles augmentent la réflectivité)
- 7 Fertilisation des océans** (augmentation de la population de plancton absorbant le carbone)
- 8 Captage et stockage direct du CO₂**
- 9 Météorisation augmentée**

- 10 Augmentation de la réflectivité des cultures**
- 11 Réflecteurs spatiaux**
- 12 Augmentation de la réflectivité des nuages bas** (par exemple en y pulvérisant du sel)
- 13 Éclaircissement des nuages** (les nuages agissent comme une couverture et retiennent la chaleur)
- 14 Augmentation de la réflectivité des déserts** (utilisation de matériaux hautement réfléchissants)
- 15 Augmentation de la réflectivité des aérosols pompés dans l'atmosphère**

Légende :
 ● Biologique à base terrestre
 ● Biologique à base marine
 ● Chimique
 ● Géochimique
 ● Gestion du rayonnement solaire

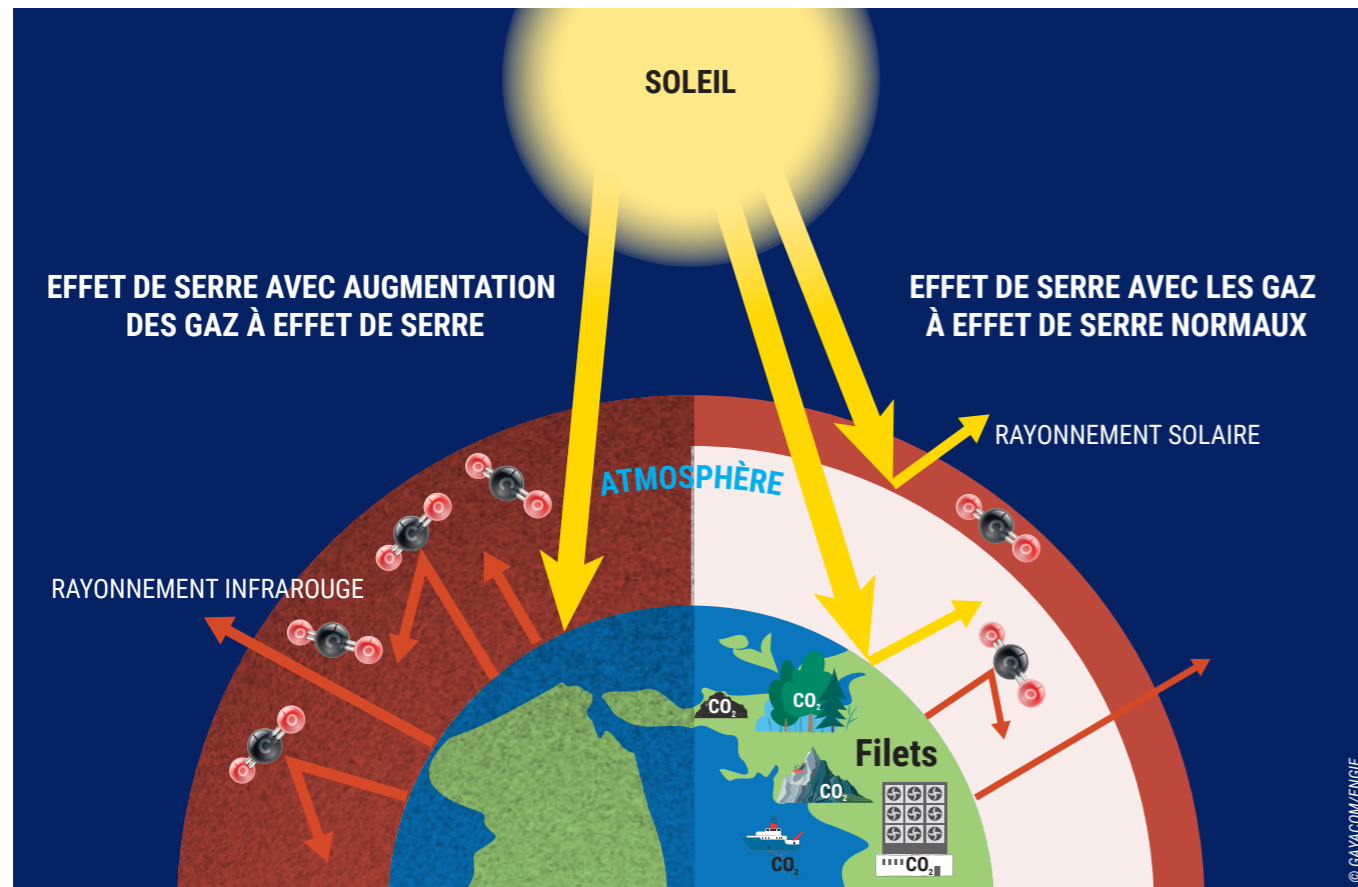
Comment fonctionne cette approche ?

Élimination du dioxyde de carbone (EDC)

L'EDC est un processus consistant à éliminer dans l'atmosphère le CO₂ qui cause le réchauffement climatique par effet de serre. Puisque il s'agit du contraire des émissions, les pratiques ou les technologies qui éliminent le CO₂ sont souvent décrites comme des 'émissions négatives'. Le procédé est parfois appelé plus généralement 'élimination des gaz à effet de serre' s'il implique l'élimination de gaz autres que le CO₂. Il existe deux grands types d'EDC :

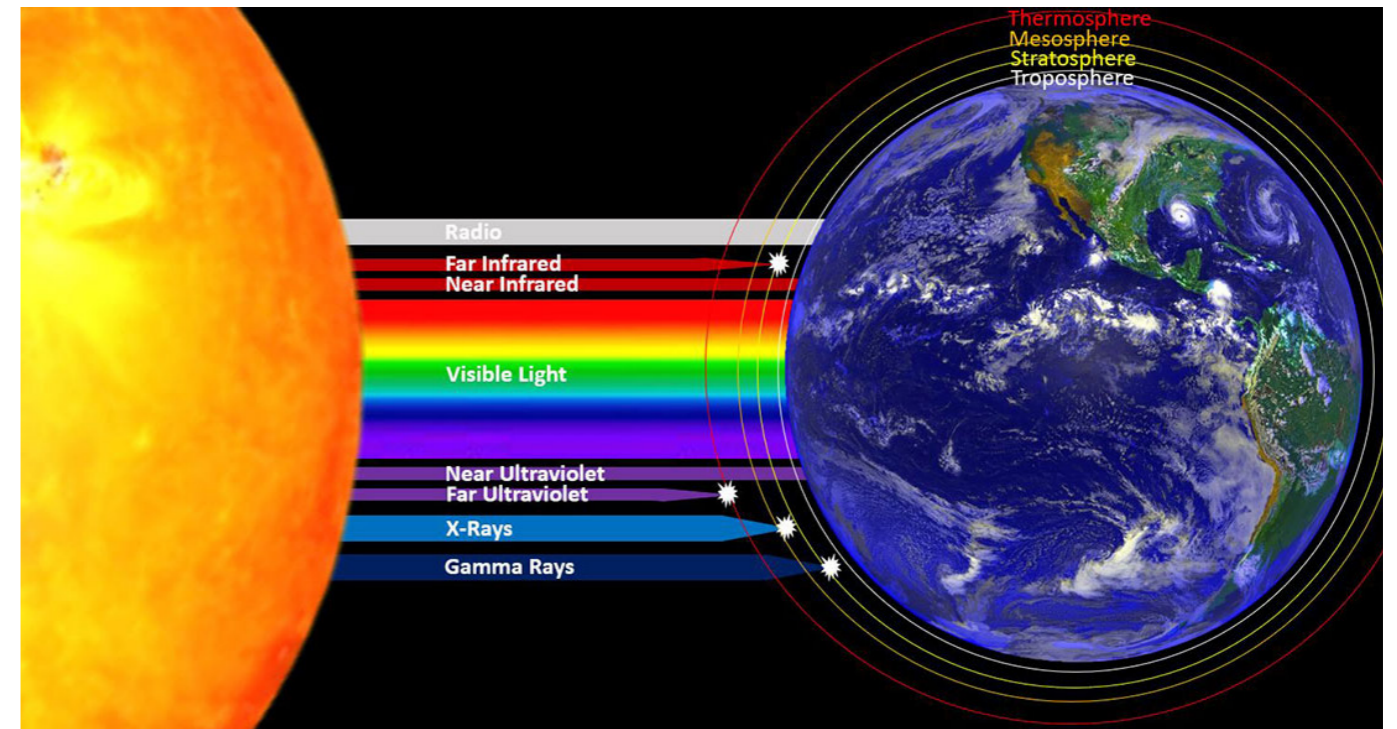
- L'amélioration des processus naturels existants qui éliminent le carbone de l'atmosphère (p. ex., en augmentant son absorption par les arbres, le sol ou d'autres 'puits de carbone'),
- L'utilisation de procédés chimiques pour, par exemple, capter le CO₂ directement dans l'air ambiant et le stocker ailleurs (p. ex. sous terre).^[7]

Les technologies à émissions négatives (TEN) sont impliquées dans les processus d'EDC.



Inspiré par [8]

L'élimination du CO₂ du stock atmosphérique par son transfert dans le stock biologique et géologique diminue sa concentration et par conséquent l'effet de serre.



| Absorption du rayonnement solaire dans l'atmosphère^[9] selon la NASA. |

Gestion du rayonnement solaire (GRS)

L'objectif de la gestion du rayonnement solaire (GRS) ou de la géoingénierie solaire (GS) est de diminuer la quantité de rayonnement solaire absorbé par une augmentation de l'albédo^{*[10]}. Elles visent à renvoyer une très faible fraction de la lumière solaire dans l'espace afin de compenser partiellement le déséquilibre énergétique causé par l'accumulation des gaz à effet de serre^[11].

* L'albédo est la quantité de lumière solaire (rayonnement solaire) réfléchi par une surface



EDC

- L'EDC est un élément clé des scénarios qui pourraient limiter le réchauffement à 2 °C ou 1,5 °C d'ici 2100 (confiance élevée).^[12]
- Elle permet de ralentir la croissance et d'inverser l'augmentation des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère.^[10]
- Technologies de transition en attendant le déploiement à grande échelle de technologies à faible émission de carbone (p. ex. CAD, CCUS).^[13]
- Certaines technologies fondées sur la nature sont mieux acceptées (boisement et reboisement) et ont atteint un stade de maturité plus élevé.

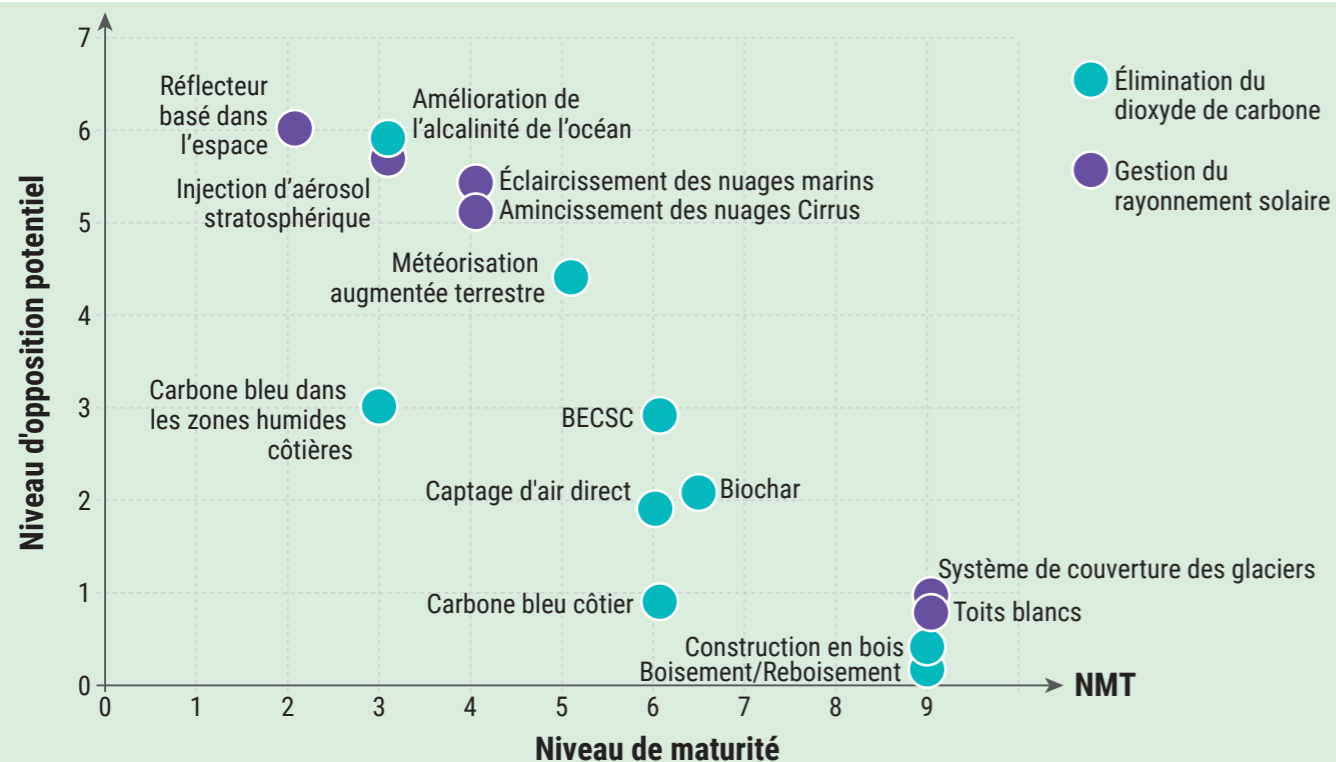
GRS

- Réduit rapidement la température de l'air de surface, ce qui pourrait réduire ou inverser les impacts négatifs du réchauffement climatique.^[14]
- Technologie permettant de limiter la hausse du niveau de la mer.^[15]
- Offre une réduction rapide du changement climatique dans un monde où ni l'atténuation ni l'adaptation ne peuvent répondre adéquatement au changement climatique.^[16]

AVANTAGES MIS EN AVANT PAR LES PROMOTEURS

La géoingénierie ne doit en aucun cas ralentir la transition énergétique vers la neutralité carbone et le déploiement de l'électricité et des gaz renouvelables. Elle ne doit jamais servir d'excuse pour continuer à utiliser des énergies fossiles ! Il s'agit plutôt d'un frein d'urgence que nous pourrions devoir déployer pour nous assurer d'atteindre les 1,5 °C ou 2 °C...

Pour les partisans de la géoingénierie, face à l'urgence climatique, le changement global du comportement humain à court terme est un pari plus risqué que le développement de la géoingénierie.



Le niveau d'opposition potentiel aux solutions de géoingénierie en fonction de leur niveau de maturité

(ENGIE inspiré de [17])

Les solutions de stockage géologique du carbone sont controversées par rapport à des processus comme le boisement, ou des options plus matures disposant d'un niveau d'acceptabilité plus élevé.

Les technologies à faible maturité, comme l'injection d'aérosols dans l'atmosphère, sont déjà controversées malgré le fait qu'elles sont mal connues. Cela pourrait limiter les investissements pour éviter les risques sociaux.

À ce stade, 3 principaux aspects controversés de la géoingénierie peuvent être identifiés.

Acceptabilité sociale

De nombreuses ONG environnementales prônent **une transformation de la société plutôt que le développement de technologies compensatoires**. Par exemple, le WWF a résumé sa position de la manière suivante : « Penser que nous pourrions prolonger le 'statu quo' sans changer nos comportements et notre mode de vie, en ne comptant que sur la géoingénierie, est un mensonge. Nous devons réduire notre contribution anthropique au changement climatique, et non pas essayer de le réparer en utilisant des technologies douteuses et en dépensant des fonds qui sont absolument nécessaires pour les mesures d'atténuation et d'adaptation » [18]. **Certaines technologies n'auront pas le soutien d'acteurs clés**. C'est notamment le cas de la géoingénierie solaire et du stockage géologique. **Le boisement échappe à ce type de critiques**. D'autre part, les partisans de la géoingénierie soutiennent que, face à l'urgence climatique, le changement potentiel du comportement humain à court terme est un pari plus risqué que la géoingénierie.

Risque et impact

Les controverses sont également nombreuses chez les scientifiques quant aux **effets et aux risques de la géoingénierie**. Ceux-ci comprennent **l'immaturité et l'impermanence des technologies, les coûts financiers élevés et la destruction de l'environnement pour la GRS** (qualité de l'air et pollution atmosphérique [11], des océans et de la végétation [16]).

Pour l'EDC, les incertitudes concernent davantage la **perméabilité et la stabilité des stockages non biologiques** (risques de fuite, d'activité sismique et de contamination de l'eau) [19-20]. Alors que les incertitudes liées à la GRS portent davantage sur les effets climatiques à l'échelle mondiale. À ce jour, ces incertitudes ne permettent pas au GIEC de prendre pleinement en compte ces technologies dans ses scénarios (sauf pour le boisement) [4]. Les scientifiques ne s'accordent pas sur les avantages que présenteraient plusieurs technologies de géoingénierie. Par conséquent, le risque de controverse est accentué par l'aspect technique du débat. On notera ici **que le boisement et le reboisement ne relèvent pas de ce type de débat**, alors que de nombreux scientifiques alertent sur le fait qu'il ne s'agit pas d'une solution miracle et questionnent l'idée d'équilibre compensatoire [21].

Questions de politique et de gouvernance

Enfin, **la géoingénierie pose également des questions de politique et de gouvernance**. Le développement de technologies ayant un impact mondial devrait nécessiter la mise en place d'une gouvernance internationale pour la coopération et la réglementation (y compris l'expérimentation, comme par exemple avec l'injection ou la pulvérisation de molécules) [14]. Concernant l'EDC, l'arbitrage et la médiation de l'utilisation des sols sont une question supplémentaire : les technologies de géoingénierie vs agriculture, pêche [10-3] ou économie locale [10-17]. La mesure et l'attribution de crédits pour le CO₂ capturé pourraient s'effectuer de manière unilatérale [10-16].

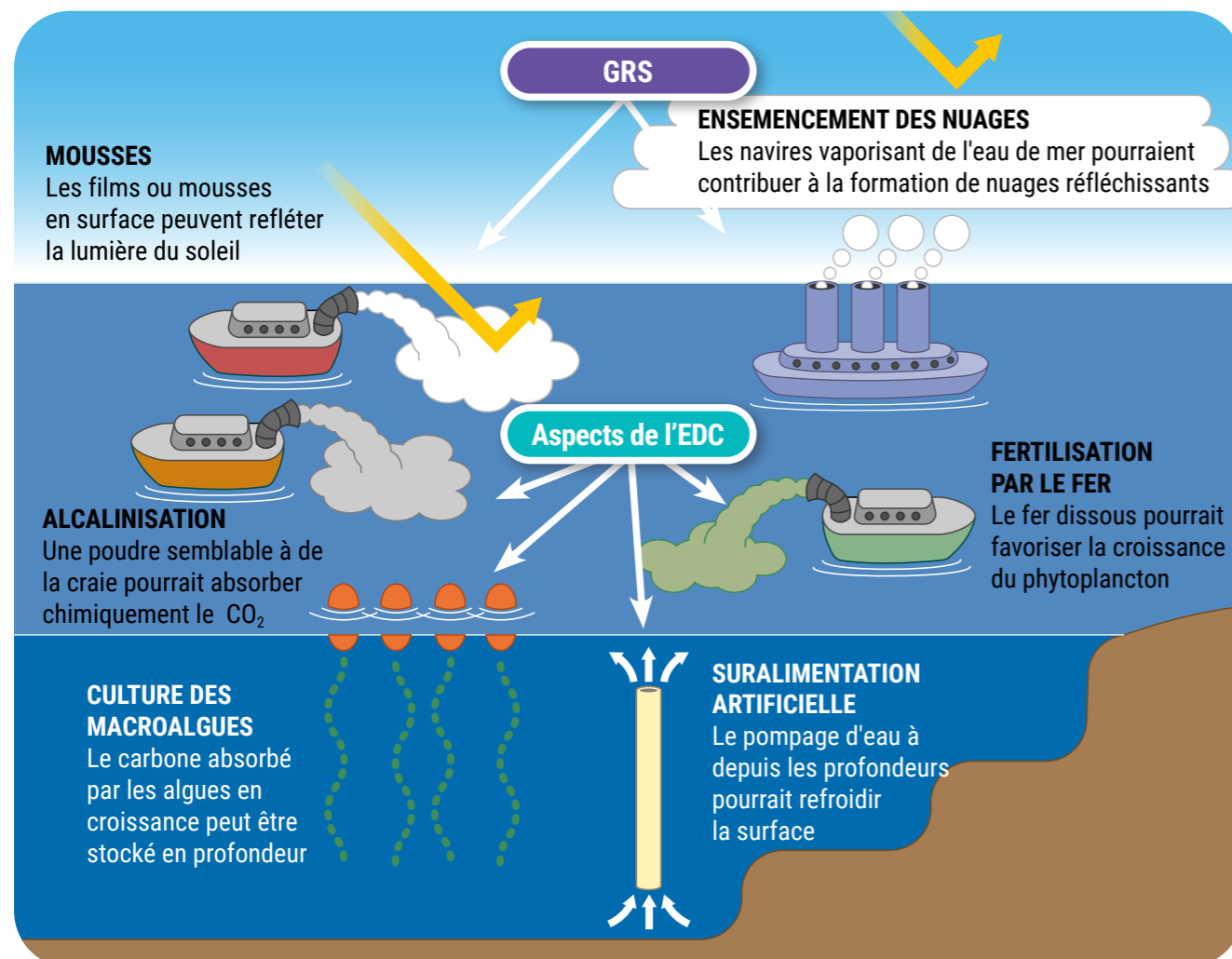
Exemple de puits de carbone marin.

Des dizaines d'approches d'ingénierie marine ont été proposées pour stocker le CO₂ dans ou sous les océans, ou pour modifier les mers afin de refroidir la planète, et jusqu'à présent peu de tests scientifiques ont été réalisés sur la méthodologie.

Focus sur la fertilisation des océans : Le **phytoplancton** marin joue un rôle crucial dans le **cycle du carbone** mondial. Leur photosynthèse consomme non seulement du CO₂, mais aussi des macronutriments (p. ex. azote - N - et phosphore - P) et des micronutriments (p. ex. fer - Fe). La **fertilisation des océans** consiste à ajouter des nutriments à la surface de l'océan, ce qui contrôle in fine la quantité de carbone

séquestrée. Étant donné que les niveaux de N et de P sont généralement supérieurs aux niveaux de Fe, l'ajout de Fe dans l'océan peut stimuler la photosynthèse et améliorer la séquestration du carbone. [22]

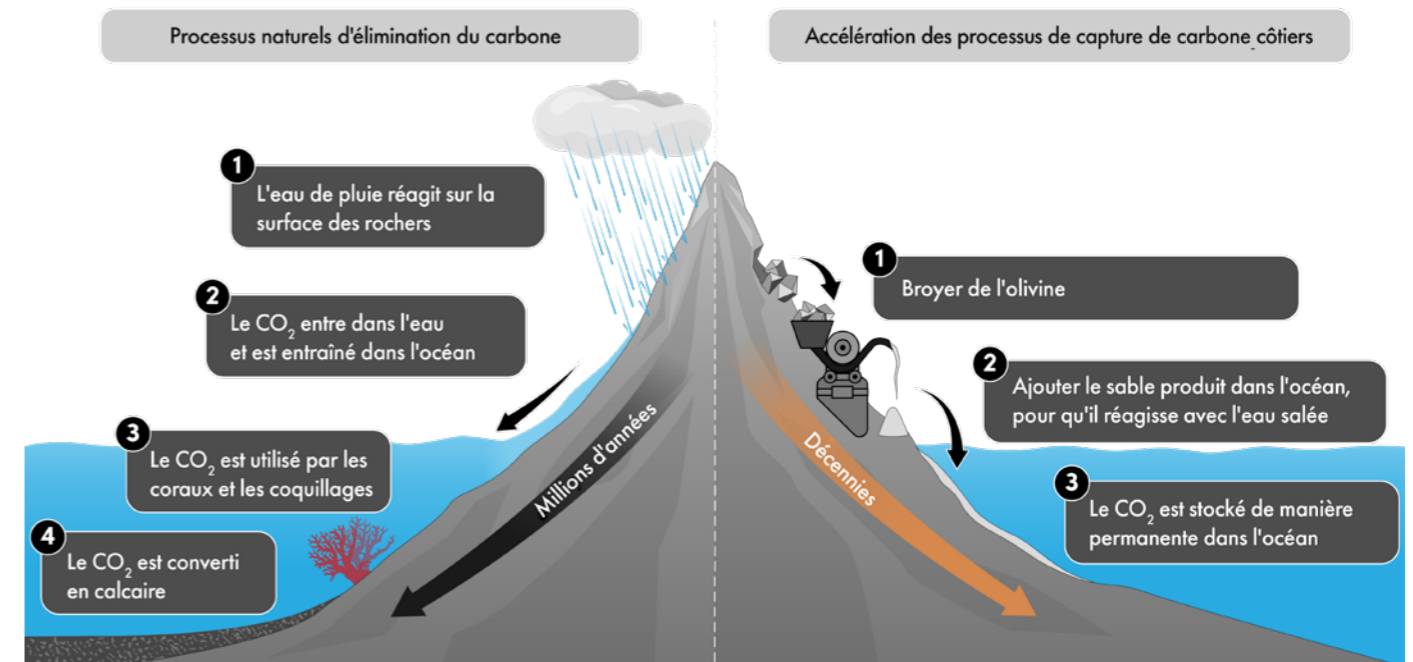
**Qui donne l'autorisation de réaliser ce type d'action ?
Le principe de précaution doit être appliqué.**



| Panorama des solutions d'ingénierie marine. [23] |

Exemple de météorisation augmentée.

Il s'agit d'un processus naturel dans lequel les roches sont décomposées par l'eau de pluie, les températures extrêmes ou l'activité humaine. C'est un processus qui se déroule sur des millions d'années, constituant un puits de carbone important.

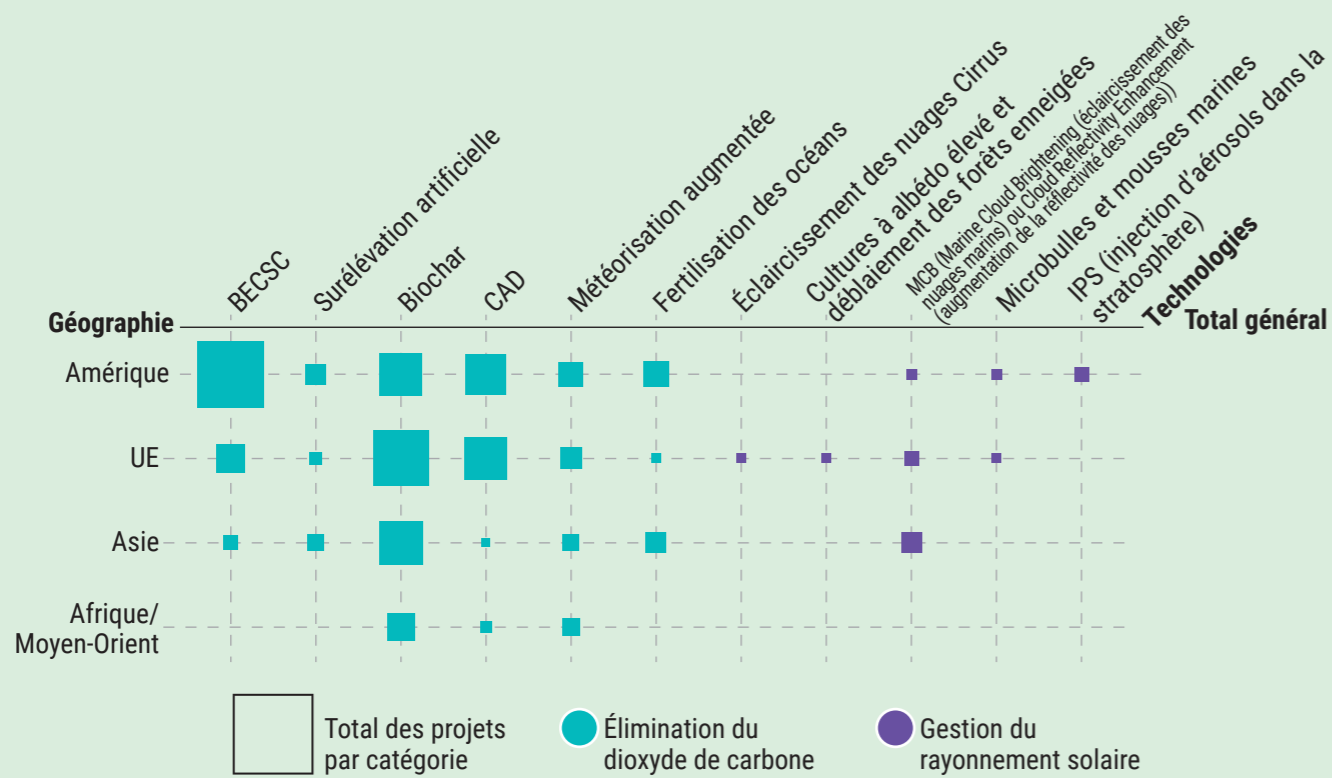


| Description de la météorisation augmentée. [24] |



| Roches broyées en fines particules et réparties sur de grandes étendues de terre ou d'océan pour accélérer le processus naturel. [25] |

À ce jour, plus de 1 700 projets ont été identifiés dans le monde. Les USA et l'Europe sont les principaux développeurs d'EDC pour gérer leur engagement de neutralité carbone d'ici 2050 suivi par l'Asie.



| Répartition des projets de géoingénierie (terminés, en cours et prévus) dans le monde. (ENGIE) |

Remarque : à ce jour, il n'existe pas de base de données scientifique exhaustive recensant tous les projets pouvant être considérés comme de la géoingénierie. Ce graphique se fonde donc sur une base de données d'organisations de lanceurs d'alerte : ETC Group et Heinrich Böll Stiftung (<https://map.geoengineeringmonitor.org>). Même si les projets de reboisement et de boisement ne sont pas mentionnés, car ils bénéficient d'une plus grande acceptabilité sociale, cela donne un aperçu des technologies controversées. La catégorisation technologique s'appuie sur les activités indiquées par le propriétaire du projet.



| CAD ET CCS : Usine Orca. [26] |



| BECSC : Centrale électrique de Drax. [27] |

Principaux projets de géoingénierie représentatifs.



2

TECHNOLOGIES ÉMERGENTES

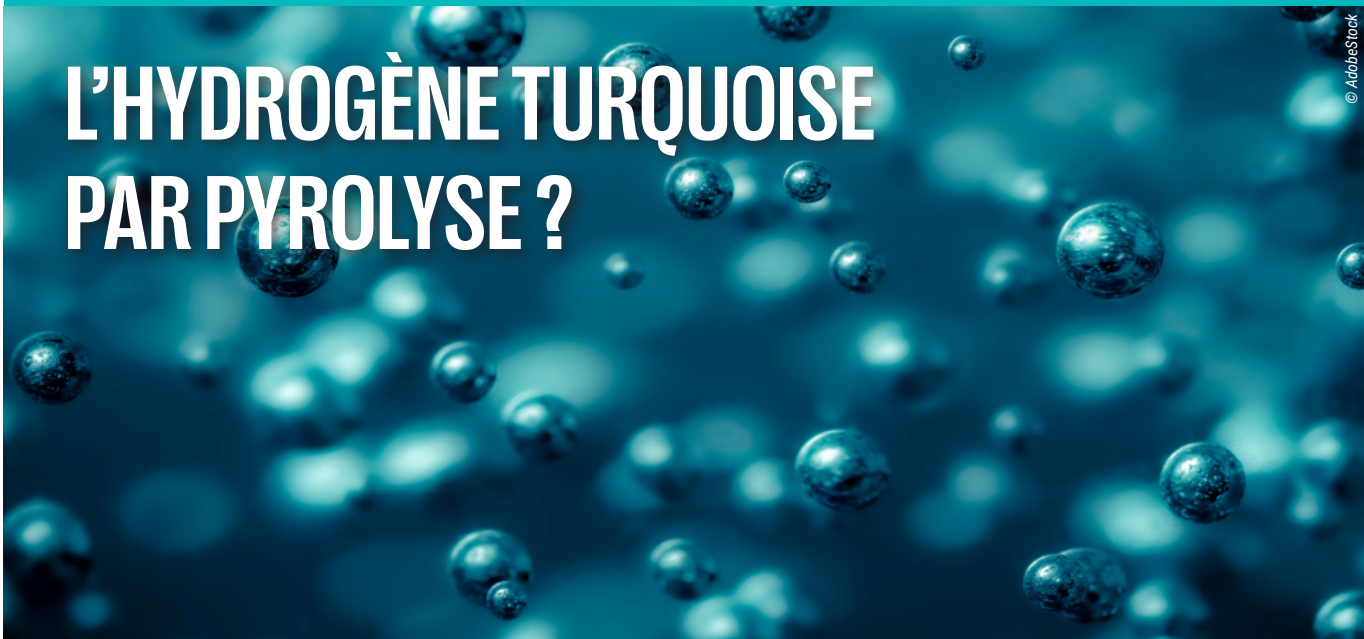
SOLUTIONS FONDÉES
SUR LA NATURE



ÉNERGIE SOLAIRE SPATIALE



L'HYDROGÈNE TURQUOISE
PAR PYROLYSE ?



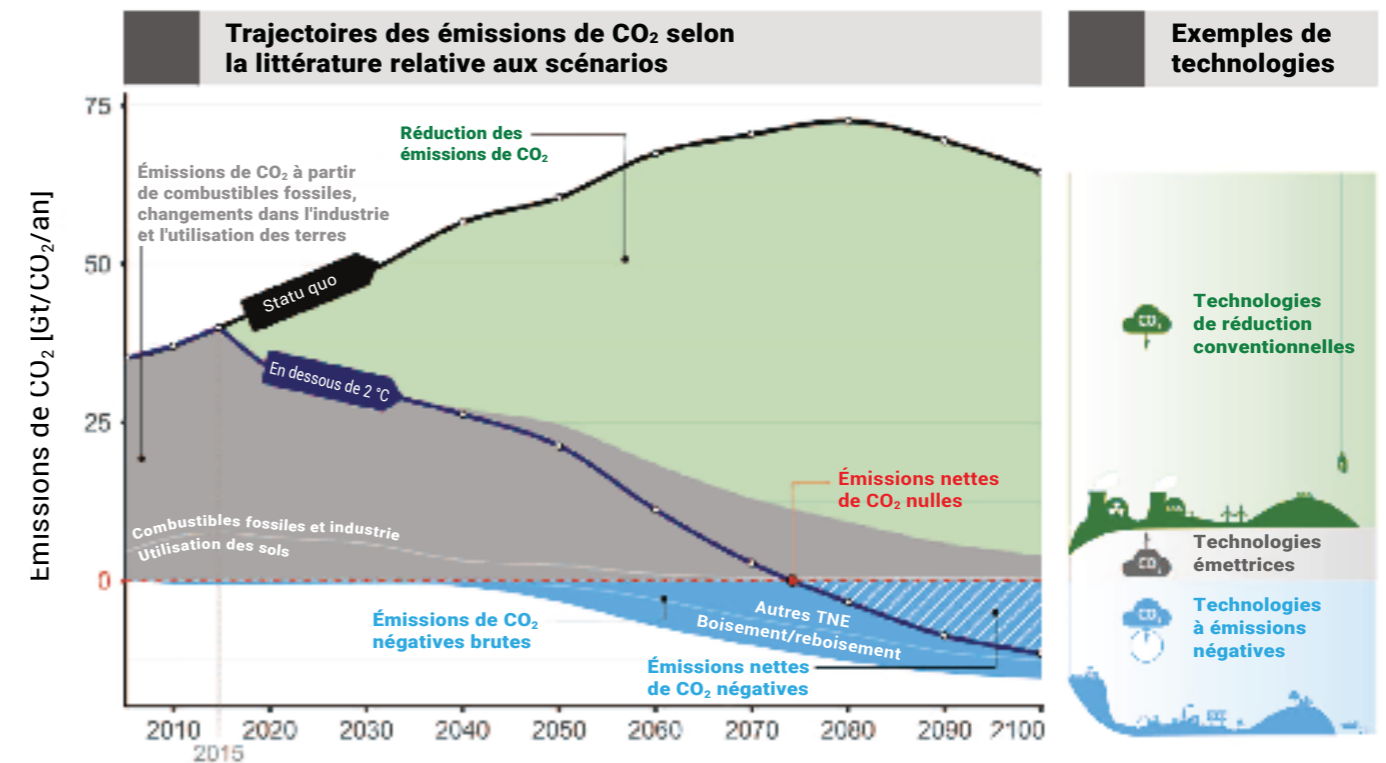
PRODUCTION DE CARBURANTS
SOLAIRES, INDUITE PAR LA LUMIÈRE



SOLUTIONS FONDÉES SUR LA NATURE



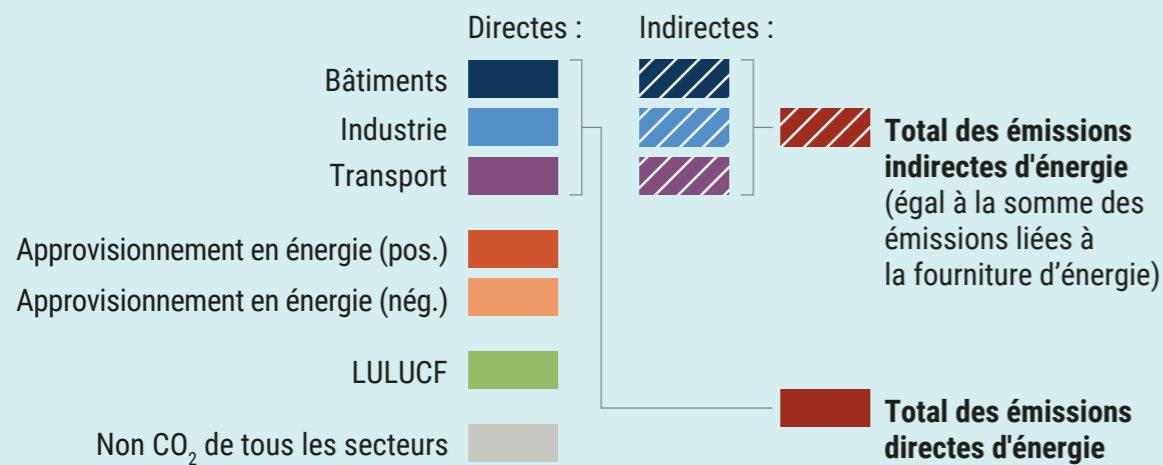
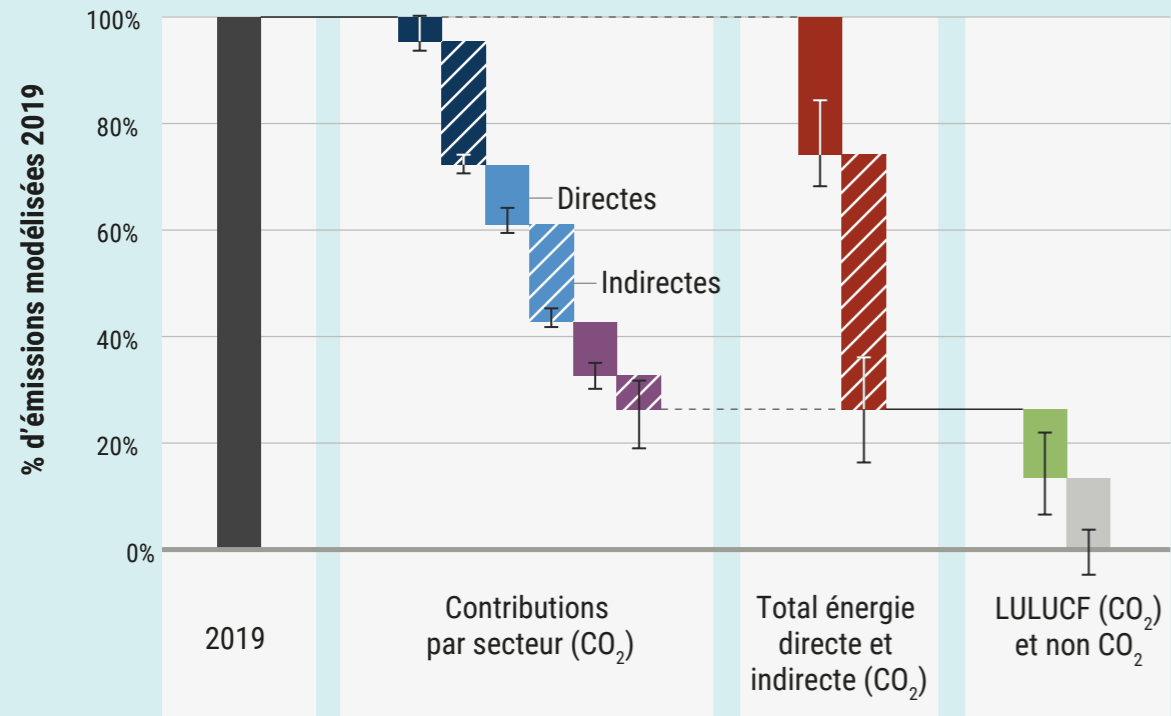
Récemment reconnues par le GIEC et l'AIE comme nécessaires pour compenser les émissions difficiles à réduire et, à terme, pour dépasser le seuil zéro net, les technologies à émissions négatives joueront un rôle important, et les solutions fondées sur la nature (SFN) encore davantage.



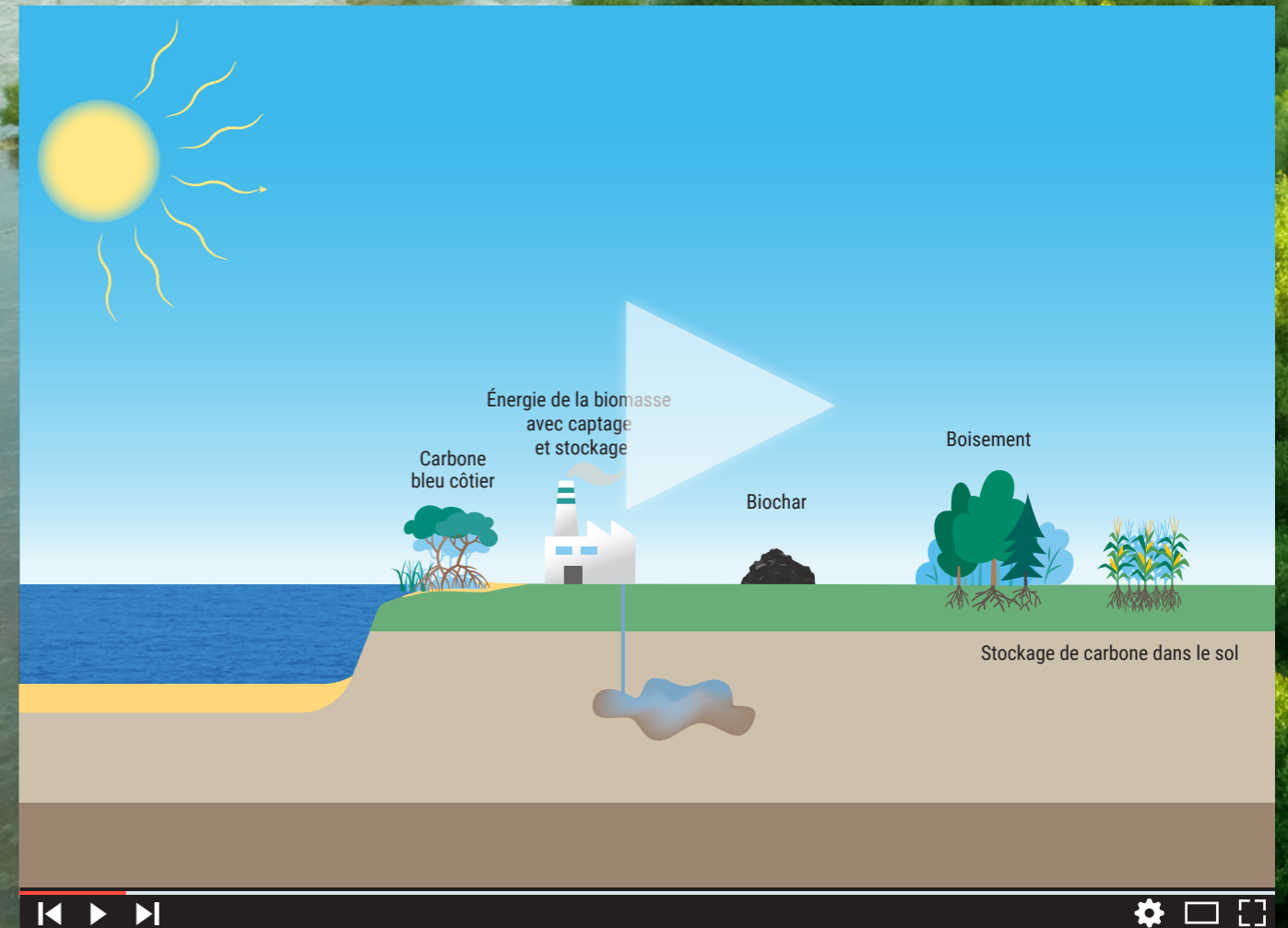
« Les niveaux d'émissions mondiaux deviennent négatifs nets vers la fin du siècle (zone bleue hachurée) pour compenser le dépassement antérieur du budget carbone. La zone bleue représente les émissions négatives brutes cumulées. Les scénarios de type statu quo et 'en-dessous de 2 °C' ont été élaborés à partir des données de la base LIMITS (<https://tntcat.iiasa.ac.at/LIMITSDB/>). Les émissions positives et négatives brutes de CO₂ résultant des changements d'utilisation des terres, étiquetées 'utilisation des terres' (zone grise inférieure) et 'boisement/reboisement' (zone bleue inférieure) ont été déduites des émissions nettes de changements d'utilisation des terres pour tenir compte des efforts actuels de boisement et de reboisement et différencier les émissions négatives dues aux changements d'affectation des terres dans le cadre d'autres TNE ».

Émissions nettes de CO₂ au fil du temps, impliquant à la fois une réduction (en vert) et une élimination (en bleu).^[1]

13 % des options d'atténuation du CO₂ devraient provenir de solutions fondées sur la nature pour atteindre des émissions mondiales nettes nulles de GES.



Directes = côté demande ; indirectes = côté offre, réduction des émissions de CO₂.
 LULUCF : l'utilisation des terres, le changement d'utilisation des terres, les forêts, englobent les absorptions provenant principalement des forêts, mais aussi des terres cultivées, des prairies, des zones humides, des établissements humains et d'autres terres.



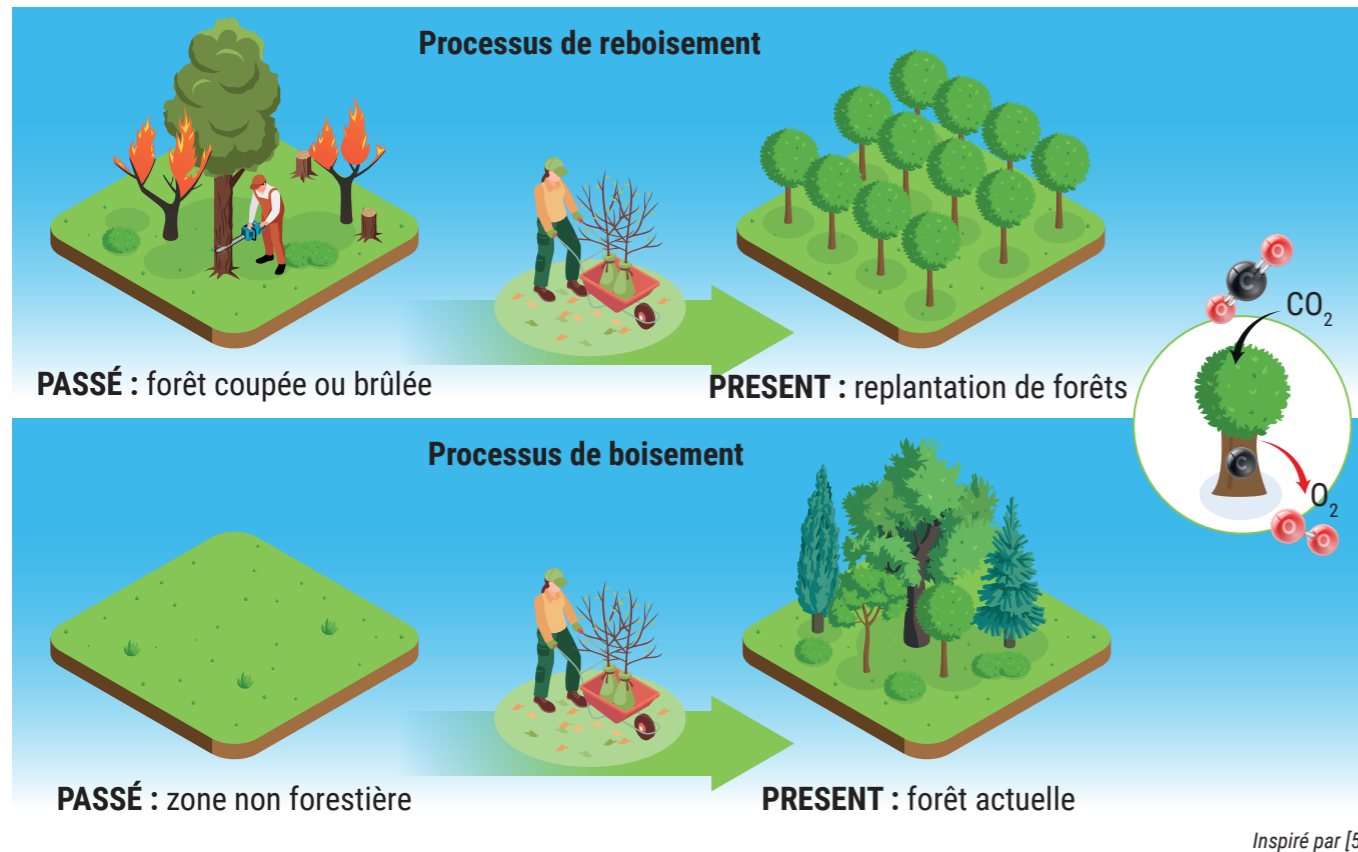
La NATURE est la solution oubliée qui représente 37 % de la solution au problème climatique. Inspiré par [3-4]

Contributions pour atteindre le zéro émissions nettes de GES (pour tous les scénarios atteignant des GES nets nuls). [2]

Boisement/Reboisement (B/R)

Le B/R offre un fort potentiel, limité par la disponibilité des zones adaptées à la plantation d'arbres, en tenant compte de la question de l'albédo et de la concurrence avec la production alimentaire.

NMT 8-9



Le reboisement consiste en des pratiques d'utilisation et de gestion des terres au sein des forêts, c'est-à-dire la plantation de nouvelles forêts ou l'extension de forêts existantes afin d'y augmenter l'inventaire total de carbone. Il existe deux types de reboisement :

- Reboisement urbain = plantation d'arbres dans les zones développées. Le but dépend des besoins de la ville : modifier le climat, améliorer la qualité de l'air, fournir plus de zones ombragées ou améliorer l'apparence de l'environnement.
- Reboisement rural = grand nombre d'arbres plantés dans des zones qui ont souffert de déforestation, des endroits qui étaient autrefois des forêts, des jungles ou couverts de végétation semi-aride. [5]

Le boisement consiste à planter un arbre dans une zone non forestière.

POTENTIEL :

3-10 Gt CO₂/an d'ici 2030

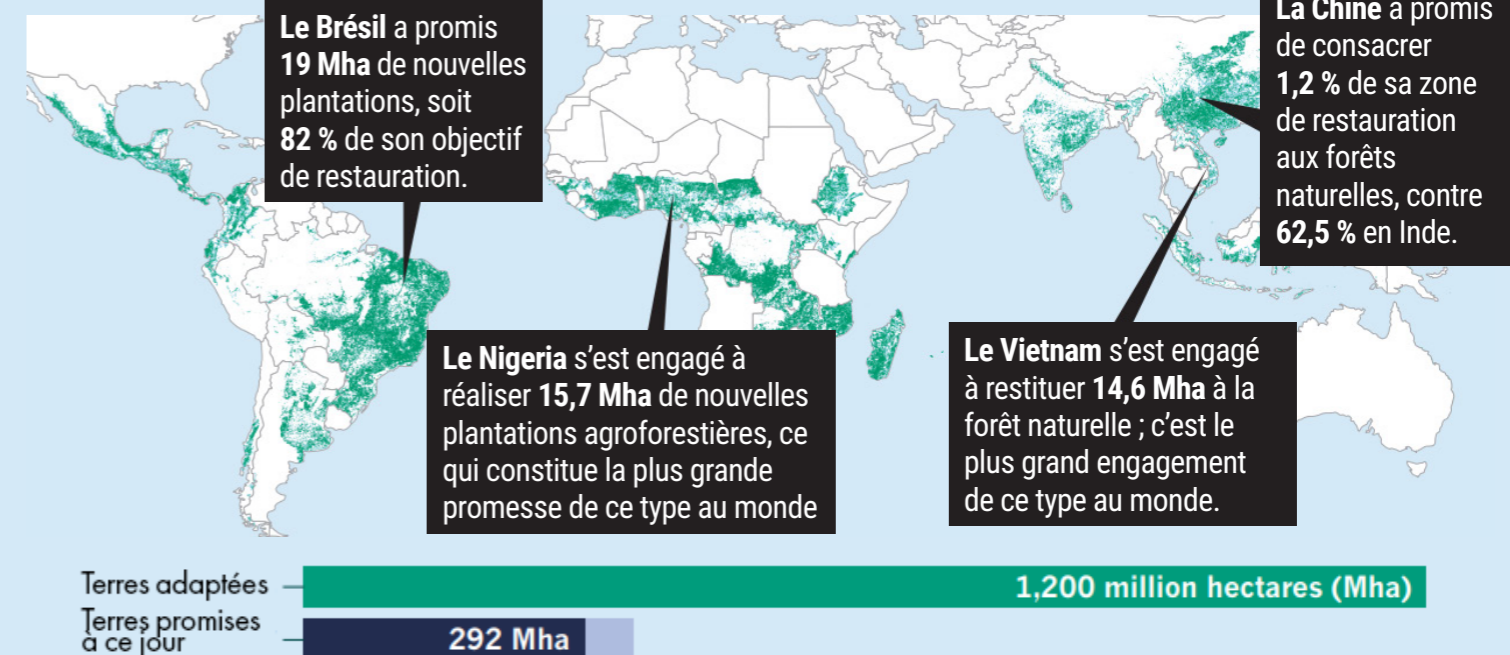
AVANTAGES

- Amélioration de l'emploi et des moyens de subsistance locaux, amélioration de la biodiversité.
- Amélioration de la fourniture de produits en bois renouvelables.
- Cycle du carbone et des nutriments du sol. Probablement une moindre pression sur la forêt primaire.



DÉFIS

- Une inversion de l'élimination du carbone, en raison des feux de forêt, des maladies et des parasites, peut se produire. Diminution du rendement des eaux de captage et diminution du niveau des eaux souterraines, si les espèces et le biome sont inadaptés.
- Un déploiement inadéquat à grande échelle peut créer une concurrence pour les terres vis-à-vis de la conservation de la biodiversité et de la production alimentaire. [2]



| Vue d'ensemble des régions à fort potentiel pour le B/R. [7] |



Les experts forestiers développent de nouvelles activités soutenues par les acteurs financiers pour fournir des solutions d'élimination du carbone, basées sur des projets de boisement/reboisement.

« AXA IM Alts, ENGIE et The Shared Wood Company unissent leurs forces pour développer un projet de solutions fondées sur la nature.

The Shared Wood Company (SWC), entreprise française nouvellement fondée et composée d'experts forestiers chevronnés, développe des projets de solutions fondées sur la nature, principalement situés en Afrique, en Amérique latine et en Europe. SWC bénéficiera des capacités d'AXA IM Alts en matière d'investissement à impact ainsi que du financement de projets et de l'expertise d'ENGIE en matière de marchés du carbone et de gestion des risques ». [8]

« Gabon : TotalEnergies et la Compagnie des Bois du Gabon s'associent pour développer un nouveau modèle de gestion forestière associant production de bois et puits de carbone ». [9]

[COMMUNIQUÉ DE PRESSE ICI](#)

[COMMUNIQUÉ DE PRESSE ICI](#)

Comment la construction en bois peut-elle nous aider à atteindre nos objectifs 'zéro net' ?

Selon le Green Building Council britannique, l'environnement bâti représente 40 % de toutes les émissions de carbone du Royaume-Uni. [10] Le bois a un rôle à jouer pour aider à décarboner le tissu structurel des maisons neuves et existantes, ainsi que l'industrie de la construction dans son ensemble.



Biochar

Le nouvel or noir favorable au climat qui fait rêver les industries de décarbonation ?

NMT 6-7

« Le biochar est formé de carbone organique persistant (c'est-à-dire très stable), obtenu par la pyrolyse, et qui, appliqué au sol, permet d'y séquestrer davantage de carbone, et d'améliorer ainsi les propriétés de fertilité du sol. La permanence dépend du type de sol et des températures de production du biochar, et varie de quelques décennies à plusieurs siècles^[11] ».

« Le biochar s'obtient à partir de résidus de bois (résidus naturels ou industriels

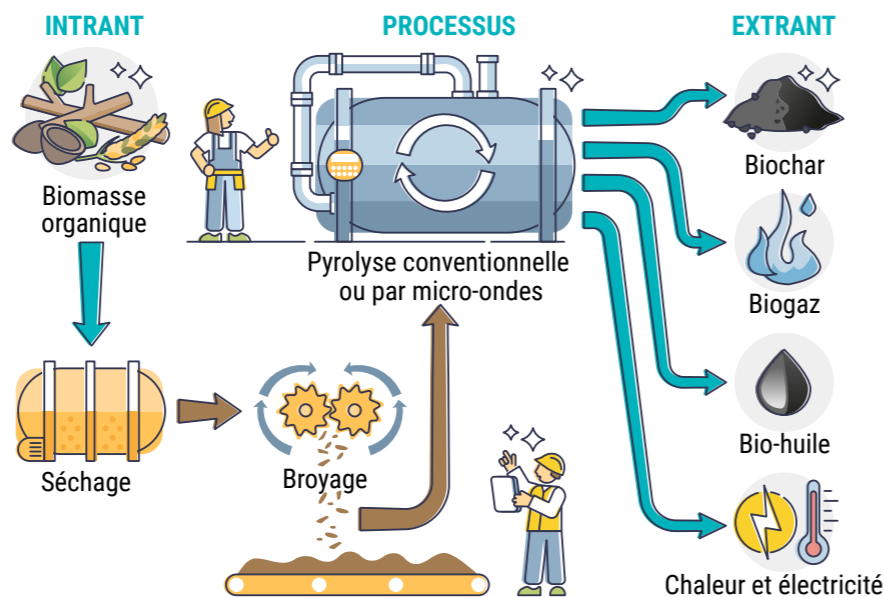
POTENTIEL D'ÉLIMINATION DU CARBONE :

0,2 à ~1 Gt CO₂/an d'ici 2030

provenant de l'entretien des forêts, de l'agriculture ou de l'industrie du bois, comme l'écorce, le bois de récolte ou la paille) ou de résidus de cultures sèches (comme les coques de grains de café par exemple). Ils sont chauffés à environ 500 degrés, en l'absence d'oxygène, afin d'éviter leur combustion qui les réduirait en cendres^[12] ».



Le biochar se présente sous la forme d'une poudre noire.



| Exemple de technologie de pyrolyse, une technologie autothermique. ^[13] |

AVANTAGES

- Augmentation du rendement des cultures et réduction des émissions hors CO₂ provenant du sol et de la résistance à la sécheresse.

DÉFIS

- Estimation du potentiel tenant compte de la disponibilité limitée de la biomasse et des incertitudes dues au manque d'essais à grande échelle de l'application de biochar sur des sols agricoles dans des conditions de terrain.

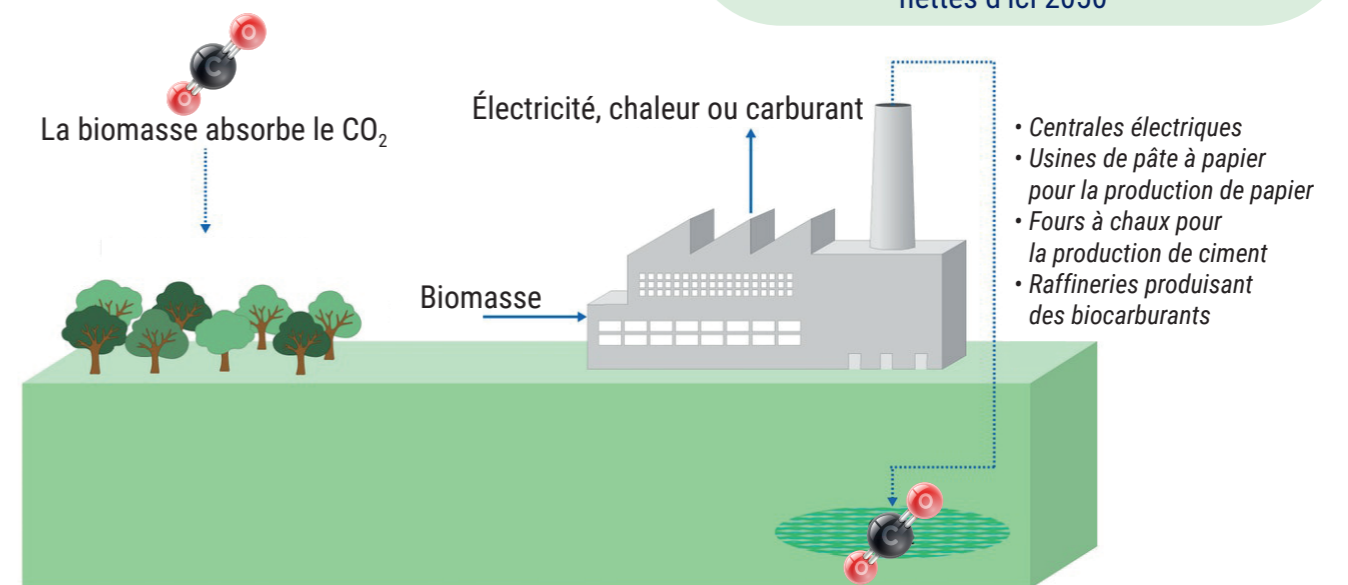
Bioénergie avec captage et stockage du carbone (BECSC)

Cette technologie est principalement développée pour la production d'éthanol avec de grandes infrastructures. Le processus BECSC présente un potentiel intéressant, limité par la production de biomasse durable.

POTENTIEL D'ÉLIMINATION DU CARBONE :

~250 Mt CO₂/an d'ici 2030 dans le scénario zéro émissions nettes d'ici 2050^[14]

NMT 8-9



| Exemple de processus BECSC. ^[15] |

Le processus BECSC consiste à capter le CO₂ coproduit à partir de la transformation de la biomasse en vecteur énergétique, et non le CO₂ produit à partir de l'utilisation du vecteur énergétique. Cela englobe différents procédés (combustion, fermentation, carbonisation, liquéfaction, gazéification, etc.). Le CO₂ est ensuite traité pour être injecté dans un stockage souterrain.

De nombreux vecteurs énergétiques peuvent être produits par transformation de la biomasse, mais les plus pertinents pour les TNE sont la fermentation (au bioéthanol ou au biométhane) et la combustion (chaleur/électricité). ^[15]

AVANTAGES

- Réduction des polluants atmosphériques, sécurité des carburants, utilisation optimale des résidus, revenus supplémentaires, avantages pour la santé et, si la mise en œuvre est bonne, amélioration de la biodiversité.

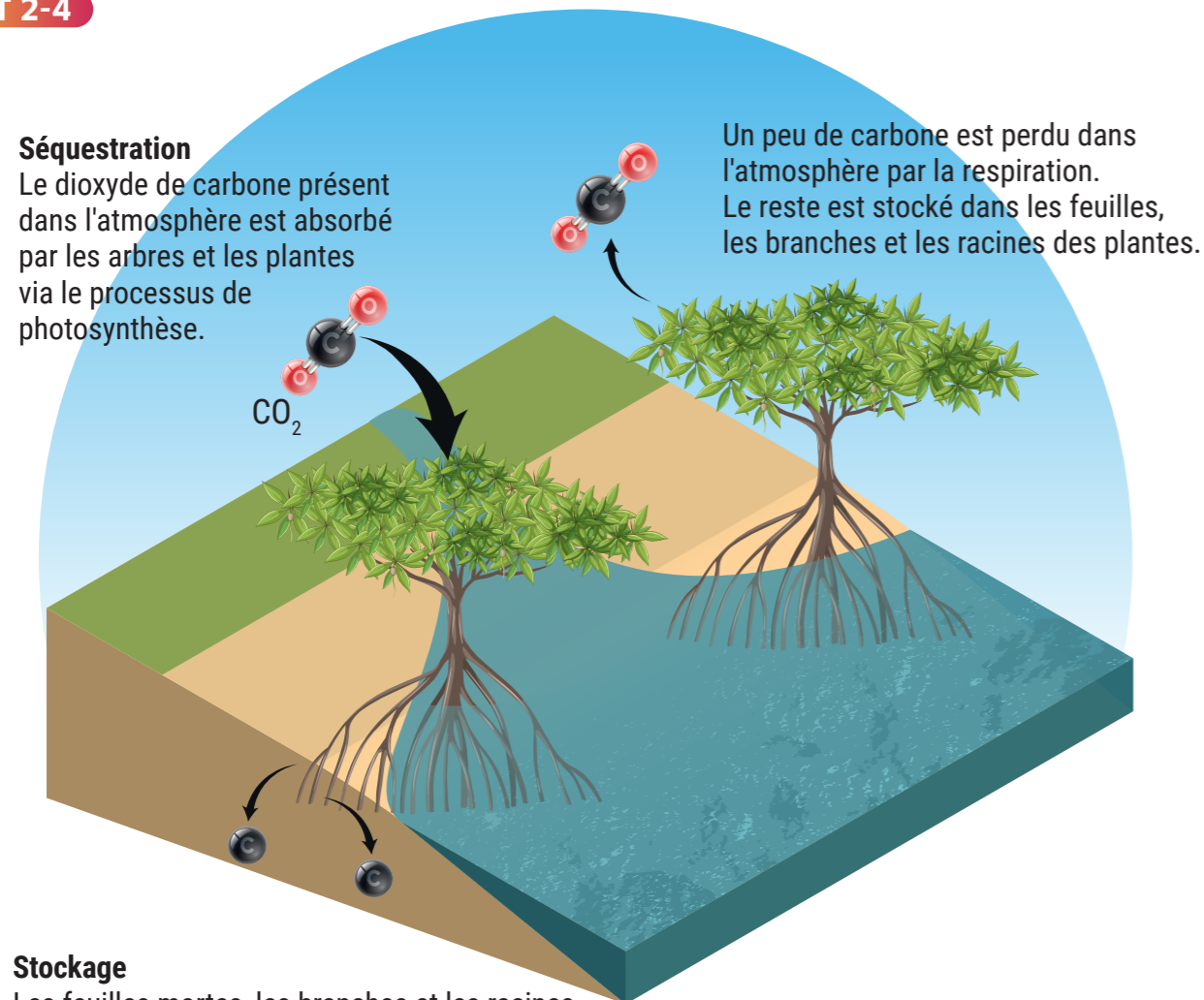
DÉFIS

- Un déploiement inapproprié à grande échelle entraîne une utilisation supplémentaire des terres et de l'eau pour cultiver la matière première de la biomasse. ^[2]

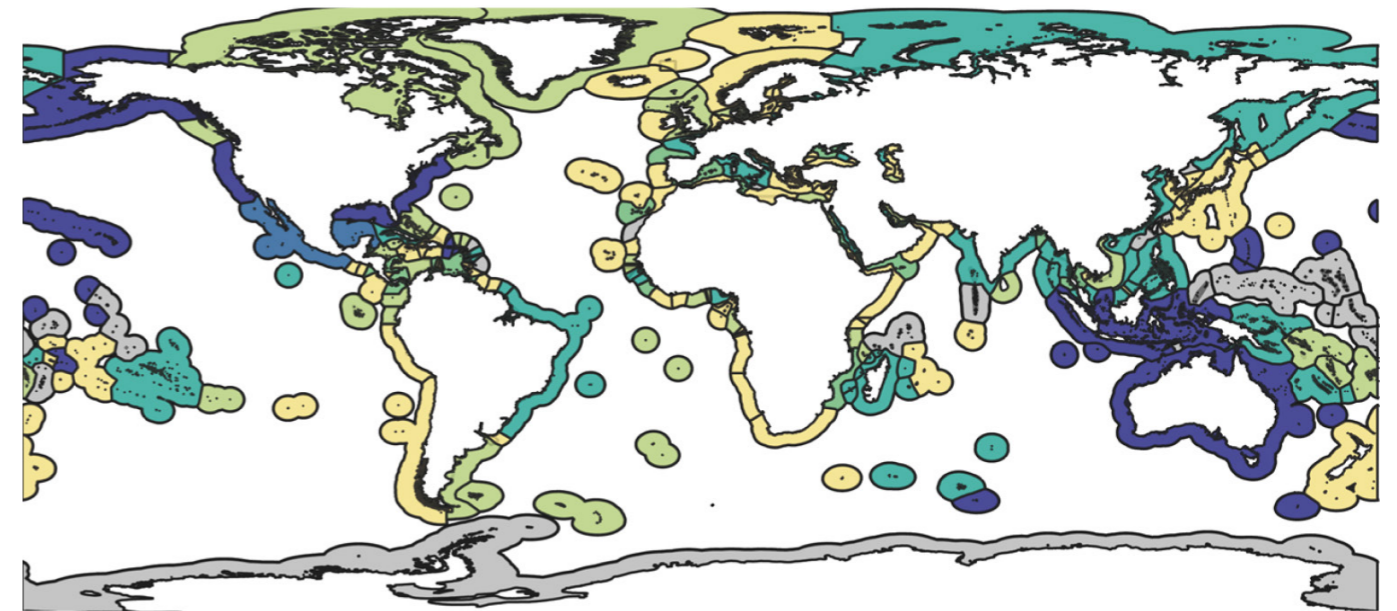
Carbone bleu côtier

Il s'agit du carbone capturé par les organismes vivants côtiers et marins et stocké dans les écosystèmes côtiers, tels que les mangroves, les herbiers marins et les marais salants.

NMT 2-4



| Procédé Carbone Bleu Côtier pour le stockage du carbone. ^[16] |



Potentiel de séquestration annuelle du carbone (en MtC).



| Potentiel annuel moyen de séquestration du carbone bleu. ^[17] |

« À l'échelle mondiale, les écosystèmes côtiers contribuent à la richesse en carbone bleu à hauteur de $190,67 \pm 30$ milliards USD par an⁻¹ en moyenne. Les trois pays qui génèrent la plus importante contribution nette positive à la richesse bleue pour les autres pays sont l'Australie, l'Indonésie et Cuba, l'Australie générant à elle seule un bénéfice net positif de $22,8 \pm 3,8$ milliards USD par an⁻¹ pour le reste du monde grâce à la séquestration et au stockage du carbone dans les écosystèmes côtiers situés sur son territoire ». ^[17]



AVANTAGES

- 726 tonnes de charbon sont compensées par un hectare de mangrove.
- Chaque année, les zones humides côtières stockent suffisamment de CO₂ pour compenser la combustion de plus d'un milliard de barils de pétrole.
- Dans certaines régions, un hectare d'herbier marin peut stocker 2 fois le carbone capturé par une forêt terrestre moyenne.
- Bien que couvrant moins de 1 % de l'océan, ils stockent plus de 50 % des réserves de carbone des fonds marins. ^[18]



DÉFIS

- S'ils sont dégradés ou perdus, les écosystèmes côtiers à carbone bleu rejettent la majeure partie de leur carbone dans l'atmosphère.
- Risque d'augmentation des émissions de CH₄.
- Effet des modifications du rivage sur le redépôt des sédiments et l'accrétion naturelle des marais.

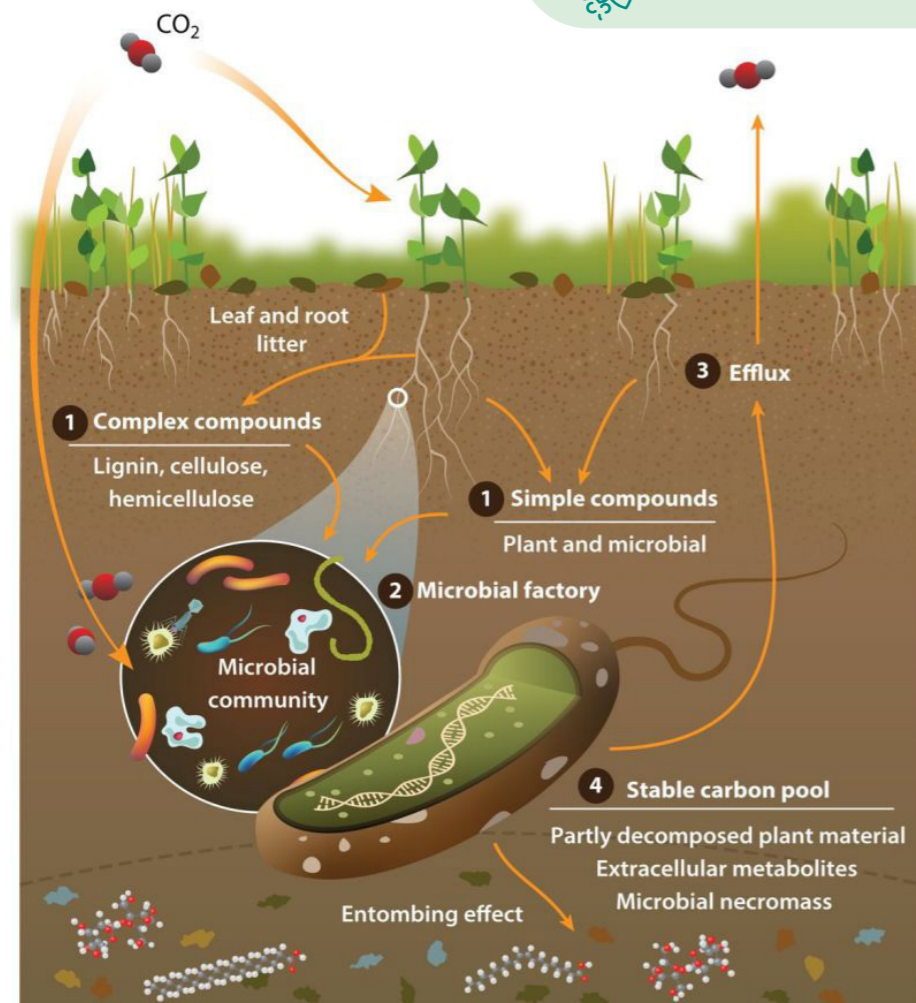
Stockage du carbone dans le sol (SCS)

Il s'agit de l'augmentation de la matière organique du sol par le biais de pratiques de gestion agricole spécifiques : réduction du travail du sol, utilisation de cultures de couverture, agroforesterie, utilisation de compost, etc.

En développement TRL 8-9

POTENTIEL D'ÉLIMINATION DU CARBONE :

: de 0,6 à plus de 3 Gt CO₂/an



Source [19]



AVANTAGES

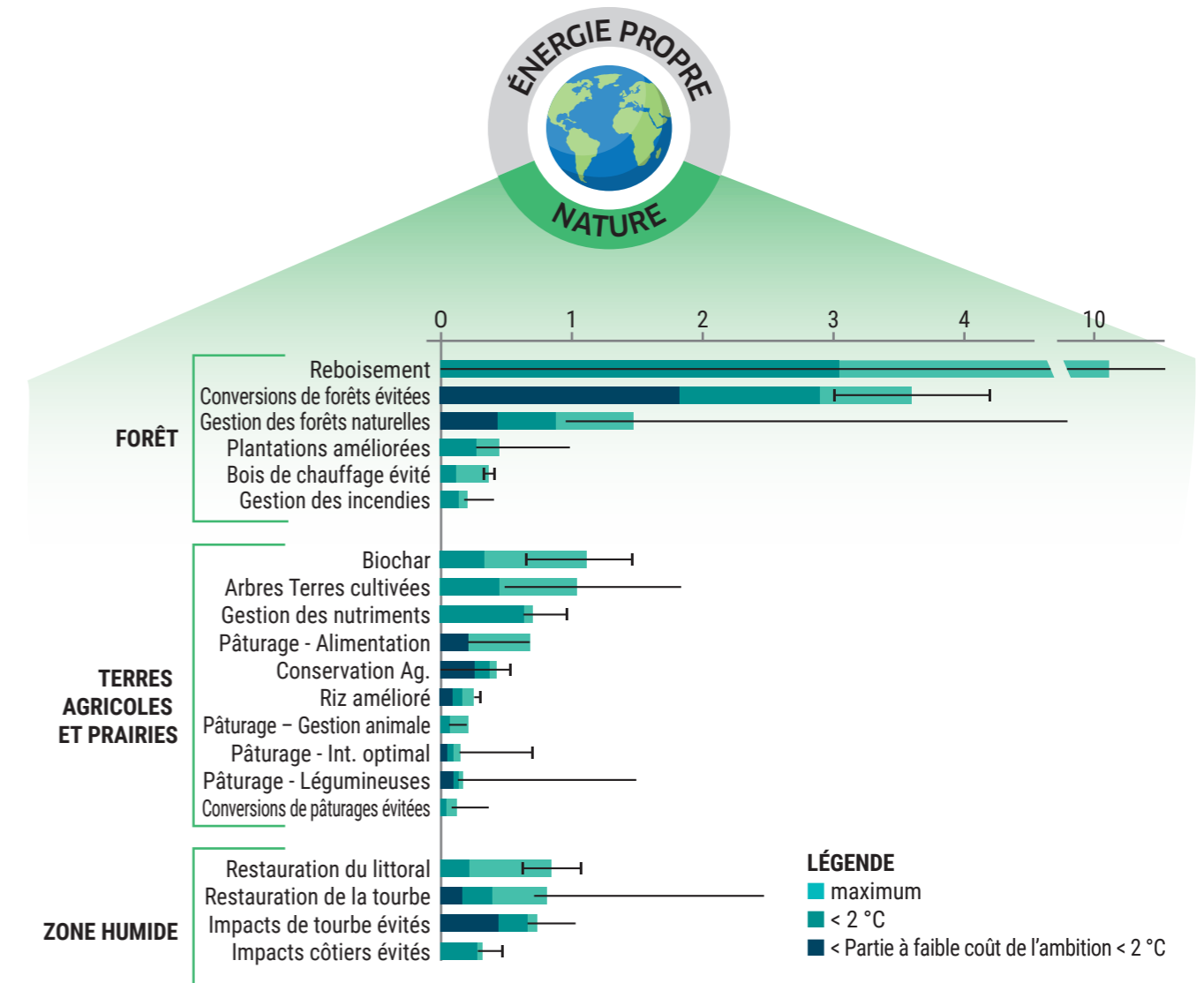
- Amélioration de la qualité des sols, de la résilience et de la productivité agricole.



DÉFIS

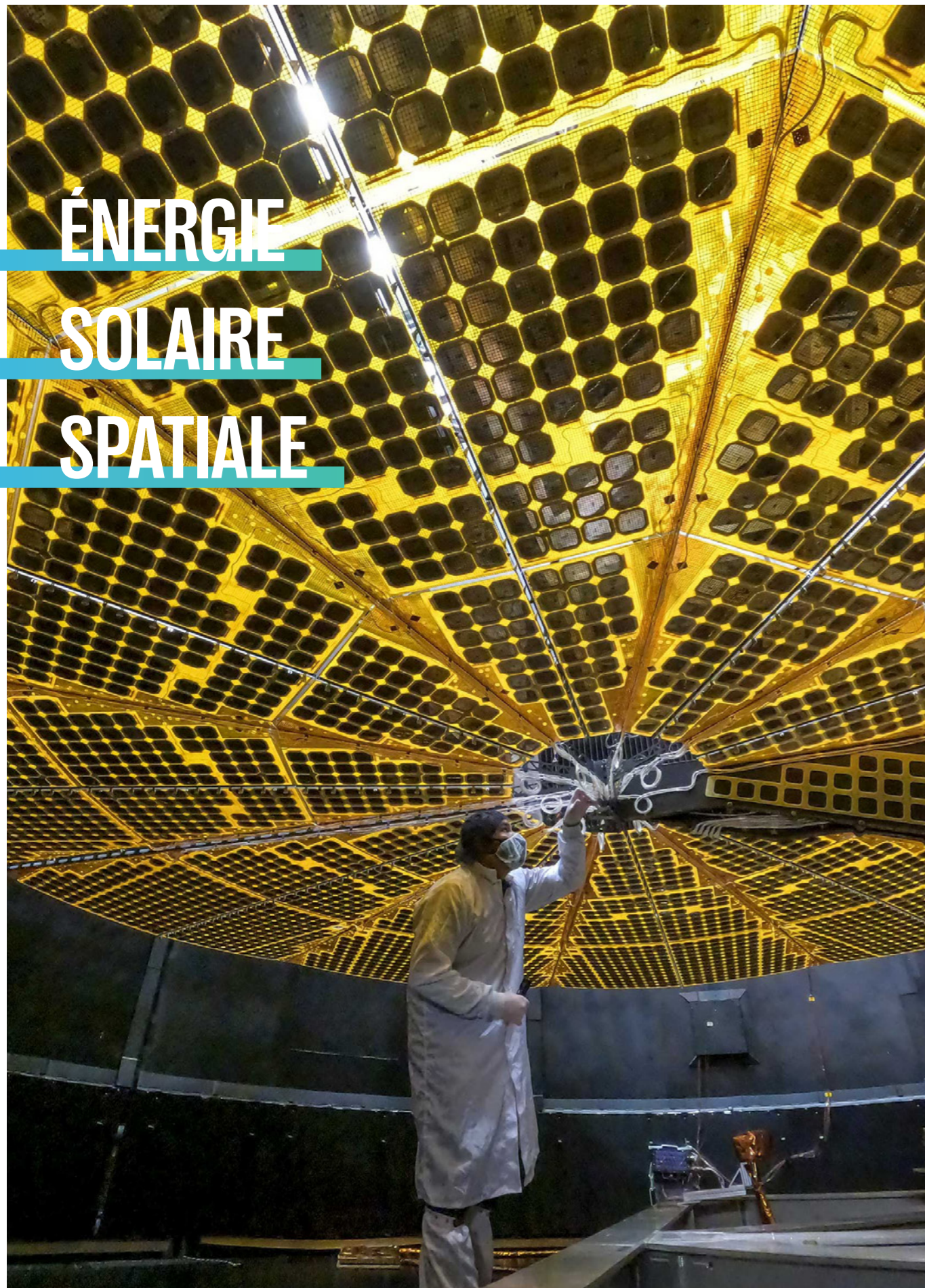
- Risque d'augmentation des émissions d'oxydes d'azote en raison de niveaux plus élevés d'azote organique dans le sol ; risque de renversement de la séquestration du carbone.

En maintenant ou en élargissant les écosystèmes, les SFN protègent la biodiversité contre le changement climatique et la perte d'habitat. À l'horizon 2030, les forêts représentent la meilleure solution pour stocker massivement le carbone.



| Solutions climatiques naturelles : potentiel d'atténuation du climat en 2030 (Gt CO₂e). Adapté de [20-21] |

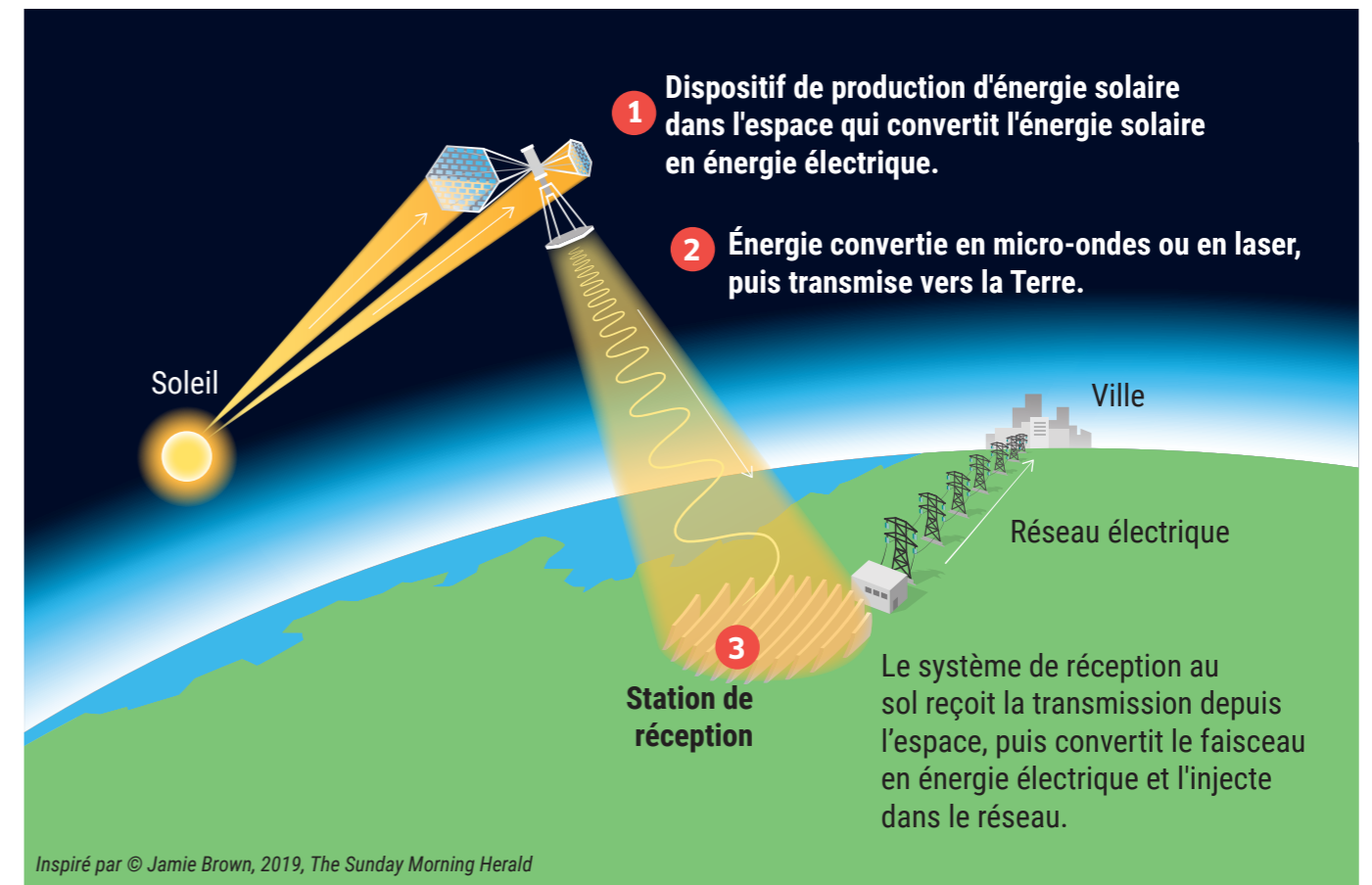
L'élimination et le stockage du CO₂ via la gestion de la végétation et des sols, peuvent être inversés par des perturbations humaines ou naturelles ; ils sont également sujets aux impacts du changement climatique. En comparaison, le CO₂ stocké dans les réservoirs géologiques et océaniques (via le BECCS, le DACCS, l'alcalinisation des océans) et sous forme de carbone dans le biochar est moins susceptible de s'inverser. [2]



ÉNERGIE SOLAIRE SPATIALE

Peut-on utiliser l'énergie solaire depuis l'espace pour offrir de l'énergie destinée à la consommation terrestre ?

Le concept des systèmes d'énergie solaire spatiale (ESS) consiste à recueillir l'énergie solaire en orbite terrestre haute*, puis à la transmettre sans fil vers la Terre.



1

L'énergie solaire est collectée par un satellite solaire qui convertit les rayons solaires en énergie électrique.

2

L'énergie électrique est ensuite convertie sous une autre forme d'énergie (comme les micro-ondes (MPT) ou le laser (LPT)) qui peut être transmise sans fil à travers l'atmosphère par le biais d'antennes.

3

Les antennes de réception au sol, appelées rectennes, convertiront l'énergie en énergie électrique avant de l'injecter dans le réseau.

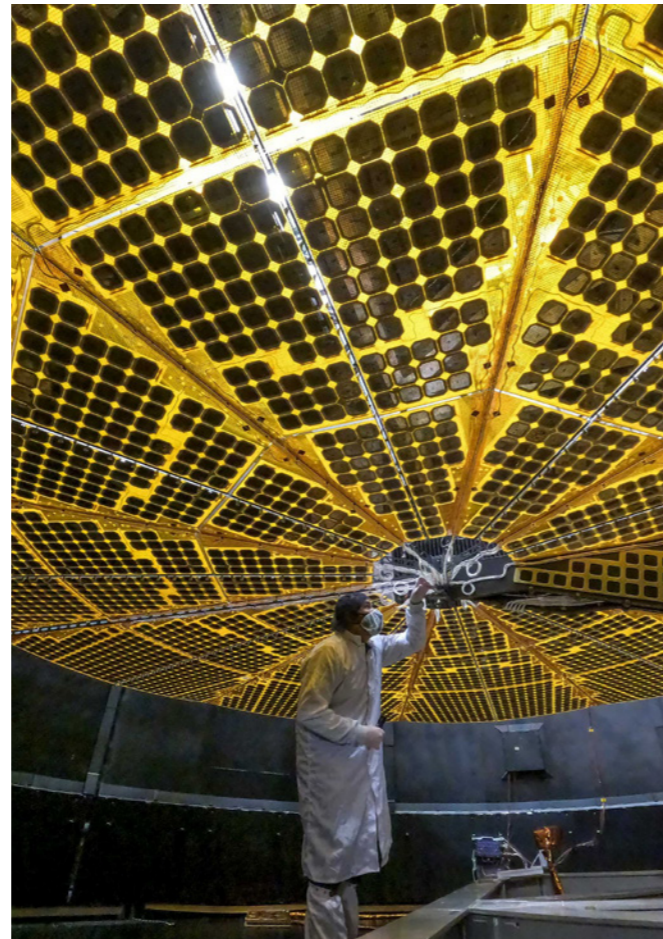
* Orbite terrestre géostationnaire (GEO) ou orbite terrestre basse (LEO).

Au cours de la dernière décennie, les progrès réalisés dans l'industrie spatiale rendent les systèmes ESS techniquement réalisables, potentiellement avant 2050^[1], grâce à :

- **La diminution des coûts de lancement spatial** grâce à des entreprises spatiales commerciales innovantes comme SpaceX ou Blue Origin. Les coûts de lancement ont déjà été réduits de 90 %^[1]. Réduction de 99 % des coûts des équipements spatiaux.^[2-3]
- **Les technologies émergentes** : robotique spatiale, technologies PV plus efficaces, satellites solaires plus légers... ces technologies sont prometteuses pour la fabrication et le déploiement rentable de structures spatiales exceptionnellement grandes à court terme.^[2]
- **La hausse des intérêts stratégiques** : « D'autres nations pourraient trouver un avantage stratégique et une influence mondiale grâce au développement d'une source d'énergie abondante et abordable qui pourrait être exploitée partout dans le monde ». ^[1]



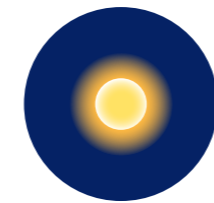
Véhicule de lancement réutilisable SpaceX Falcon 9 [EspaceX].



Panneaux solaires déployables développés par la NASA.

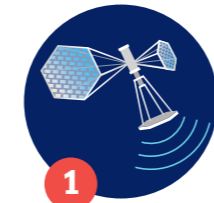


Différents concepts d'ESS sont en cours de développement mais ils reposent toujours sur les mêmes éléments.



Le soleil

Le Soleil peut fournir l'équivalent de 2 880 trillions d'ampoules ^[7] pour des milliards d'années. Une étroite bande autour de la Terre, à l'orbite géostationnaire, offre 100 fois plus d'énergie solaire que les besoins énergétiques mondiaux prévus pour l'humanité en 2050 ^[1].



Les panneaux solaires spatiaux

D'énormes structures composées de réflecteurs solaires permettent de réfléchir en permanence la lumière du soleil sur des panneaux solaires afin de maximiser l'énergie électrique produite.

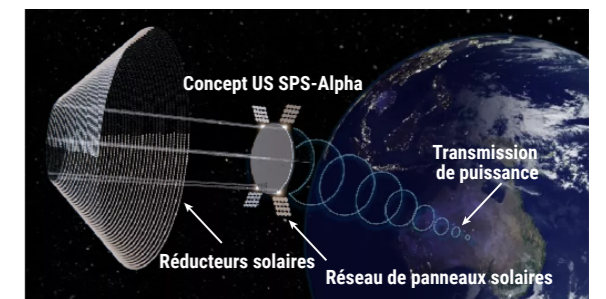
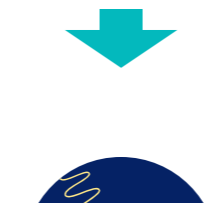


Illustration du système SPS-ALPHA (« Solar Power Satellite by means of Arbitrarily Large Phased Array ») envoyant de l'énergie à l'Australie. (Crédit image : John Mankins/Artemis Innovation Management Solutions)



Le transfert d'énergie par micro-ondes

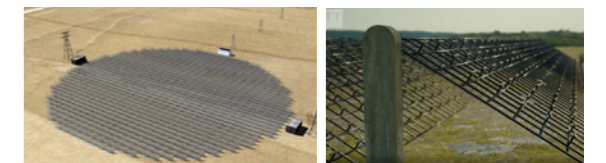
L'énergie électrique est convertie en une onde radio haute fréquence qui permet de transférer l'énergie vers la Terre à l'aide d'antennes de transmission :

- Fréquence spécifique à utiliser,
- Sécurité car l'intensité du faisceau sera raisonnable,
- Absorption / réchauffement négligeable ne provoquant aucun réchauffement de l'atmosphère. ^[2]



Station au sol

L'onde radio est captée par une station au sol composée de rectennas. La station devra avoir un diamètre de plusieurs km pour capturer l'intégralité de l'onde.



Station au sol ^[2]

Rectenna ^[5]

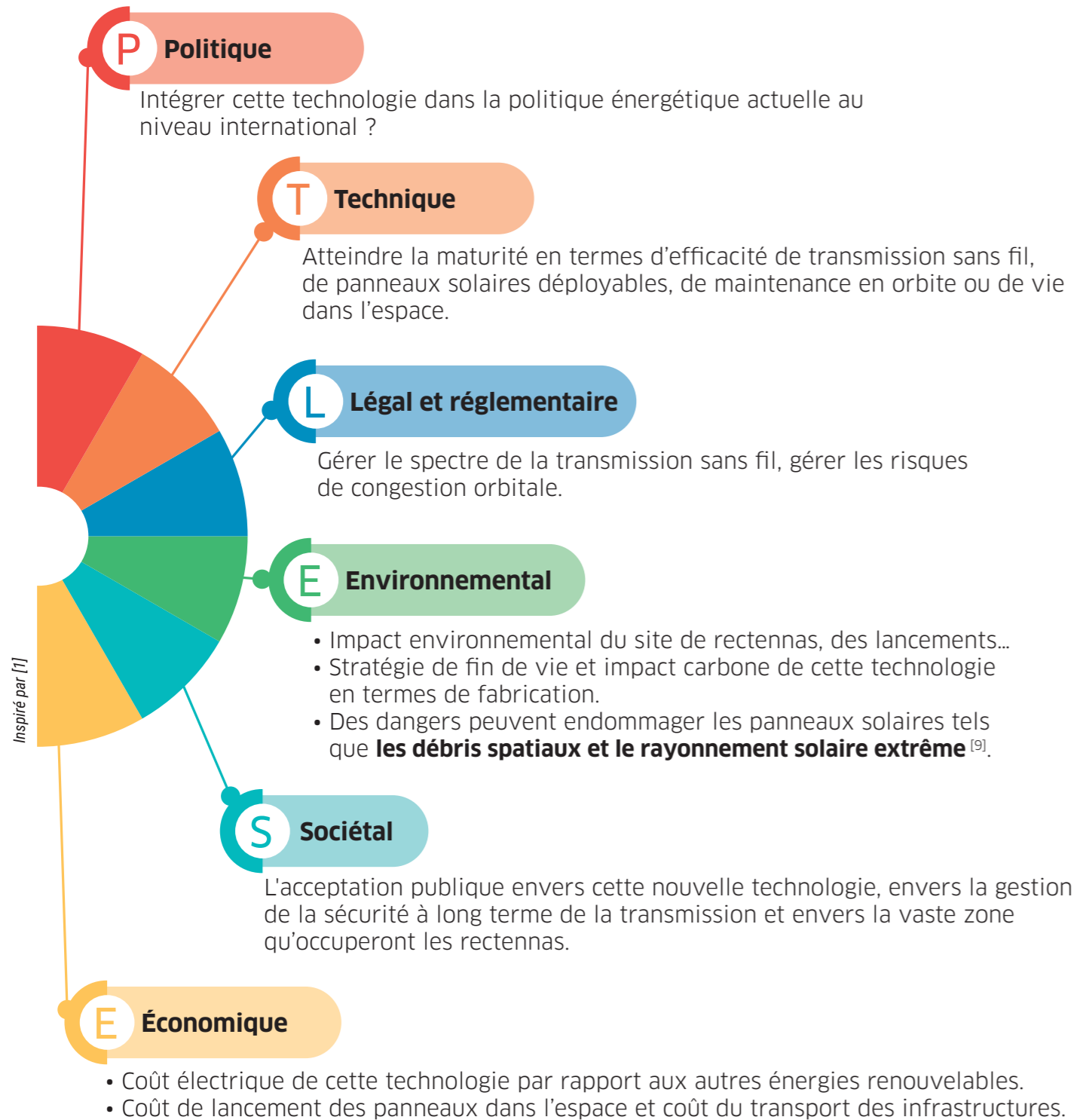


Infrastructures existantes, habitations et entreprises

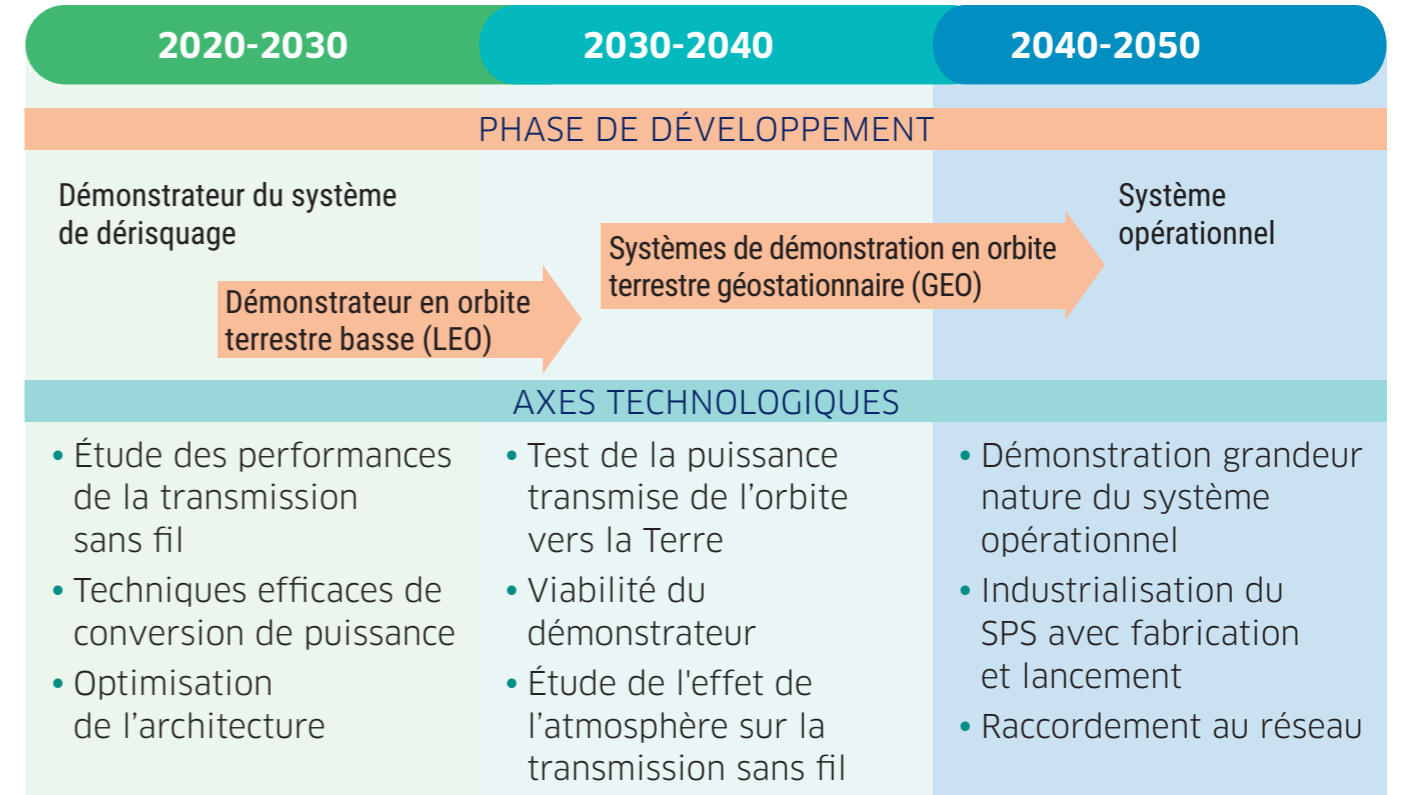
L'énergie est ensuite répartie dans l'infrastructure électrique existante menant aux habitations et aux entreprises. Courant continu ou courant alternatif introduit dans le réseau local. ^[2]

La maturité de la technologie augmente progressivement mais les défis restent nombreux.

La technologie fait actuellement face à de multiples défis sur différents aspects qui devront être résolus en vue d'une mise en œuvre future.



Un grand nombre d'entreprises ont établi une feuille de route de développement, les plus ambitieuses visant une application industrielle au cours de la prochaine décennie, alors que l'idée générale est de disposer de systèmes complètement opérationnels d'ici 2050.



Inspiré des programmes de développement issus de [1-3-6-7-8]

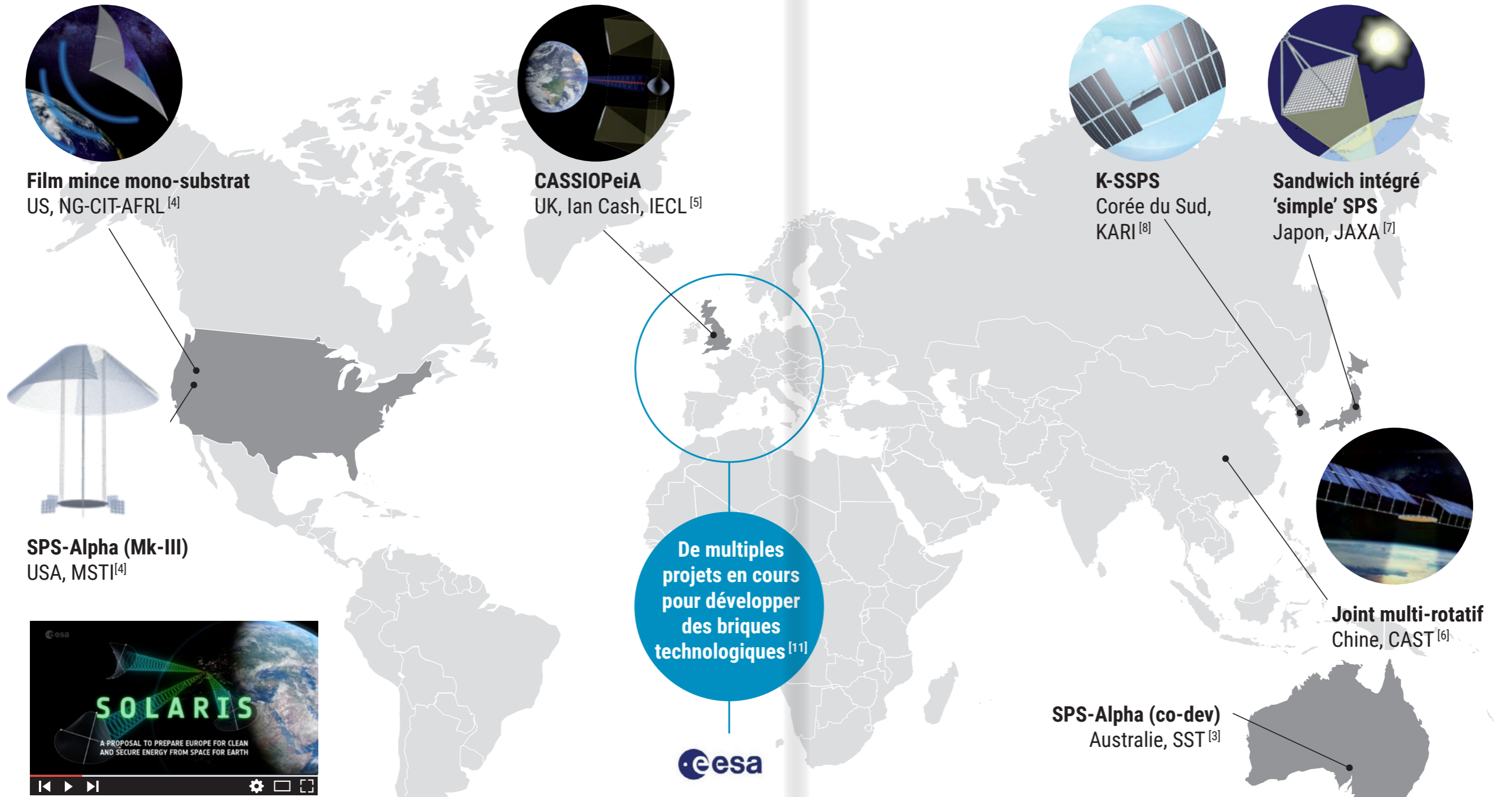
La production continue d'énergie verte sans émissions de GES fait de l'ESS un candidat crédible dans la course à la neutralité carbone.



AVANTAGES

- Période de rentabilité bas carbone : l'énergie solaire spatiale produira 0 % d'émissions de gaz à effet de serre sur Terre pendant son exploitation.^[1-7-9]
- Pas d'intermittence : cette technologie permet de produire de l'électricité en continu, 24 h/24 car, contrairement aux systèmes terrestres, l'environnement spatial n'a pas d'alternance de jour et de nuit. D'autant plus que les satellites ne se trouvent dans l'ombre de la Terre que pendant une période de 72 minutes par nuit et les satellites ne se trouvent dans l'ombre de la Terre que pendant 72 minutes par nuit au maximum.^[1-9-10]
- Une production d'énergie compétitive : l'efficacité des panneaux solaires sera supérieure aux applications terrestres et le LCOE estimé sera intéressant par rapport aux technologies actuelles utilisées sur Terre.^[1-9]

Différents concepts d'ESS sont en cours de développement dans le monde.



Tester la viabilité technique, politique et programmatique de l'ESS pour les besoins terrestres

SOLARIS

Gestion de la fin de vie



Concept de récepteur et transfert d'électricité sans fil



Technologie photovoltaïque



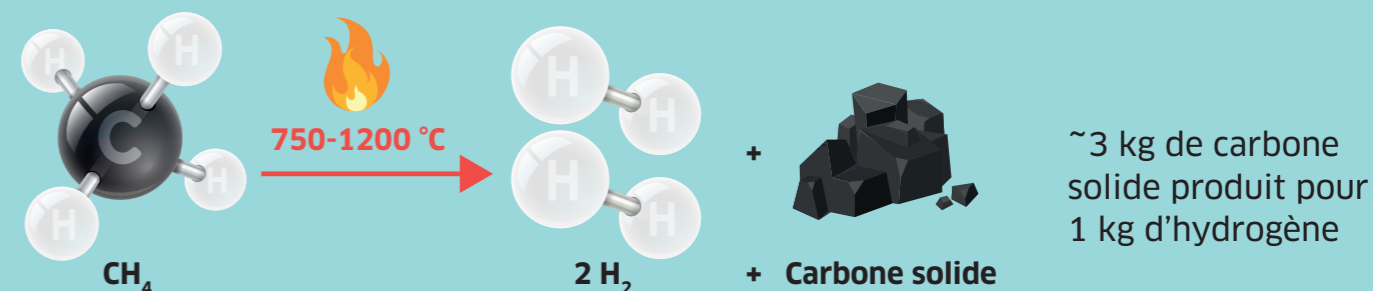
Fabrication et assemblage dans l'espace



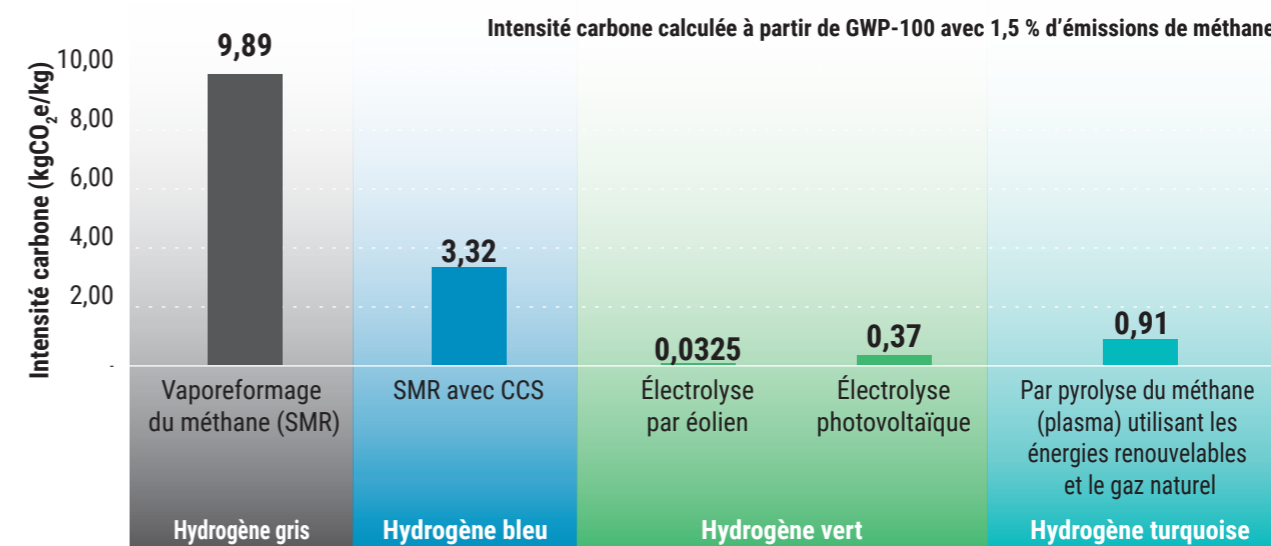
L'HYDROGÈNE TURQUOISE PAR PYROLYSE ?

La pyrolyse du méthane est un ensemble de technologies émergentes permettant de produire de l'hydrogène tout en évitant les émissions de CO_2 . Le carbone est stocké sous forme solide.

Communément appelée 'hydrogène turquoise', la pyrolyse du méthane consiste à convertir du gaz naturel en hydrogène et en carbone solide.



La pyrolyse du méthane pourrait présenter un moyen alternatif pour produire de l' H_2 bas carbone, tout en bénéficiant des infrastructures gazières naturelles existantes et en pérennisant leur utilisation.



| Comparaison de l'intensité carbone de l'hydrogène gris, bleu, vert et turquoise. Adapté de la source [1] |

Grâce au gaz naturel fossile, l'hydrogène turquoise est nettement plus performant que l'hydrogène gris ou bleu, mais moins que l'électrolyse par énergie éolienne, avec des émissions de production presque négligeables. La variabilité de l'intensité carbone pour les processus de pyrolyse dépendra beaucoup des émissions en amont de la chaîne d'approvisionnement en gaz naturel et en aval de la valorisation du carbone solide.

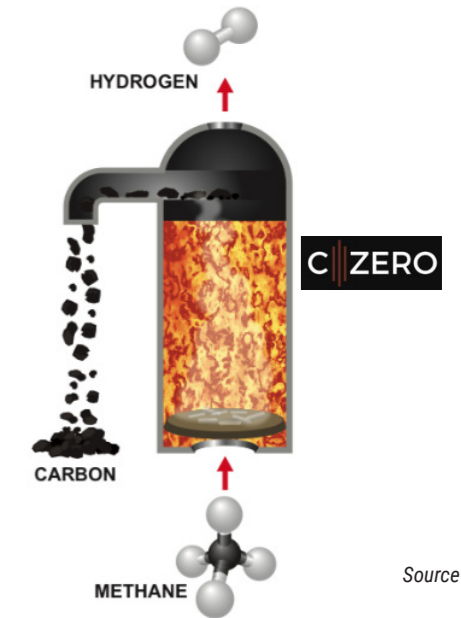
Plusieurs familles de technologies permettent la production d'hydrogène turquoise, avec le même défi : comment contrôler les réactions à haute température ?

	1 Pyrolyse par plasma	2 Pyrolyse thermique	3 Pyrolyse catalytique
Description	L'énergie électrique enflamme un plasma de gaz CH ₄ générant du H ₂ et du C solide	Bains de milieu fondus (sels ou métaux) pour décomposer le CH ₄ en H ₂ et en C solide	Décomposition catalytique du CH ₄ dans un lit fluidisé ou fixe
Stade de développement	Démonstrateur commercial	Échelle de laboratoire	Démonstrateur
NMT	NMT 5-9	NMT 3-5	NMT 4-7
Capacité H ₂ max actuelle	≈ 104 kg H ₂ / jour (MONOLITH)	≈ 10 kg H ₂ / jour (échelle de laboratoire - C-ZERO)	≈ 103 kg H ₂ / jour (HAZER)
Taux de conversion (NG à H ₂)	~ 85 %	~ 75 %	~ 85 %
Consommation électrique (kWh/ kg H ₂)	>10	Inconnu	> 10 (HAZER)

Parties prenantes

Source [2]

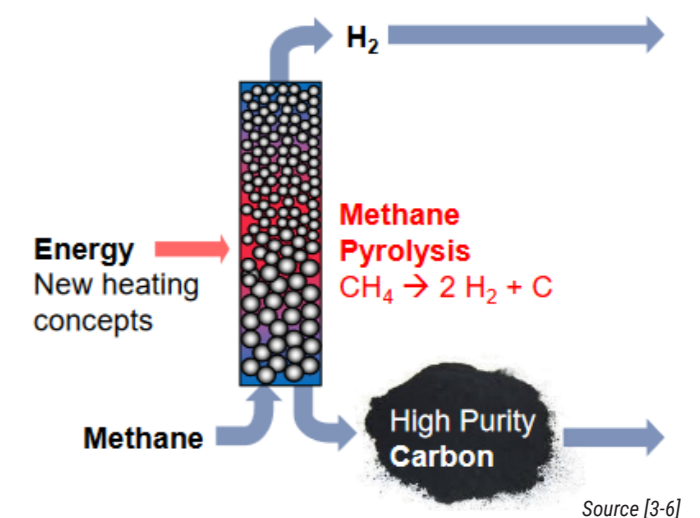
2 Pyrolyse thermique



Source [3-5]

Utilisation de réacteurs à milieux fondus (sel ou métal) qui améliorent le transfert de chaleur entre le gaz bouillonnant et les milieux fondus. La température de fonctionnement est d'environ 1000 °C.

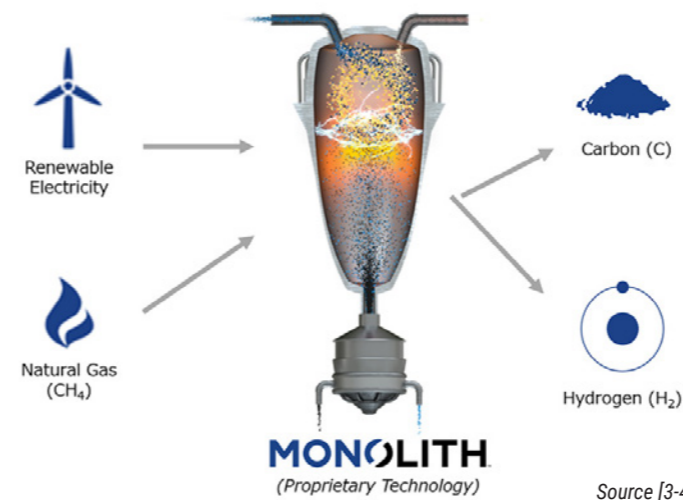
3 Pyrolyse catalytique



Source [3-6]

Le méthane se décompose en hydrogène et en carbone sur un catalyseur en carbone ou en métal (à base de nickel ou de fer) à une température comprise entre 650 et 1100 °C.

1 Pyrolyse par plasma



Source [3-4]

Utilisation d'une torche à plasma où le méthane se pyrolyse à 1000 °C (plasma froid) - 2000 °C (plasma chaud). Le plasma froid conduit à des conversions inférieures à 50 % sans la présence de catalyseurs, tandis que le plasma chaud entraîne une conversion supérieure à 90 %.

Selon la qualité du carbone, plusieurs voies de valorisation du carbone sont possibles.

Actuellement, le carbone est principalement utilisé comme charbon actif ou pour les batteries.



« Le charbon actif est utilisé pour purifier les liquides et les gaz dans diverses applications, notamment l'eau potable municipale, la transformation des aliments et des boissons, l'élimination des odeurs et le contrôle de la pollution industrielle ». [7]



L'ajout de noir de carbone ou de graphite est facultatif pour l'anode, mais obligatoire pour la cathode. Le noir de carbone est utilisé pour sa conductivité et sa résistance à la corrosion.

Les applications disruptives du carbone seront nécessaires pour développer le marché du carbone solide, si à l'avenir la demande en H₂ est satisfaite par la pyrolyse du méthane. En effet, les marchés actuels du carbone sont soit réduits, soit non matures.



Renforcement des puits de mines pour éviter les dolines dans les mines en Allemagne.



Renforcement de l'asphalte pour une meilleure résistance aux contraintes mécaniques et thermiques.



Comme filler ou comme granulats dans le béton, après validation dans les pilotes.



Séquestration dans des mines à ciel ouvert.

Pourquoi la pyrolyse du méthane est-elle intéressante ?



AVANTAGES

- Pas de CO₂ direct créé au cours du processus – carbone capté sous forme de carbone solide.
- Solution compétitive nécessitant une demande énergétique moindre que le vaporeformage du méthane (SMR).
- Production sur site (emprise foncière limitée, pas d'ajout d'infrastructure, pas d'utilisation d'eau).
- Technologie en cours de développement pour atteindre une échelle commerciale d'ici 2026.
- Un complément au H₂ vert lorsque les énergies renouvelables ne sont pas abordables/disponibles et que le gaz naturel est accessible et à bon prix.

Sources [3-4-5-6-8-9]



DÉFIS

- Gérer les émissions de CH₄ le long de la chaîne d'approvisionnement et pendant la conversion.
- Utiliser des énergies fossiles.
- Repenser la chaîne de valorisation du carbone.
- Optimiser l'intégration énergétique .
- Maximiser l'efficacité énergétique lors d'un processus à haute température (750 - 1200 °C).
- Gérer le stockage du carbone ? Problèmes de taille et de qualité.
- Les technologies plasma nécessitent de l'électricité et présentent donc moins d'intérêt pour compléter l'électrolyse dans les régions dépourvues d'électricité renouvelable abordable.

L'utilisation du biométhane ou d'e-méthane conduira à une intensité carbone négative de l'hydrogène, faisant de l'hydrogène turquoise un facteur de changement pour la transition énergétique

« L'utilisation de gaz naturel renouvelable avec un pourcentage de matières premières de 8 à 18 % entraîne de l'hydrogène avec une intensité carbone négative (atteignant -4,09 à -10,40 kg d'éq.CO₂/kg d'H₂ à 100 % de gaz naturel renouvelable), la plus faible par rapport à l'hydrogène gris, bleu et vert. » [1]

Compte tenu de la maturité technologique actuelle, le premier déploiement commercial devrait commencer en 2023 pour la technologie catalytique. D'autres technologies devraient atteindre à l'échelle commerciale entre 2025 et 2035.

MONOLITH Materials (US)

PYROLYSE PAR PLASMA

Olive Creek 1 : Première usine commerciale 2016-2020
 Olive Creek 2 : partenaire de l'installation d'extension : Mines de Paris (FR)^[10]

C-ZERO (US)

PYROLYSE CATALYTIQUE

Première usine pilote - 2022-2023
 Partenaires ^[11-12] : G&E et SoCalGas

Materia nova (BE)^[13]

PYROLYSE PAR PLASMA

Hiirrock (UK)^[14]

PYROLYSE PAR PLASMA

Spark (FR)^[15]

PYROLYSE PAR PLASMA

Plenesys (FR)^[16]

PYROLYSE PAR PLASMA

Sakowin (FR)^[17]

PYROLYSE PAR PLASMA

TNO (NL)^[18]

PYROLYSE CATALYTIQUE

VOLTACHEM (NL)^[18]

PYROLYSE CATALYTIQUE

Aarhus University (DK)^[21]

PYROLYSE CATALYTIQUE

• Adaptation de la technologie de l'hydrogène turquoise au biogaz - 2025

BASF (DE)

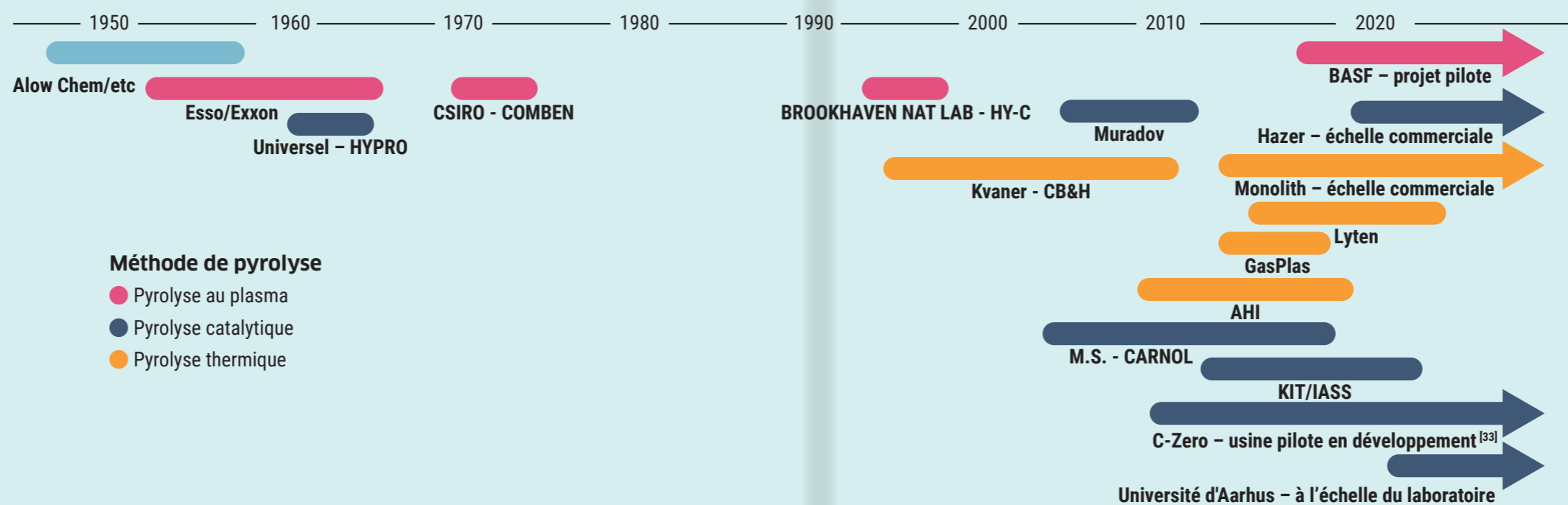
PYROLYSE THERMIQUE

- projet FfPaG - 2013-2017 Thyssenkrupp / BFI / TU dortmund/ Linde/ hte / Federal Ministry of Education and Research
- Démonstration de faisabilité 2019 Thyssenkrupp / BFI / TU dortmund / RUB / RURH universitat BOCHUM / KIT
- Installation de démonstration (DE) 2022 Partenaires : SABIC, Linde ^[6-22]

HAZER GROUP (AU) - Le procédé Hazer®

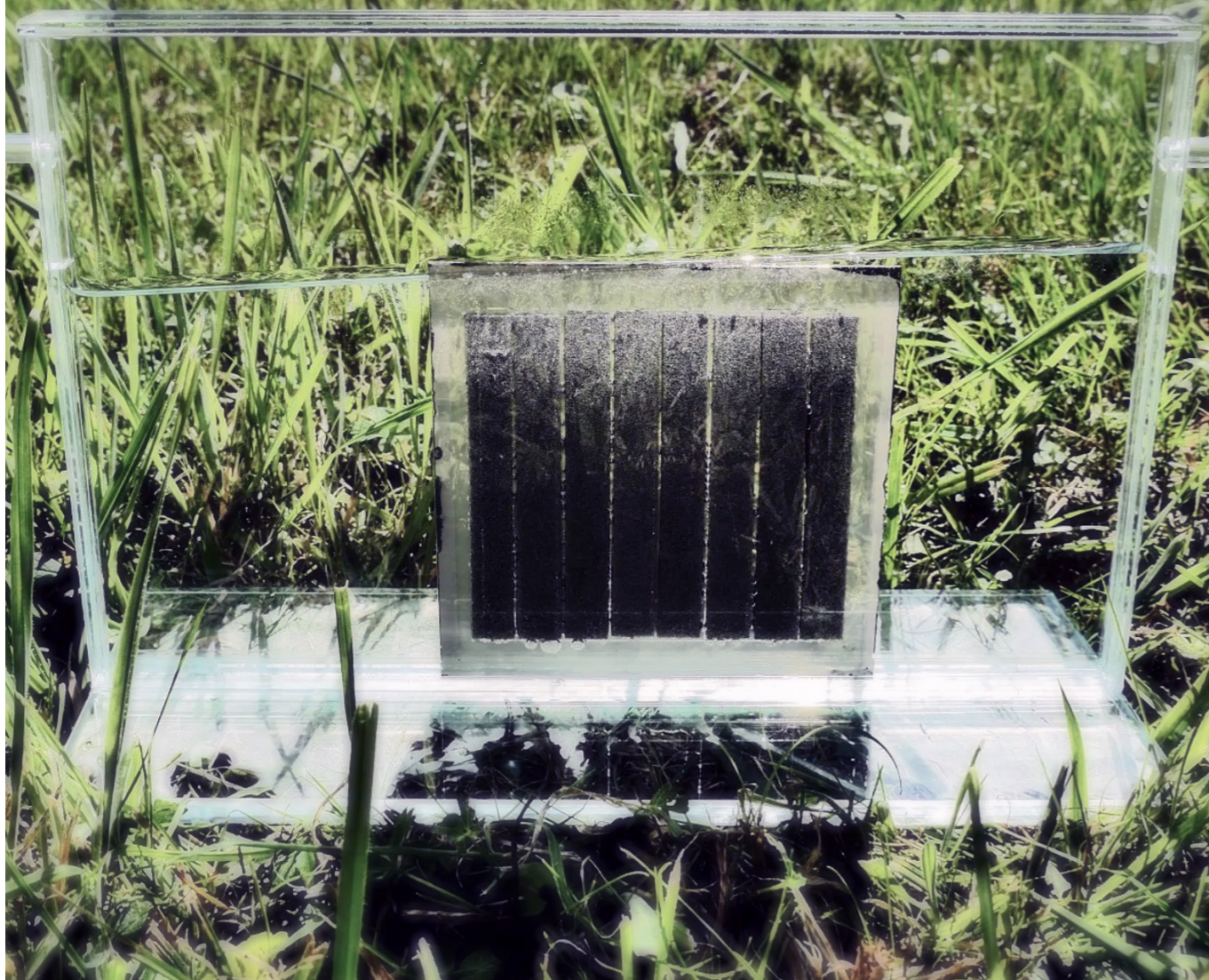
PYROLYSE CATALYTIQUE

Usine pilote de Kwinana (AU) - 2017
 Projet Hazer Hydrogène de Burrard (CA)
 Projet de démonstration commerciale
 Partenaires du projet Burrard : FortisBC Energy Inc., Suncor Energy Inc. ^[19-20]



Mis à jour à partir de [6]

PRODUCTION DE CARBURANTS SOLAIRES INDUITE PAR LA LUMIÈRE

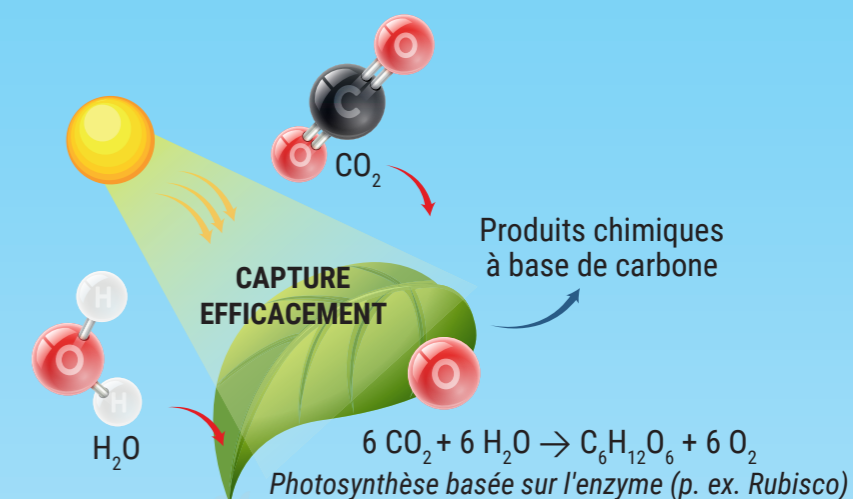


Une synthèse chimique induite par la lumière.

« La photosynthèse capture efficacement l'énergie solaire, mais sa conversion ultérieure en énergie chimique sous forme de biomasse est limitée en termes d'efficacité, de l'ordre de 1 à 4 %.

Le réacheminement du transport d'électrons photosynthétiques et la réduction de la puissance directement dans les filières souhaitées offrent une production durable de produits de grande valeur ».^[1]

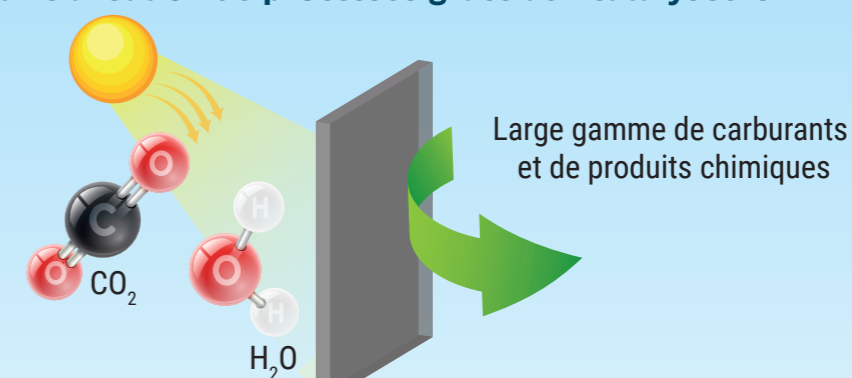
Procédés induits par la lumière impliqués dans la photosynthèse naturelle



Développement R&D



Artificialisation du processus grâce aux catalyseurs



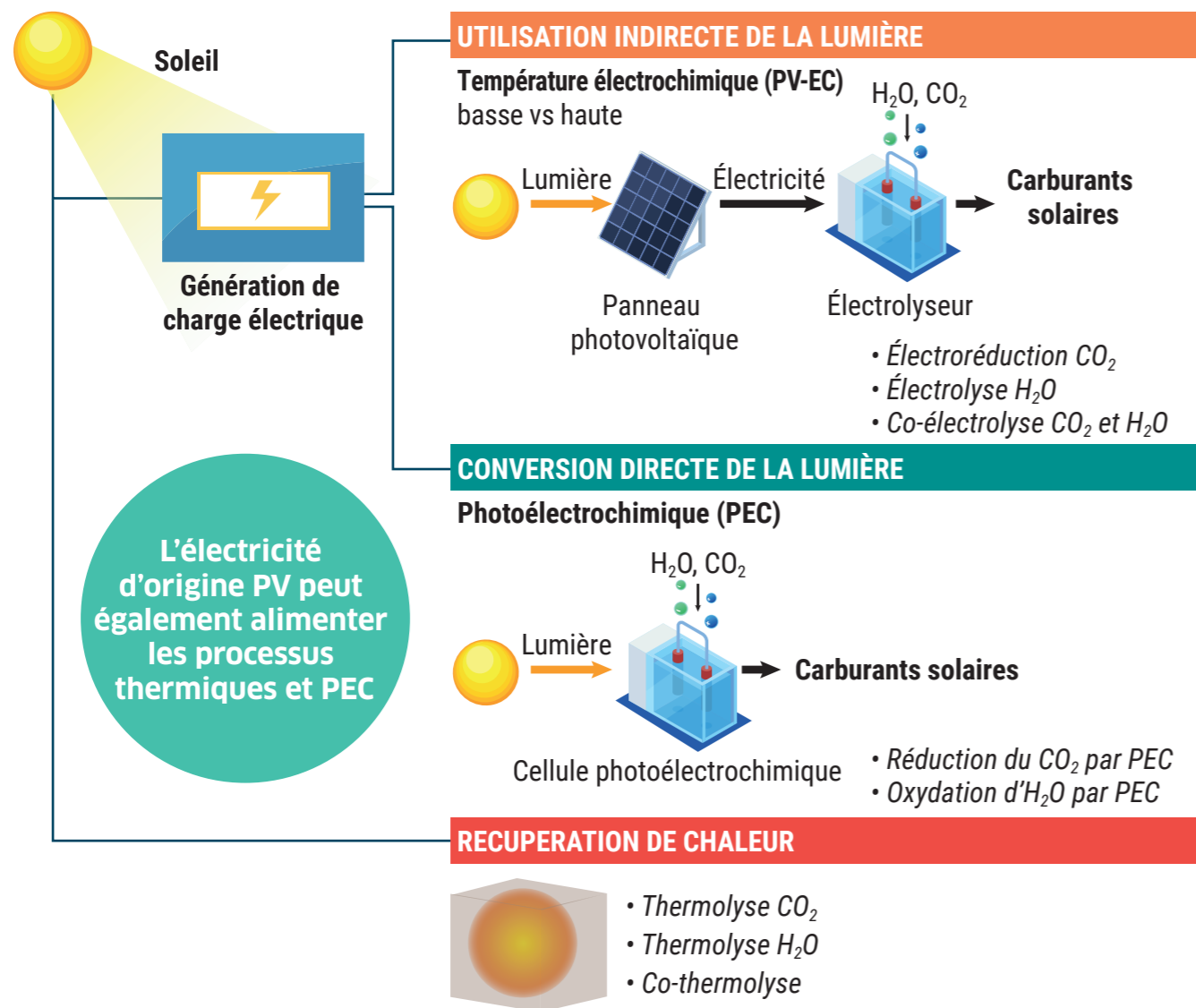
Réactions chimiques photo-activées basées sur le catalyseur

Source [1]

Qu'est-ce que cela signifie ?

« Les carburants solaires sont des combustibles fabriqués à partir de substances courantes comme l'eau et le dioxyde de carbone grâce à l'énergie de la lumière solaire, qui peut être utilisée par récupération de chaleur ou par génération de charge électrique ».

- carburants solaires =
- Hydrogène à partir de H₂O
 - Gaz de synthèse, méthane/méthanol, acide formique, C₂ + carburants liquides... à partir de CO₂ / CO₂ + H₂O



3 principaux processus de fractionnement solaire pour produire du H₂.

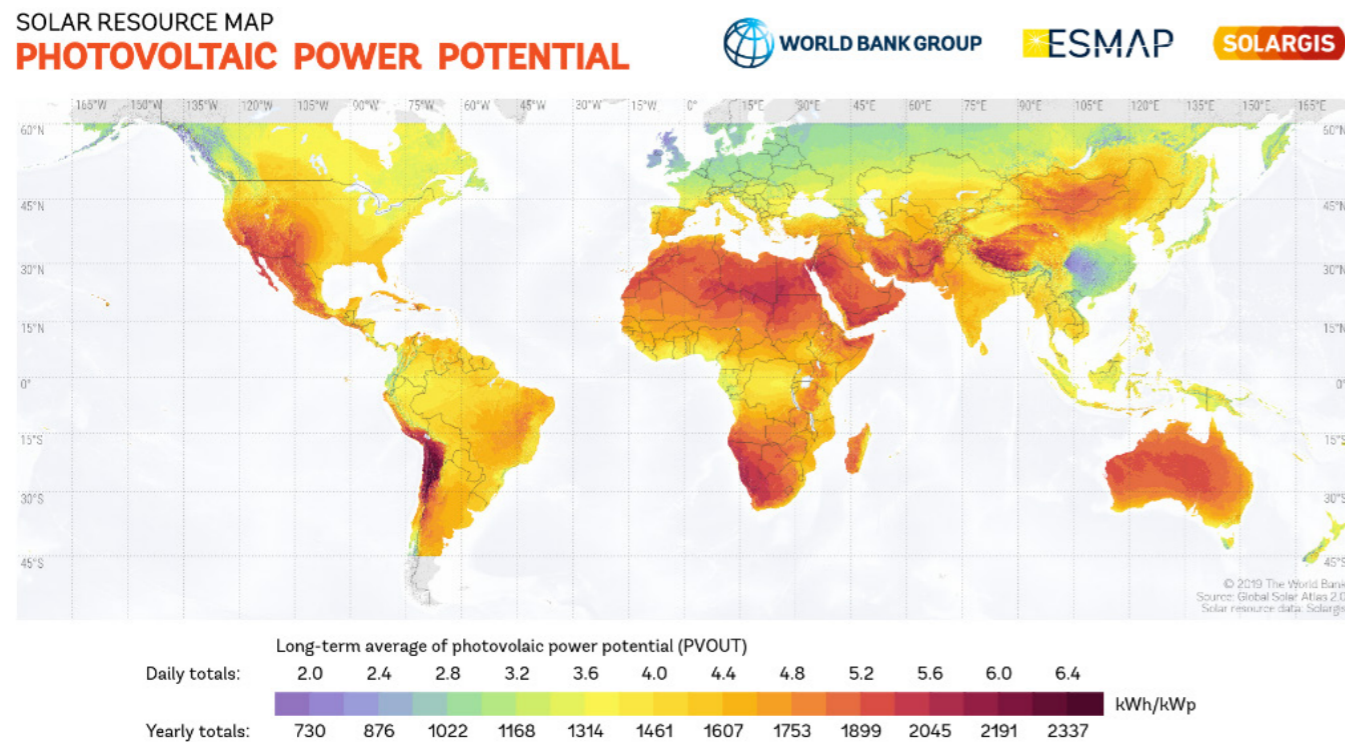
Système photovoltaïque-électrochimique (PV-EC)	Système photoélectrochimique (PEC)	Système particulaire photocatalytique (PC)
Technologie mature	En développement	Innovation
L'appareil PV absorbe les photons et génère de l'énergie, qui est transmise à la cellule EC, où les électrodes effectuent une réaction redox	Contient une ou deux photoélectrodes. L'absorption de la lumière et les réactions redox ont donc lieu au même endroit.	Photocatalyseur à surface spécifique élevée
<ul style="list-style-type: none"> 👍 Le PV est une technologie relativement mature 👍 L'absorbant de lumière peut se trouver en dehors de la solution aqueuse, donc pas de problèmes de photo-corrosion 👍 Cellule à 2 compartiments : séparation chimique aisée 👍 Les systèmes PV et EC peuvent être modulés librement ⚠️ Processus en deux étapes : empreinte plus importante, plus de matières premières nécessaires 	<ul style="list-style-type: none"> 👍 Processus intégré en une étape : empreinte plus légère/besoins moindres en matières premières 👍 Cellule à 2 compartiments : séparation chimique aisée 👍 Les systèmes PV et EC peuvent être modulés librement ⚠️ Absorbant de lumière en contact avec la solution : problèmes de photo-corrosion 	<ul style="list-style-type: none"> 👍 Système le plus simple : aucun circuit électrique impliqué, aucun électrolyte nécessaire 👍 Les deux réactions de réduction et d'oxydation ont lieu à la surface des particules, la distance entre les deux sites est donc très limitée, ce qui favorise l'efficacité et permet de travailler sans électrolyte supplémentaire ⚠️ Séparateur chimique nécessaire (la recombinaison de H₂ et O₂ est explosive !)

Source [3]

Stockage à long terme et transport longue distance d'énergie solaire intermittente.

Même si l'électrification à grande échelle figure dans la plus grande partie de la feuille de route de décarbonation, le déploiement des technologies de carburants solaires sera toujours nécessaire pour le stockage à long terme et le transport sur de longues distances de l'énergie solaire intermittente en molécules.

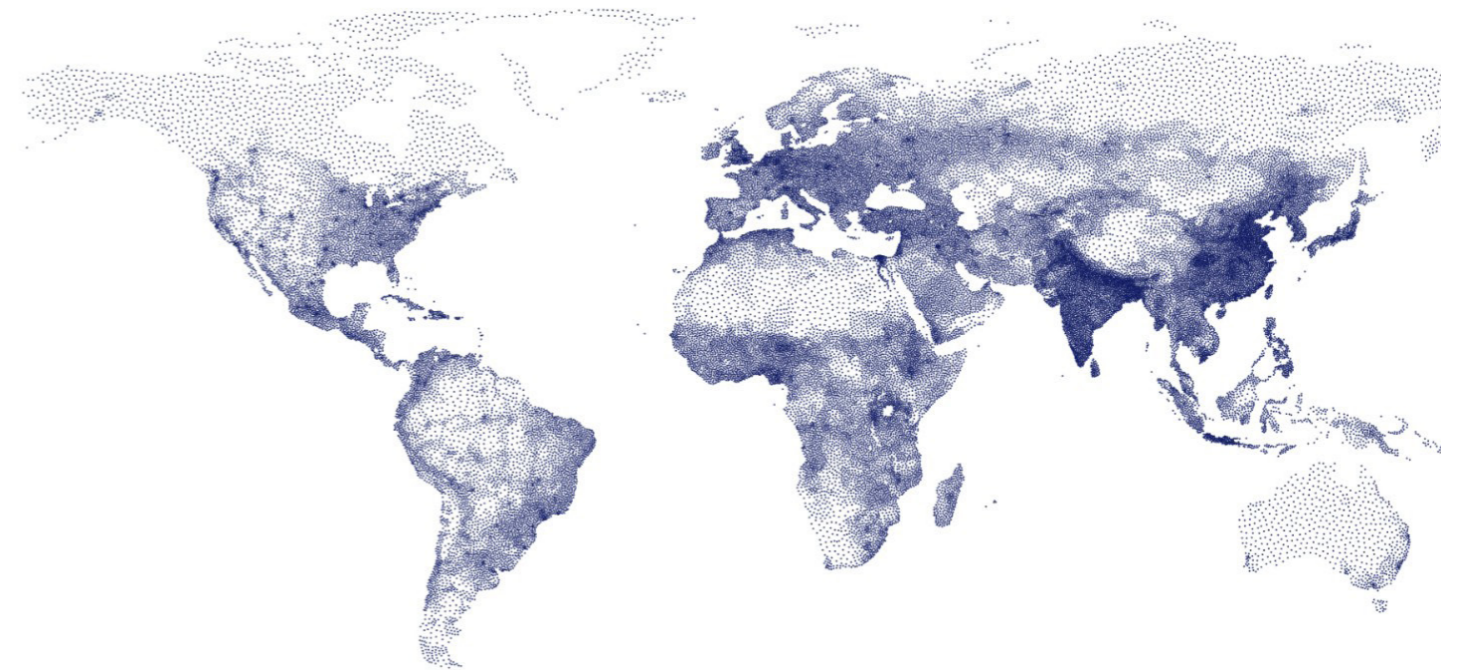
En effet, la répartition mondiale du rayonnement solaire ne correspond pas à la répartition de la densité de population. Les combustibles deviennent nécessaires pour le stockage et le transport longue distance de l'énergie récoltée.



Carte des ressources solaires : potentiel photovoltaïque.

© 2020 Banque mondiale, Source : Global Solar Atlas 2.0, Données sur les ressources solaires : Solargis.

Profiter de l'énergie solaire illimitée et gratuite est l'un des principaux objectifs des carburants solaires.



Carte de densité de population.^[4]

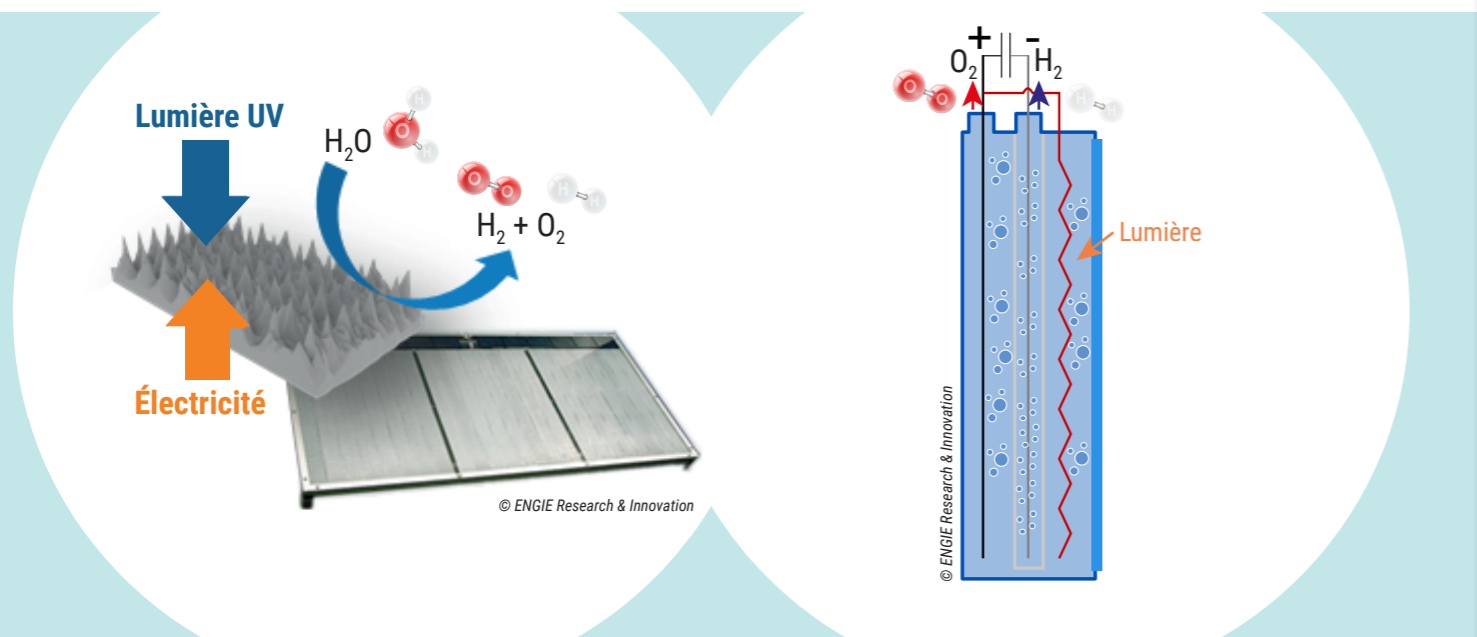
Les zones les plus éclairées par le soleil sont rarement les plus densément peuplées. Par conséquent, la récupération de l'énergie solaire par les carburants solaires devient essentielle.

Les technologies de réduction électrochimique du CO₂ ne sont pas encore disponibles sur le marché : alors que peu de grands fournisseurs de technologies dominent le marché de l'électrolyse à haute température, **un grand nombre de start-ups et de centres de R&D se positionnent sur l'électrolyse à basse température.**

Avec un TRL beaucoup plus faible, les carburants solaires PEC à base de **CO₂ sont aujourd'hui principalement développés à l'échelle du prototype** par des universitaires, même si l'on observe un intérêt croissant de la part de certains acteurs industriels, déjà positionnés sur la production de H₂ par PE.

NanoH₂

ENGIE Research & Innovation travaille sur la technologie d'électrolyse de l'hydrogène assistée par le soleil, qui permet de réduire le coût électrique de l'hydrogène grâce à l'utilisation directe de la lumière du soleil.



Ruptures technologiques :

- **Grande évolutivité :**
La conception des panneaux permet d'adapter précisément la capacité de production aux besoins des clients.
- **Haute modularité :**
Ajout et retrait de panneaux pour ajuster la capacité de production aux besoins des clients.
- **Faciliter la production d'hydrogène vert :**
La production d'hydrogène vert ne repose pas uniquement sur un mélange électrique.
- **Pierre angulaire :**
Les solutions techniques développées pourront s'appliquer aux systèmes entièrement photocatalytiques lorsque leur durabilité et leur efficacité atteindront les normes industrielles.



Aujourd'hui, un consortium européen fait confiance aux solutions de carburants solaires, tandis qu'un nombre croissant d'industriels se lancent dans la production de H₂ par PEC.

- **SUNER-C** un projet de l'UE pour la coordination et l'action de soutien afin d'accélérer la transition des technologies vers la production de combustibles solaires et de produits chimiques ^[5]
- Membres du comité **SUNERGY**

COMMUNAUTÉ EUROPÉENNE
Horizon Europe CSA
« Communauté de l'innovation pour les carburants solaires et les produits chimiques solaires »



2 CONSORTIUMS EN EUROPE PROJETS H2020



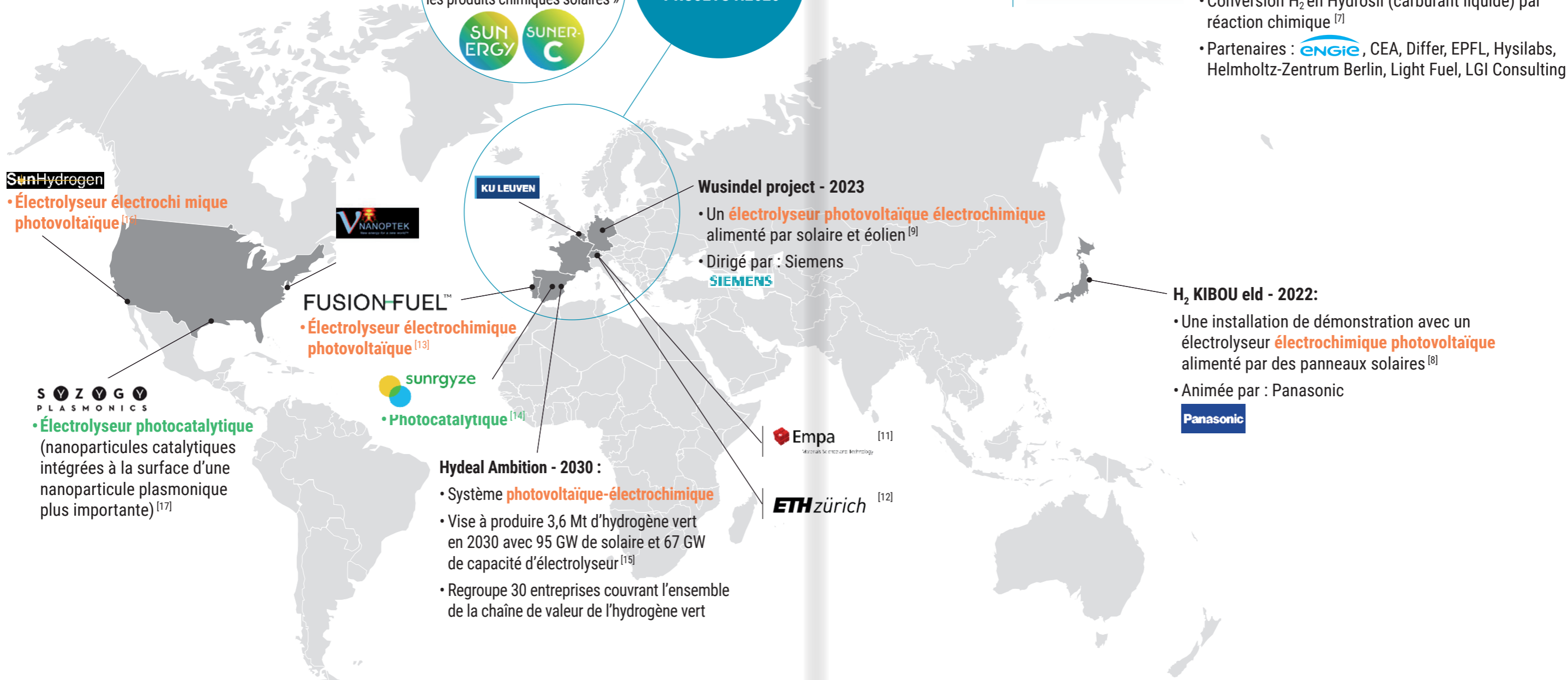
Technologie :

- Cellule photoélectrochimique de flux pour la production de H₂ et de CO (gaz de synthèse) et la valorisation de la biomasse
- **Réacteur photocatalytique** pour la conversion du gaz de synthèse (produit dans le compartiment 1) en combustible (CH₃OH ou DME) ^[6]
- Partenaires : **ENGIE**, University of Bologna, Catalan inst. for chemical research, national research council of Italy, Utrecht University, University of Ferrara, Hygear, Amires, The University of Carolina at Chapel Hill



Technologie :

- **Procédé photoélectrochimique** pour produire du H₂
- Conversion H₂ en Hydrosil (carburant liquide) par réaction chimique ^[7]
- Partenaires : **ENGIE**, CEA, Differ, EPFL, Hysilabs, Helmholtz-Zentrum Berlin, Light Fuel, LGI Consulting



BIBLIOGRAPHIE

INTRODUCTION

- [1] Drechsler C et Agar D W (2020) Intensified integrated direct air capture - power-to-gas process based on H₂O and CO₂ from ambient air (Captage d'air direct intégré intensifié - processus de conversion de l'énergie en gaz à partir de H₂O et de CO₂ provenant de l'air ambiant). *Applied Energy*, 273, 1150763. DOI : 10.1016/j.apenergy.2020.115076
- [2] Wurzbacher J A, Gebald C, Piatkowski N et Steinfeld A. (2012) Concurrent Separation of CO₂ and H₂O from Air by a Temperature-Vacuum Swing Adsorption/Desorption Cycle. (Séparation simultanée du CO₂ et de l'H₂O de l'air par un cycle d'adsorption/désorption à variation de température et de vide). *Environ. Sci. Technol.* 46, pp. 9191-9198. DOI : 10.1021/es301953k
- [3] Elving J and Sainio T (2021) Kinetic approach to modelling CO₂ adsorption from humid air using amine-functionalized resin: Equilibrium isotherms and column dynamics. (Approche cinétique de la modélisation de l'adsorption du CO₂ de l'air humide à l'aide d'une résine fonctionnalisée par une amine : Isothermes d'équilibre et dynamique de colonne). *Chemical Engineering Science*, 246, 116885. DOI : 10.1016/j.ces.2021.116885

ENJEU MATÉRIEL CRITIQUE : EXEMPLES DE PV ET DE BATTERIES À L'ÉCHELLE DU TERAWATT

- [1] Futuretimeline (2022) Solar power reaches 1 TW milestone (Le solaire atteint le seuil de 1 TW). Disponible sur : <https://www.futuretimeline.net/blog/2022/03/24-solar-power-future-timeline.htm>
- [2] Kim T. Y. et al. (2022) The role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. (Le rôle des minéraux critiques dans les transitions vers des énergies propres). AIE. Disponible sur : <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions/executive-summary>
- [3] Bett A. et al. (2022) Photovoltaic report. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems with support of PSE Projects. (Rapport sur le photovoltaïque. Institut Fraunhofer pour les systèmes d'énergie solaire avec le soutien de PSE Projects). Disponible sur : <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>
- [4] Mikeska K. R., Lu M. et Liao W. (2019) Tellurium-based screen-printable conductor metallizations for crystalline silicon solar cells. (Métallisations conductrices sérigraphiables à base de tellurium pour les cellules solaires en silicium cristallin). *Prog Photovolt Res Appl.* 27: 1071- 1080. DOI : 10.1002/pip.3185
- [5] Solar choice. How are Solar Panels made? What are they made of? List of Solar Panel components. (Choix solaire. Comment sont fabriqués les panneaux solaires ? De quoi sont-ils faits ? Liste des composants du panneau solaire). Solar Choice. Disponible sur : <https://www.solarchoice.net.au/solar-power/how-are-solar-panels-made/>
- [6] Abdelilah Y., Bahar H. and Briens F. (2022) Solar PV Global Supply Chains – An IEA Special Report. (Chaînes d'approvisionnement mondiales du PV solaire - Un rapport spécial de l'AIE). AIE. Disponible sur : <https://www.iea.org/reports/solar-pv-global-supply-chains>
- [7] Frischknecht R. et Krebs L. (2021) Environmental life cycle assessment of electricity from PV systems. (Évaluation du cycle de vie environnemental de l'électricité à partir de systèmes photovoltaïques). AIE. Disponible sur : <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/11/IEA-PVPS-Task12-LCA-PV-electricity--Fact-Sheet.pdf>
- [8] IEA (2022) Global Supply Chains of EV Batteries. (Chaînes d'approvisionnement mondiales des batteries de véhicules électriques). AIE. Disponible sur : <https://www.iea.org/reports/global-supply-chains-of-ev-batteries>

- [9] Guevara Opinska L. et al. (2021) Study on the resilience of critical supply chains for energy security and clean energy transition during and after the COVID-19 crisis: final report. (Étude sur la résilience des chaînes d'approvisionnement critiques pour la sécurité énergétique et la transition énergétique propre pendant et après la crise du COVID-19 : rapport final). Publications Office of the European Union. Disponible sur : <https://data.europa.eu/doi/10.2833/946002>
- [10] Systematiq (2022) Critical raw materials for the energy transition in the EU: How circular economy approaches can increase supply security for critical raw materials. (Matières premières critiques pour la transition énergétique dans l'UE : Comment les approches de l'économie circulaire peuvent accroître la sécurité de l'approvisionnement en matières premières critiques). Systematiq. Disponible sur : <https://www.systemiq.earth/raw-materials-europe/>
- [11] Fischer M. et al. (2022) International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) 2021 Results. (Feuille de route technologique internationale pour le photovoltaïque (ITRPV) Résultats 2021). Disponible sur : <https://www.vdma.org/international-technology-roadmap-photovoltaic>
- [12] Goldschmidt J.C. et al. (2021) Technological learning for resource efficient terawatt scale photovoltaics. (Apprentissage technologique pour un photovoltaïque efficace à l'échelle du terawatt). *Energy Environ. Sci.* 5147-5160. DOI : 10.1039/D1EE02497C
- [13] Site internet Apollon star. Disponible sur : <https://en.apollonsolar.com/home>
- [14] Macé P., Bosch E. and Aleman M. (2021) Terawatt Scale PV by 2050 and Competition for Minerals: The Case of Silver and Copper. 38th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition Brussels. (Le photovoltaïque à l'échelle du térawatt d'ici 2050 et la concurrence pour les minéraux : le cas de l'argent et du cuivre. 38e Conférence et exposition européennes sur l'énergie solaire photovoltaïque, Bruxelles). Belgique. Septembre 2021. pp 683-689. DOI :10.4229/EUPVSEC20212021-4CO.4.6
- [15] Lee S. H. et al. (2017) Review of Conductive Copper Paste for c-Si Solar Cells. (Examen de la pâte de cuivre conductrice pour les cellules solaires c-Si). *Korean J. Met. Mater.* Vol. 55. No. 9. pp. 637-644. DOI : 10.3365/KJMM.2017.55.9.637
- [16] Heliateck. Heliasol(R) The innovative solar film. (Le film solaire innovant). Heliateck. Disponible sur : <https://www.heliateck.com/en/technology/>
- [17] Jin C. et al (2021) Biomass-based materials for green lithium secondary batteries. (Matériaux à base de biomasse pour batteries secondaires au lithium vert). *Energy Environ. Sci.* 14 1326. DOI : 10.1039/D0EE02848G
- [18] Majani d'Inguibert C. et Clément B. (2018) World premiere in recycling photovoltaic panels. (Première mondiale dans le recyclage de panneaux photovoltaïques). Groupe Veolia. Disponible sur : <https://youtu.be/PaUISZ2bil8>
- [19] Harper G. et al. (2019) Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. (Recyclage des batteries lithium-ion des véhicules électriques). *Nature*. pp. 75-86 DOI : 10.1038/s41586-019-1682-5
- [20] Searcey D., Forsythe M. et Lipton E. (2021) A Power Struggle Over Cobalt Rattles the Clean Energy Revolution. (Une lutte de pouvoir autour du cobalt perturbe la révolution de l'énergie propre). *The New York Times*. Disponible sur : <https://www.nytimes.com/2021/11/20/world/china-congo-cobalt.html>

GÉOINGÉNIERIE

- [1] Lawrence M. G. et al. (2018) Evaluating climate geoengineering proposals in the context of the Paris Agreement temperature goals. (Évaluation des propositions de géoingénierie climatique dans le cadre des objectifs de température de l'Accord de Paris). *Nat Commun.* DOI : 10.1038/s41467-018-05938-3
- [2] Vaughan N. E. et Lenton T. M. (2011) A review of climate geoengineering proposals. (Examen des propositions de géoingénierie climatique). *Climatic change.* DOI : 10.1007/s10584-011-0027-7
- [3] Pavel I. (2022) Géo-ingénierie – Perspectives, limites et risques. *Annales des Mines - Responsabilité et environnement.* DOI : 10.3917/re1.105.0083
- [4] Edenhofer O. et Madruga R. P. (2012) Réunion d'experts du GIEC sur la géoingénierie : Lima. Pérou. 20-22 juin 2011 : Compte-rendu de réunion. Groupe de travail III du GIEC Unité de soutien technique. Disponible sur : https://archive.ipcc.ch/pdf/supporting-material/EM_GeoE_Meeting_Report_final.pdf

- [5] Lenton T. M. et Vaughan N. E. (2009) The radiative forcing potential of different climate geoengineering options. (Le potentiel de forçage radiatif des différentes options de géoingénierie climatique). Atmos Chem Phys. DOI :10.5194/acp-9-5539-2009
- [6] Université de Leeds (2014) Geoengineering our climate is not a 'quick fix'. (La géoingénierie de notre climat n'est pas une 'solution miracle'). Université de Leeds. Disponible sur : <https://www.leeds.ac.uk/news-environment/news/article/3631/geoengineering-our-climate-is-not-a-quick-fix>
- [7] IPCC. FAQ chapitre 4. GIEC. Disponible sur : <https://www.ipcc.ch/sr15/faq/faq-chapter-4/>
- [8] Denchak M. (2019) Greenhouse Effect 101. (Effet de serre : notions de base). NRDC. Disponible sur : <https://www.nrdc.org/stories/greenhouse-effect-101>
- [9] Geoengineering.global. Advancing the mitigation of Climate Change and Global Warming through Geoengineering education and research. (Faire progresser l'atténuation du changement climatique et du réchauffement climatique grâce à l'éducation et à la recherche en géoingénierie). Geoengineering.global. Disponible sur : <https://geoengineering.global/solar-radiation-management/>
- [10] National Research Council (2015) Climate intervention: carbon dioxide removal and reliable sequestration. (Intervention climatique : élimination du dioxyde de carbone et séquestration fiable). National Academies Press. DOI : 10.17226/18805.
- [11] Burns L. et al. (2019) Technology Factsheet Series: Solar Geoengineering. (Série de fiches techniques : Géoingénierie solaire). Belfer Center for Science and International Affairs. Harvard Kennedy School. Disponible sur : <https://www.belfercenter.org/publication/technology-factsheet-solar-geoengineering>
- [12] Shukla P. R. et al. (2022) Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (Changement climatique 2022 : Atténuation du changement climatique. Contribution du groupe de travail III au sixième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). Cambridge University Press. DOI : 10.1017/9781009157926.001.
- [13] Markusson N., Shackley S. et Evar B. (2012) The Social Dynamics of Carbon Capture and Storage: Understanding CCS Representations, Governance and Innovation. (La dynamique sociale du captage et du stockage du carbone : Comprendre les représentations, la gouvernance et l'innovation relatives au CSC). Routledge. ISBN 9781849713153
- [14] Robock A. (2020) Benefits and risks of stratospheric solar radiation management for climate intervention (geoengineering). (Avantages et risques de la gestion du rayonnement solaire stratosphérique pour l'intervention climatique (géoingénierie)). Bridge. Disponible sur : <https://www.nae.edu/19579/19582/21020/228883/22893/6/Benefits-and-Risks-of-Stratospheric-Solar-Radiation-Management-for-Climate-Intervention-Geoengineering>
- [15] Irvine P. J., Keith D. W. et Moore J. (2018) Brief communication: Understanding solar geoengineering's potential to limit sea level rise requires attention from cryosphere experts. (Brève communication : La compréhension du potentiel de la géo-ingénierie solaire pour limiter l'élévation du niveau des mers requiert l'attention des experts de la cryosphère). The Cryosphere. DOI : 10.5194/tc-12-2501-2018
- [16] Sovacool B. K. (2021) Reckless or righteous? Reviewing the sociotechnical benefits and risks of climate change geoengineering. (Imprudent ou vertueux ? Examen des avantages et des risques sociotechniques de la géo-ingénierie du changement climatique). Energy Strategy Reviews. DOI : 10.1016/j.esr.2021.100656
- [17] Low S et al. (2013) Geoengineering policy and governance issues. (Enjeux de politique et de gouvernance de la géoingénierie). In Geoengineering responses to climate change. pp. 169-191. Springer. DOI : 10.1007/978-1-4614-5770-1_8
- [18] WWF. Accord de non-utilisation de la géo-ingénierie solaire. L'approbation du WWF. Disponible sur : <https://www.solargeoeng.org/endorsements/wwf-france/>
- [19] Rochon E., Bjureby E., Johnston P. et al. (2008). False Hope Why Carbon Capture and Storage Won't save the Climate. (Faux espoir : pourquoi le captage et le stockage du carbone ne sauveront pas le climat). Green Peace. Disponible sur : <https://www.greenpeace.org/usa/wp-content/uploads/legacy/Global/usa/report/2008/5/false-hope-why-carbon-capture.pdf>

- [20] Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (2005) Rapport spécial du GIEC sur la capture et le stockage du dioxyde de carbone. Préparé par le groupe de travail III du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. p. 442 Cambridge University Press, Cambridge. Disponible sur : https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_wholereport-1.pdf
- [21] Bastin J. F. et al. (2019) The global tree restoration potential. (Le potentiel mondial de restauration des arbres). Science. 365(6448). pp. 76-79. DOI : 10.1126/science.aax0848
- [22] Santos F. M. and al (2019) Bioenergy with Carbon Capture and Storage: Using Natural Resources for Sustainable Development. (Bioénergie avec captage et stockage du carbone : Utilisation des ressources naturelles pour le développement durable). Elsevier. DOI : 10.1016/C2017-0-04413-0
- [23] Boyd P. et Vivian C. (2019) Should we fertilize oceans or seed clouds? No one knows. (Faut-il fertiliser les océans ou ensemercer les nuages ? Personne ne le sait). Nature. Disponible sur : <https://www.nature.com/articles/d41586-019-01790-7>
- [24] Site internet Vesta. Disponible sur : <https://www.vesta.earth/>
- [25] Chow C. (2020) Enhanced Weathering for Carbon Capture. (Météorisation augmentée pour le captage du carbone). Earth Org. Disponible sur : <https://earth.org/enhanced-weathering-for-carbon-capture/>
- [26] Energy capital the magazine (2021) Orca, biggest CO₂ Direct Air Capture plant starts operations in Iceland. (Orca, la plus grande installation de captage direct de CO₂ dans l'air, commence à fonctionner en Islande). Energy capital the magazine. Disponible sur : <https://energycapitalmedia.com/2021/09/08/orca-biggest-co2-direct-air-capture-plant-starts-operations-in-iceland/>
- [27] Centrale électrique de Drax. Site internet de Drax. Disponible sur : <https://www.drax.com/about-us/our-sites-and-businesses/drax-power-station/>
- [28] SCoPEX : Stratospheric Controlled Perturbation Experiment. (Expérience de perturbation stratosphérique contrôlée). Keutschgroup at Harvard. Disponible sur : <https://www.keutschgroup.com/scopex>
- [29] Dongying, Chine : Growing Forests in Saline Soil (Faire pousser des forêts dans un sol salin) (2017) La Banque mondiale. Disponible sur : <https://www.worldbank.org/en/news/video/2017/07/26/dongying-china-growing-forests-in-saline-soil>
- [30] Tollefson J. (2021) Can artificially altered clouds save the Great Barrier Reef? (Les nuages artificiellement modifiés peuvent-ils sauver la Grande Barrière de corail ?) Nature. DOI : 10.1038/d41586-021-02290-3
- [31] Total (2021) Total and Forêt Ressources Management to Plant a 40,000-Hectare Forest in the Republic of the Congo. (Total et Forêt Ressources Management vont planter une forêt de 40 000 hectares en République du Congo). Total. Disponible sur : <https://totalenergies.com/media/news/press-releases/total-and-frm-to-plant-forest-in-congo>

SOLUTIONS FONDÉES SUR LA NATURE

- [1] Fuss S. et al. (2018) Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects. (Émissions négatives - Partie 2 : Coûts, potentiels et effets secondaires). Environ. Res. Lett. DOI : 10.1088/1748-9326/aabf9f
- [2] Shukla P. R. et al. (2022) Summary for Policymakers. In: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC. (Résumé pour les décideurs politiques. In : Changement climatique 2022 : Atténuation du changement climatique. Contribution du groupe de travail III à la sixième évaluation. Rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. GIEC). DOI : 10.1017/9781009157926.001.
- [3] Lenton T. M. et Vaughan N. E. (2009) The radiative forcing potential of different climate geoengineering options. (Le potentiel de forçage radiatif des différentes options de géoingénierie climatique). Atmos Chem Phys. DOI :10.5194/acp-9-5539-2009
- [4] Université de Leeds (2014) Geoengineering our climate is not a 'quick fix'. (La géoingénierie de notre climat n'est pas une 'solution miracle'). Université de Leeds. Disponible sur : <https://www.leeds.ac.uk/news-environment/news/article/3631/geoengineering-our-climate-is-not-a-quick-fix>

- [5] Climatologie (2022) Afforestation vs reforestation. (Boisement vs Reboisement). Climate science. Disponible sur : <https://climatescience.org/advanced-reforestation-afforestation-tree-planting>
- [6] Kippar K. (2022) Reforestation lending a helping hand to our planet. (Le reboisement au service de notre planète). Make it neutral. Disponible sur : <https://makeitneutral.com/reforestation/>
- [7] Lewis S. et al. (2019) Regenerate natural forests is the best way to remove atmospheric carbon. (Régénérer les forêts naturelles est le meilleur moyen de supprimer le carbone atmosphérique). Nature. Disponible sur : <https://www.nature.com/articles/d41586-019-01026-8>
- [8] ENGIE (2022) AXA IM Alts, ENGIE and The Shared Wood Company join forces to develop nature-based solutions projects at scale. (AXA IM Alts, ENGIE et The Shared Wood Company unissent leurs forces pour développer des projets à grande échelle de solutions fondées sur la nature). ENGIE. Disponible sur : <https://gems.engie.com/business-news/axa-im-alt-enge-and-the-shared-wood-company-join-forces-to-develop-nature-based-solutions-projects-at-scale/>
- [9] TotalEnergies (2022) Gabon : TotalEnergies and Compagnie des Bois du Gabon Join Forces to Develop a New Forest Management Model Combining Wood Production and Carbon Sink. (TotalEnergies et la Compagnie des Bois du Gabon s'associent pour développer un nouveau modèle de gestion forestière associant production de bois et puits de carbone). TotalEnergies. Disponible sur : <https://totalenergies.com/media/news/press-releases/gabon-totalenergies-and-compagnie-des-bois-du-gabon-join-forces-develop>
- [10] Net Zero (2021) Whole Life Carbon Roadmap: A Pathway for the UK Built Environment. (Feuille de route pour l'environnement bâti : zéro émission de carbone sur toute la durée de vie du bâtiment) UK Green Building Council. Disponible sur : <https://ukgbc.s3.eu-west-2.amazonaws.com/wp-content/uploads/2021/11/28194152/UKGBC-Whole-Life-Carbon-Roadmap-A-Pathway-to-Net-Zero.pdf>
- [11] de Coninck H. (2022) Global Warming of 1.5°C. Strengthening and Implementing the Global Response. (Réchauffement climatique de 1,5 °C. Renforcement et mise en œuvre de la réponse mondiale). Un rapport spécial du GIEC sur les impacts du réchauffement climatique de 1,5°C au-dessus des niveaux préindustriels et les voies d'émission de gaz à effet de serre mondiales connexes, dans le contexte du renforcement de la réponse mondiale à la menace du changement climatique, du développement durable et des efforts pour éradiquer la pauvreté. Cambridge University Press. pp. 313-444. DOI : 10.1017/9781009157940.006
- [12] Raynal J. (2022) Le biochar, ce nouvel or noir pour le climat qui fait rêver les industriels de la décarbonation. La tribune. Disponible sur : <https://www.latribune.fr/>
- [13] Site internet de Pyreg. Disponible sur : <https://pyreg.com/our-technology/>
- [14] IEA (2022) Bioenergy with Carbon Capture and Storage. (Bioénergie avec captage et stockage du carbone). AIE. Disponible sur : <https://www.iea.org/reports/bioenergy-with-carbon-capture-and-storage>
- [15] Budinis S. (2020) Going carbon negative: What are the technology options?. (Vers la neutralité carbone : quelles sont les options technologiques ?) AIE. Disponible sur : <https://www.iea.org/commentaries/going-carbon-negative-what-are-the-technology-options>
- [16] Sutton-Grier A. E. et al. (2014) Incorporating ecosystem services into the implementation of existing U.S. natural resource management regulations: Operationalizing carbon sequestration and storage. (Incorporation des services écosystémiques dans la mise en œuvre des réglementations américaines existantes en matière de gestion des ressources naturelles : la mise en œuvre de la séquestration et du stockage du carbone). Marine Policy. pp. 246-253. DOI : 10.1016/j.marpol.2013.06.003
- [17] Bertram C. et al. (2021) The blue carbon wealth of nations. (La richesse des nations en carbone bleu). Nat. Clim. Chang. pp. 704-709. DOI : 10.1038/s41558-021-01089-4
- [18] The Nature Conservancy (2016) Mapping ocean wealth. (Cartographie des richesses océaniques). The Nature Conservancy. Disponible sur : https://oceanwealth.org/wp-content/uploads/2016/06/BlueCarbon_InfoGraph.png
- [20] Naylor D., Sadler D. and Bhattacharjee A. (2020) Soil Microbiomes Under Climate Change and Implications for Carbon Cycling. Annual Review of Environment and Resources. (Microbiomes du sol sous le changement climatique et implications pour le cycle du carbone. Revue annuelle de l'environnement et des ressources). DOI : 10.1146/annurev-environ-012320-082720

- [21] Griscom B. W. et al. (2017) Natural climate solutions. Proceedings of the National Academy of Sciences (Solutions climatiques naturelles. Actes de l'Académie nationale des sciences). Vol. 114. No. 44. DOI : 10.1073/pnas.1710465114
- [22] Griscom B. W. et al. (2019) We need both natural and energy solutions to stabilize our climate. (Nous avons besoin de solutions fondées sur la nature et énergétiques pour stabiliser notre climat). Glob Change Biol. pp. 1889-1890. DOI : 10.1111/gcb.14612

ÉNERGIE SOLAIRE SPATIALE

- [1] Frazer Nash (2021) Report Space Based Solar Power – Dérisking the pathway to Net Zero. (Rapport de Frazer Nash (2021) énergie solaire depuis l'espace - Supprimer les risques de cette voie vers la neutralité carbone) Frazer-Nash Consultancy. Disponible sur : <https://www.fnc.co.uk/media/e15ing0q/frazer-nash-sbsp-executive-summary-final.pdf>
- [2] Solteau M (2021) Space Solar Power – the UK Study and the Space Energy Initiative. ESA Space Based Solar Power for Net Zero 2050 Workshop 2021. (L'énergie solaire spatiale - L'étude britannique et l'initiative sur l'énergie spatiale. Atelier sur l'énergie solaire spatiale pour atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050). Webex. 9-10 décembre 2021. ESA ESTEC. Disponible sur : <https://indico.esa.int/event/399/>
- [3] Mankins J C (2021) SPS-ALPHA and the Economics of Space Solar Power, Initiative. ESA Space-Based Solar Power for Net Zero 2050 Workshop 2021. (Atelier sur l'énergie solaire spatiale pour atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050). Webex. 9-10 décembre 2021. ESA ESTEC. Disponible sur : <https://indico.esa.int/event/399/>
- [4] Baycan S (2021) Space Solar Power - The Australian Context, International workshop on Space-Based Solar Power for Net-Zero, ESA Space Based Solar Power for Net Zero 2050 Workshop 2021. (Atelier sur l'énergie solaire spatiale pour atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050). Webex. 9-10 décembre 2021. ESA ESTEC. Disponible sur : <https://indico.esa.int/event/399/>
- [5] Ian Cash M (2021) CASSIOPEIA SPS, Space Based Solar Power for Net Zero, ESA Space Based Solar Power for Net Zero 2050 Workshop 2021. (L'énergie solaire dans l'espace pour le Net Zéro, in Atelier sur l'énergie solaire spatiale pour atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050). Webex. 9-10 décembre 2021. ESA ESTEC. Disponible sur : <https://indico.esa.int/event/399/>
- [6] HOU X et Li M (2021) Activities of SPS Development in China, ESA Space Based Solar Power for Net Zero 2050 Workshop 2021. (Activités de développement des satellites à énergie solaire en Chine, in Atelier sur l'énergie solaire spatiale pour atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050). Webex. 9-10 décembre 2021. ESA ESTEC. Disponible sur : <https://indico.esa.int/event/399/>
- [7] Tanaka K (2021) Efforts to develop solar power satellite in Japan over the past 10 years. ESA Space Based Solar Power for Net Zero 2050 Workshop 2021. (Efforts de développement de l'énergie solaire par satellite au Japon au cours des 10 dernières années, in Atelier sur l'énergie solaire spatiale pour atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050). Webex. 9-10 décembre 2021. ESA ESTEC. Disponible sur : <https://indico.esa.int/event/399/>
- [8] Choi J M (2021) Net Zero Scenario and Status of Space Based Solar Power, Research in Korea. ESA Space Based Solar Power for Net Zero 2050 Workshop 2021. (Scénario de neutralité carbone et situation de l'énergie solaire spatiale, Recherche en Corée, in Atelier sur l'énergie solaire spatiale pour atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050). Webex. 9-10 décembre 2021. ESA ESTEC. Disponible sur : <https://indico.esa.int/event/399/>
- [9] Greenmatch (2020) Space-Based Solar Power: The Future Source of Energy?. (L'énergie solaire dans l'espace : la future source d'énergie ?) 12 juillet 2022. Disponible sur : <https://www.greenmatch.co.uk/blog/2020/02/space-based-solar-power>
- [10] Radulovic J (2022) A solar power station in space? Here's how it would work – and the benefits it could bring. (Une centrale solaire dans l'espace ? Voici comment elle fonctionnerait - et les avantages qu'elle pourrait apporter). The conversation. Disponible sur : <https://theconversation.com/a-solar-power-station-in-space-heres-how-it-would-work-and-the-benefits-it-could-bring-179344>
- [11] Makaya A (2021) Clean Energy - New Ideas for Solar Power from Space, Summary of ESA OSIP Campaign, ESA Space Based Solar Power for Net Zero 2050 Workshop 2021. (De nouvelles idées pour l'énergie solaire depuis l'espace, in Atelier sur l'énergie solaire spatiale pour atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050). Webex. 9-10 décembre 2021. ESA ESTEC. Disponible sur : <https://indico.esa.int/event/399/>

L'HYDROGÈNE TURQUOISE PAR PYROLYSE ?

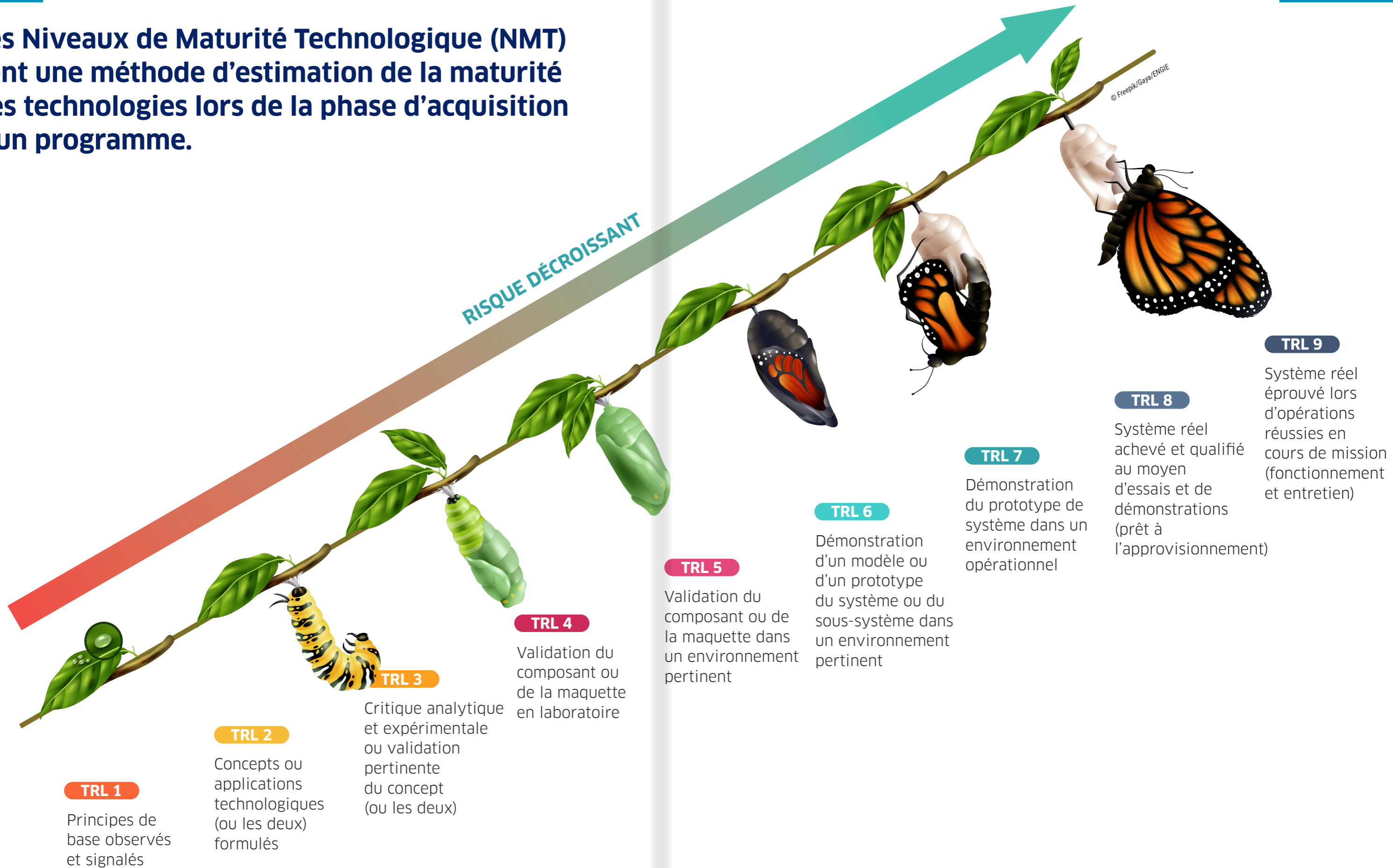
- [1] Diab J. et al. (2022) Why turquoise hydrogen will be a game changer for the energy transition. (Pourquoi l'hydrogène turquoise va changer la donne pour la transition énergétique). International Journal of Hydrogen Energ. DOI : 10.1016/j.ijhydene.2022.05.299
- [2] Internal source / Baraton L. (2021) TPP Hydrogen Production. (Production d'hydrogène par TPP) ENGIE. Disponible sur : https://engie.sharepoint.com/sites/ExpertCentre/TPP/SiteAssets/TPP_H2_Production_2021-12-24_Version_finale.pdf
- [3] Mann D. (2022) Methane pyrolysis: An alternative route to low-carbon hydrogen production. (Pyrolyse du méthane : Une voie alternative pour la production d'hydrogène à faible teneur en carbone). IHS Markit. Disponible sur : <https://connect.ihsmarkit.com/document/show/phoenix/4475642?connectPath=Search&searchSessionId=d70ca5e0-6c2f-4304-9435-16f42cb27817>
- [4] Monolith brochure (2021) Monolith Materials inc. Available at: <https://monolith-corp.com/storage/documents/Corporate-Brochure-LoRes.pdf>
- [5] McFarland E. et al. (2019) H₂ Focus Programs of C-Zero. Methane Pyrolysis Cohort. (Programmes de C-Zero consacrés à l'H₂. Cohorte sur la pyrolyse du méthane). 10 décembre 2019. Houston. Texas. Disponible sur : https://arpa-e.energy.gov/sites/default/files/9%2010%20H2%20Performers%20C-Zero_Comprsed.pdf
- [6] Daloz W. et al. (2019) The quest for CO₂-free hydrogen - methane pyrolysis at scale Methane Pyrolysis Cohort. (La quête d'une pyrolyse du méthane et de l'hydrogène sans CO₂ à l'échelle, Cohorte sur la pyrolyse du méthane). 10 décembre 2019. Houston. Texas. Disponible sur : <https://arpa-e.energy.gov/sites/default/files/1%20Scale%20up%20BASF.pdf>
- [7] Lentech. Activated Carbon. (Charbon actif). Lentech. Disponible sur : <https://www.lentech.com/products/activated-carbon.html>
- [8] Von Keitz M. (2019) ARPA-E/DOE Methane Pyrolysis Cohort Kickoff. (Lancement de la cohorte sur la pyrolyse du méthane). Cohorte sur la pyrolyse du méthane. 9 décembre 2019. Houston. Texas. Disponible sur : <https://arpa-e.energy.gov/sites/default/files/1%20Marc%20Von%20Keitz..pdf>
- [9] Fulcheri L. (2022) Turquoise hydrogen takes a step towards the next level. (L'hydrogène turquoise fait un pas vers le niveau supérieur). Polytechnic insights. Disponible sur : <https://www.polytechnique-insights.com/en/columns/energy/turquoise-hydrogen-takes-a-step-towards-the-next-level/>
- [10] Mesrobian C. (2019) Taking Methane Pyrolysis from Concept to Industrial Plant. (La pyrolyse du méthane : du concept à l'installation industrielle). Cohorte sur la pyrolyse du méthane. 9 décembre 2019. Houston. Texas. Disponible sur : https://arpa-e.energy.gov/sites/default/files/2021-01/08%200K%20-Monolith_ARPAE_MethanePyrolysis2021_v3.pdf
- [11] Saadi F. (2022) Pyrolyse du méthane : produire de l'hydrogène sans émissions de carbone, Programmes de C-Zero consacrés à l'H₂. Cohorte sur la pyrolyse du méthane. Webex. 12 janvier 2022. <https://arpa-e.energy.gov/sites/default/files/2022-01/7x%20-%20CZero%20ARPA-E%20Annual%20Meeting%202022.pdf>
- [12] C-Zero (2019) C-Zero Announces Project with SoCalGas and PG&E. (C-Zero annonce un projet avec SoCalGas et PG&E). C-Zero. Disponible sur : <https://www.czero.energy/post/c-zero-announces-project-with-socialgas-and-pg-e>
- [13] Site internet Materia Nova. Disponible sur : <https://www.materianova.be/fr/>
- [14] Site internet Hiirc. Disponible sur : <https://hiirc.com/>
- [15] Université Paris Saclay (2021) SPARK : Réduire les émissions de CO₂ et décentraliser la production. Université Paris Saclay. Disponible sur : <https://www.universite-paris-saclay.fr/actualites/spark-reduire-les-emissions-de-co2-et-decentraliser-la-production-dhydrogene>
- [16] Site internet de Plenesys. Disponible sur : <https://plenesys.com/fr/>
- [17] Site internet de Sakowin. Disponible sur : <https://sakowin.com/>
- [18] Site internet TNO. Disponible sur : <https://www.tno.nl/en/>
- [19] Site internet du groupe Hazer. Disponible sur : <https://hazergroup.com>

- [20] Zohaib A. (2022) Burrard Hazer hydrogen project secures funding. (Le projet hydrogène Burrard Hazer obtient un financement). H₂ Bulletin. Disponible sur : <https://www.h2bulletin.com/burrard-hazer-hydrogen-project-secures-funding/>
- [21] Petersen J. B. (2022) New project will design first Danish reactor for carbon negative hydrogen production from biogas. (Un nouveau projet permettra de concevoir le premier réacteur danois pour la production d'hydrogène à bilan carbone négatif à partir de biogaz). Université d'Aarhus. Disponible sur : <https://bce.au.dk/en/currently/news/show/artikel/ny-teknologi-giver-co2-negativ-brintproduktion-fra-biogaz>
- [22] BASF (2022) BASF, SABIC and Linde start construction of the world's first demonstration plant for large-scale electrically heated steam cracker furnaces. (BASF, SABIC et Linde lancent la construction de la première usine de démonstration au monde de fours à vapeur chauffés électriquement à grande échelle). BASF. Disponible sur : <https://www.basf.com/global/en/who-we-are/sustainability/whats-new/sustainability-news/2022/basf-sabic-and-linde-start-construction-of-the-worlds-first-demonstration-plant-for-large-scale-electrically-heated-steam-cracker-furnaces.html>

PRODUCTION DE CARBURANTS SOLAIRES INDUITE PAR LA LUMIÈRE

- [1] Jensen K., Jensen P.E. et Moller B.L. (2012) Light-driven chemical synthesis. (Synthèse chimique induite par la lumière du soleil) Trends in plant science. pp. 60-63. DOI : 10.1016/j.tplants.2011.12.008
- [2] Office of Science. DOE Explains... Solar Fuels. (Le ministère américain de l'énergie explique... les carburants solaires). Office of science. Disponible sur : <https://www.energy.gov/science/doe-explainssolar-fuels>
- [3] Internal source / Baraton L. (2021) TPP Hydrogen Production. (Production d'hydrogène par TPP) ENGIE. Disponible sur : https://engie.sharepoint.com/sites/ExpertCentre/TPP/SiteAssets/TPP_H2_Production_2021-12-24_Version_finale.pdf
- [4] Which global cities have the highest population densities? (Quelles sont les villes les plus densément peuplées dans le monde ?) (2019) enterprise the state of the nation. Disponible sur : <https://enterprise.press/stories/2019/03/20/which-global-cities-have-the-highest-population-densities/>
- [5] Site internet Sunergy. Disponible sur : <https://sunergy-initiative.eu/>
- [6] Site internet Condor. Disponible sur : <https://condor-h2020.eu/>
- [7] Site internet Sun to X. Disponible sur : <https://sun-to-x.eu/project-partners/>
- [8] Panasonic Corporation (2022) Panasonic to Begin Operating H₂ KIBOU FIELD Demonstration Facility Utilizing Pure Hydrogen Fuel Cell Generators. (Panasonic va lancer l'exploitation de l'installation de démonstration H₂ KIBOU FIELD utilisant des générateurs à pile à combustible à hydrogène pur). Panasonic Corporation. Disponible sur : <https://news.panasonic.com/global/press/en220427-1>
- [9] Siemens (2022) Siemens commissions one of Germany's largest green hydrogen generation. (Siemens commande l'une des plus grandes générations d'hydrogène vert d'Allemagne). Siemens AG. Disponible sur : <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/siemens-commissions-one-germanys-largest-green-hydrogen-generation-plants>
- [10] KU Leuven (2019) KU Leuven scientists crack the code for affordable, eco-friendly hydrogen gas. (Les scientifiques de la KU Leuven décryptent le code du gaz hydrogène abordable et écologique). KU Leuven. Disponible sur : <https://nieuws.kuleuven.be/en/content/2019/belgian-scientists-crack-the-code-for-affordable-eco-friendly-hydrogen-gas>
- [11] Site internet Empa. Disponible sur : <https://www.empa.ch>
- [12] ETH Zurich. Page d'accueil de l'électrochimie. ETH Zurich. Disponible sur : <https://electrochemistry.ethz.ch/>
- [13] Site internet Fusion fuel. Disponible sur : <https://www.fusion-fuel.eu/>
- [14] Site internet Sunergyse. Disponible sur : <https://sunergyze.com/en/>
- [15] Site internet Hydeal Ambition. Disponible sur : <https://www.hydeal.com>
- [16] Site Internet dédié à l'hydrogène solaire. Disponible sur : <https://www.sunhydrogen.com/technology>
- [17] Site internet Syzygy. Disponible sur : <https://plasmonics.tech/photoreactor-technology>

Les Niveaux de Maturité Technologique (NMT) sont une méthode d'estimation de la maturité des technologies lors de la phase d'acquisition d'un programme.



RECHERCHE ET INNOVATION

1, place Samuel de Champlain - Faubourg de l'Arche
92930 Paris La Défense Cedex - France

engie.com/front-tag/recherche-et-innovation

Contacts :

elodie.lecadre@engie.com, jan.mertens@engie.com



engie.com