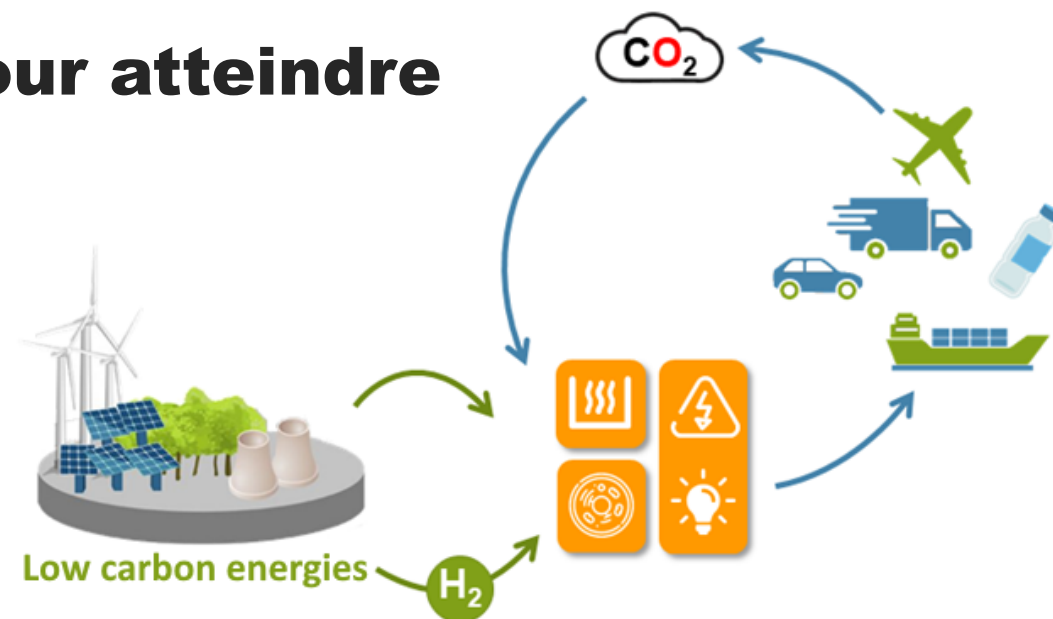


DÉVELOPPEMENT DES FILIÈRES BAS-CARBONE : L'EXEMPLE DE L'AÉRONAUTIQUE

L'économie circulaire du carbone pour atteindre le Net Zero 2050

Claire Gauthier
Chef du Programme Economie Circulaire du Carbone

Direction des Energies / Direction des Programmes Energies





1 ■ Contexte

Les molécules carbonées sont au cœur de notre système énergétique

La place des molécules carbonées dans le système énergétique mondial

Consommation d'énergie primaire dans le monde : ~80% d'énergies fossiles, qui émettent ~38 Gt CO₂ chaque année.

Les chiffres clés du climat 2024

Scénario IEA Net Zero by 2050 :

- Les 2/3 de l'énergie utilisée proviendront de renouvelables en 2050
- Energie nucléaire (x2)
- Energies fossiles < 20% (18%)

3 leviers pour atteindre la neutralité carbone en 2050 :

- La **sobriété**
- L'**efficacité énergétique** (bâtiments, moteurs, machines, ...)
- La substitution des énergies fossiles par des **énergies bas carbone** (renouvelables et nucléaire)

❑ Electrification



❑ Stockage

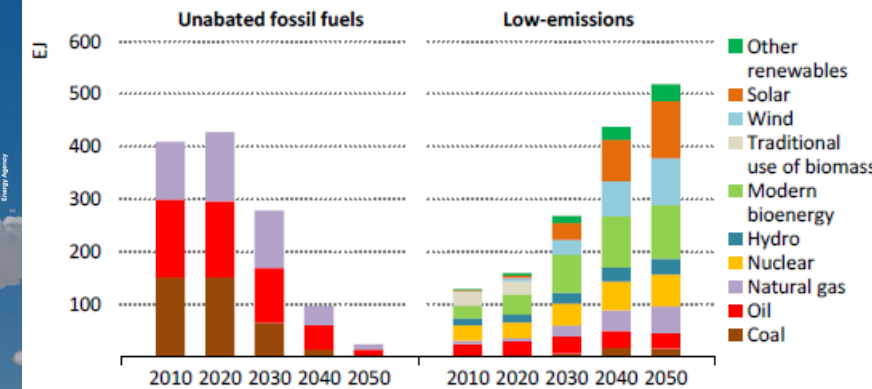


❑ Flexibilité ...



Energie primaire	Monde	UE 27	France
Total	172 119 TWh	15 662 TWh	2 523 TWh
Fossiles	81%	68%	48%
Renouvelables	15%	22%	17%
Nucléaire	4%	10%	35%

Emissions GES	World	EU 27	France
Total	53 800 Mt	3 400 Mt	373 Mt
dont CO ₂	70%	74%	79%



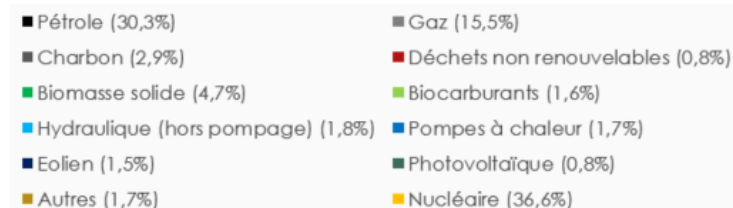
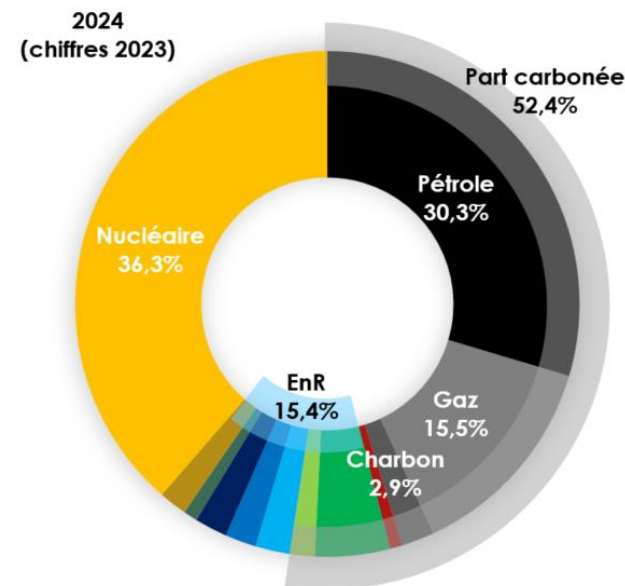
Les molécules carbonées sont au cœur de notre système énergétique

Décarbonation et défossilisation

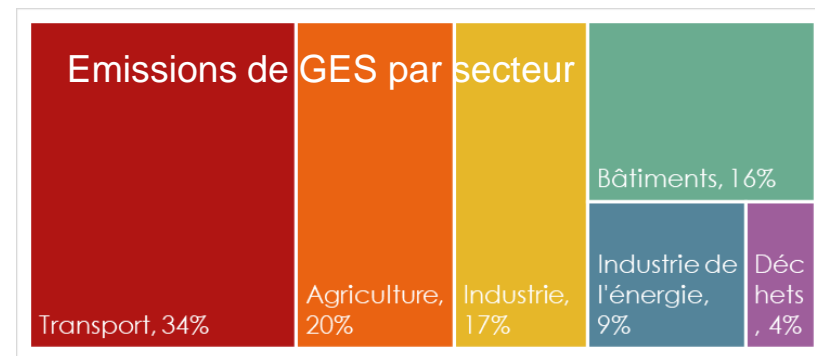
Les alternatives sans carbone (électrification, hydrogène, batteries, ...) ne peuvent pas se substituer à tous les usages actuels des molécules carbonées. C'est le cas notamment :

- Des **carburants liquides** pour le transport longue distance :
 - ❑ Secteur des transports en France : 34% des émissions de CO₂ éq dont **Aérien : ~4% ; Maritime : ~2%**
- De la production de **molécules pour la chimie** : plastiques, engrais, solvants, ...
 - ❑ **10% des produits pétroliers** sont transformés en molécules pour la chimie (coproduits)
 - ❑ Les **plastiques** constituent la majorité de ces coproduits (**80% en volume**), mais on a également les engrais, solvants, additifs, ...
- Dans une moindre mesure : de la **production d'énergie et/ou de chaleur pour l'industrie**
 - ❑ Secteur industriel en France : 17% des émissions de CO₂ éq

➔ **Economie Circulaire du Carbone pour « défossiliser »**



Les chiffres clés de l'énergie 2024



Les chiffres clés du climat 2024

24/06/2025

L'économie circulaire du carbone au rang des leviers clés

Rapport du GIEC (2022) : *“There is growing interest in “circular bioeconomy” concepts applied to bio-based materials and even a “circular carbon economy”, wherein carbon captured via CCU or CDR is converted into reusable materials ...”*

Communication de la Commission Européenne (2024) : *“Capturing CO2 and recycling it to produce advanced synthetic fuels, chemicals, polymers or minerals is another important and innovative aspect of an industrial carbon management value chain. It also contributes to the circular economy model ...”*

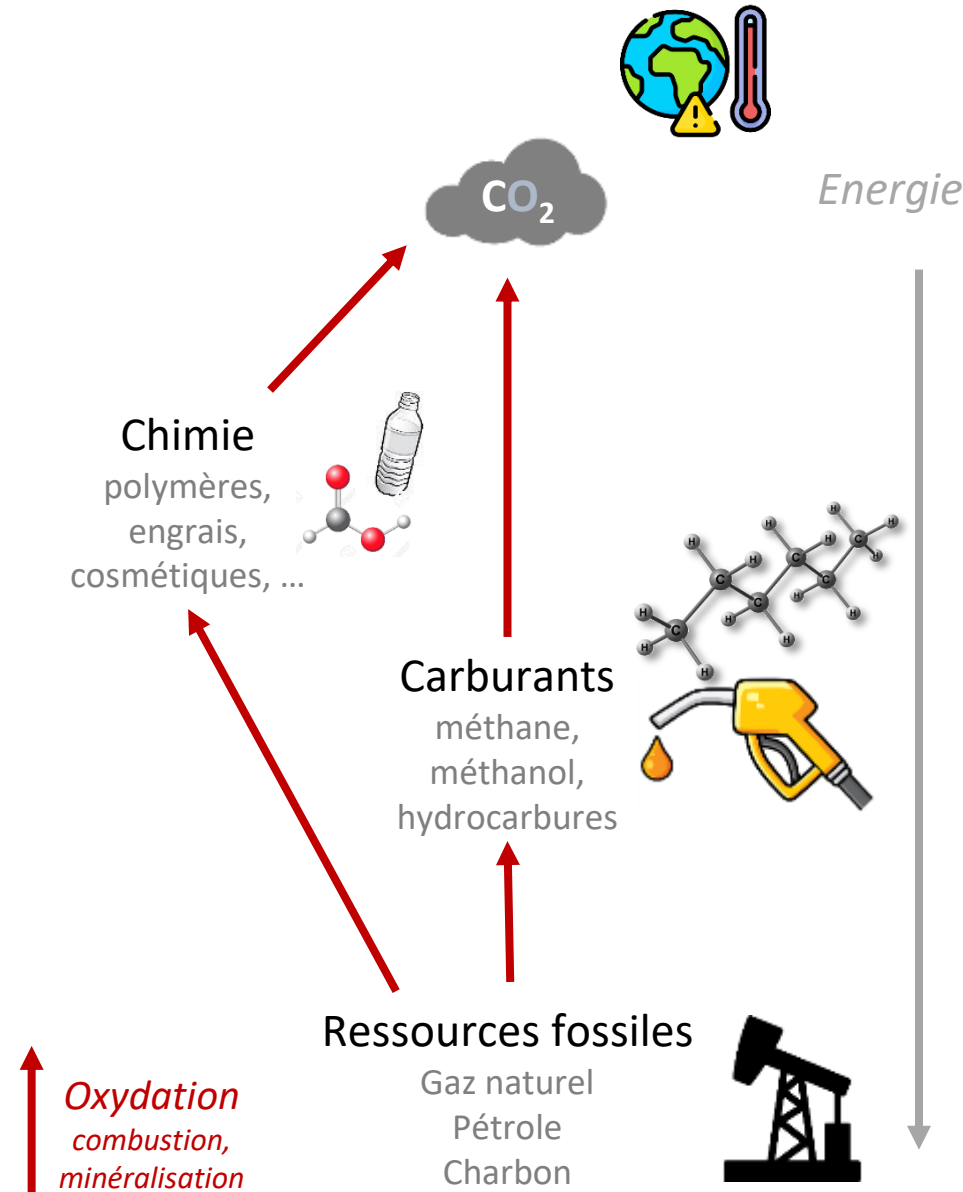
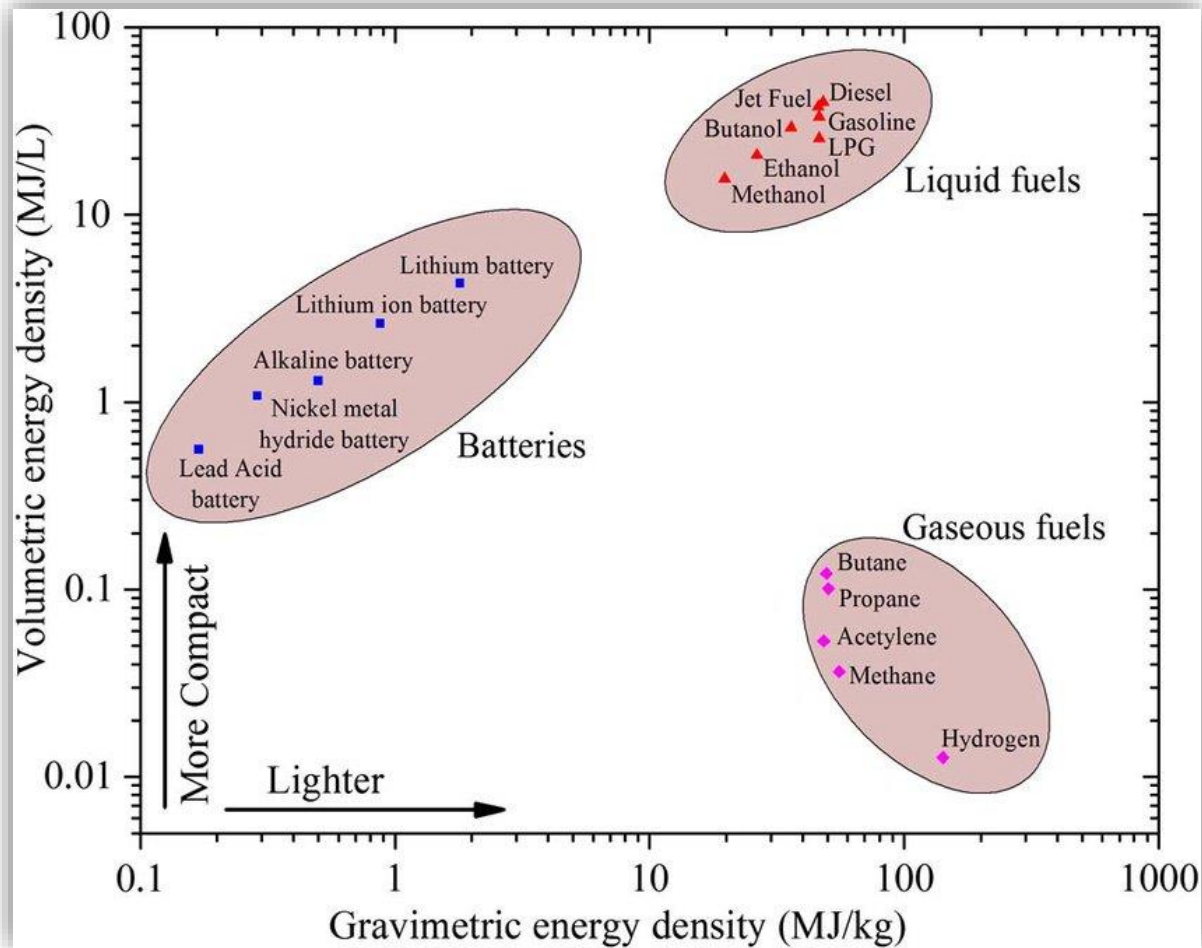
Rapport Draghi (2024) : *“The second key goal is to accelerate decarbonisation in a cost-efficient way, leveraging all available solutions through a technology-neutral approach. This approach should include renewables, nuclear, hydrogen, bioenergy and carbon capture, utilisation and storage, ...”*



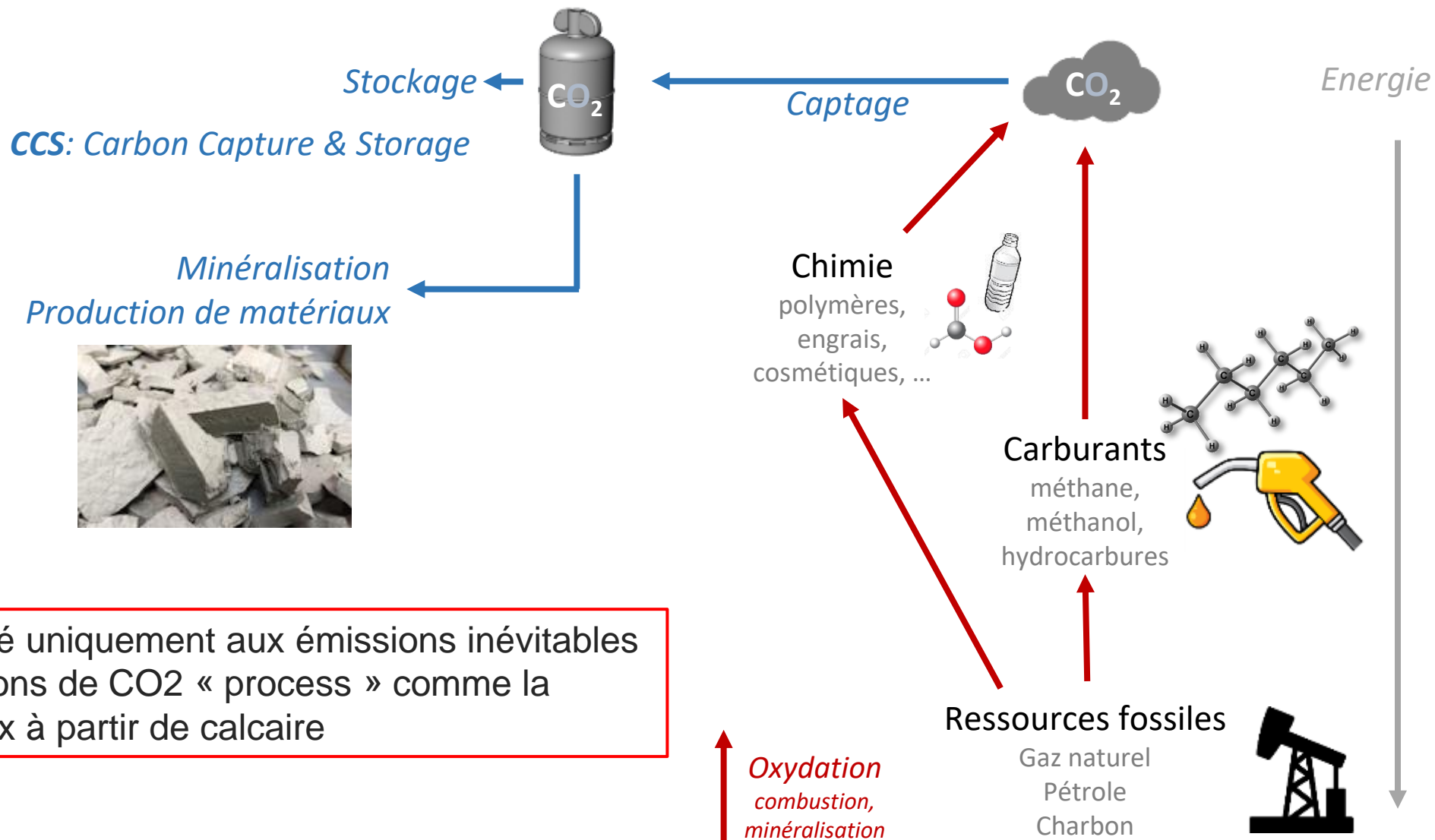


2 ■ L'économie circulaire du carbone

Une économie linéaire du carbone ...

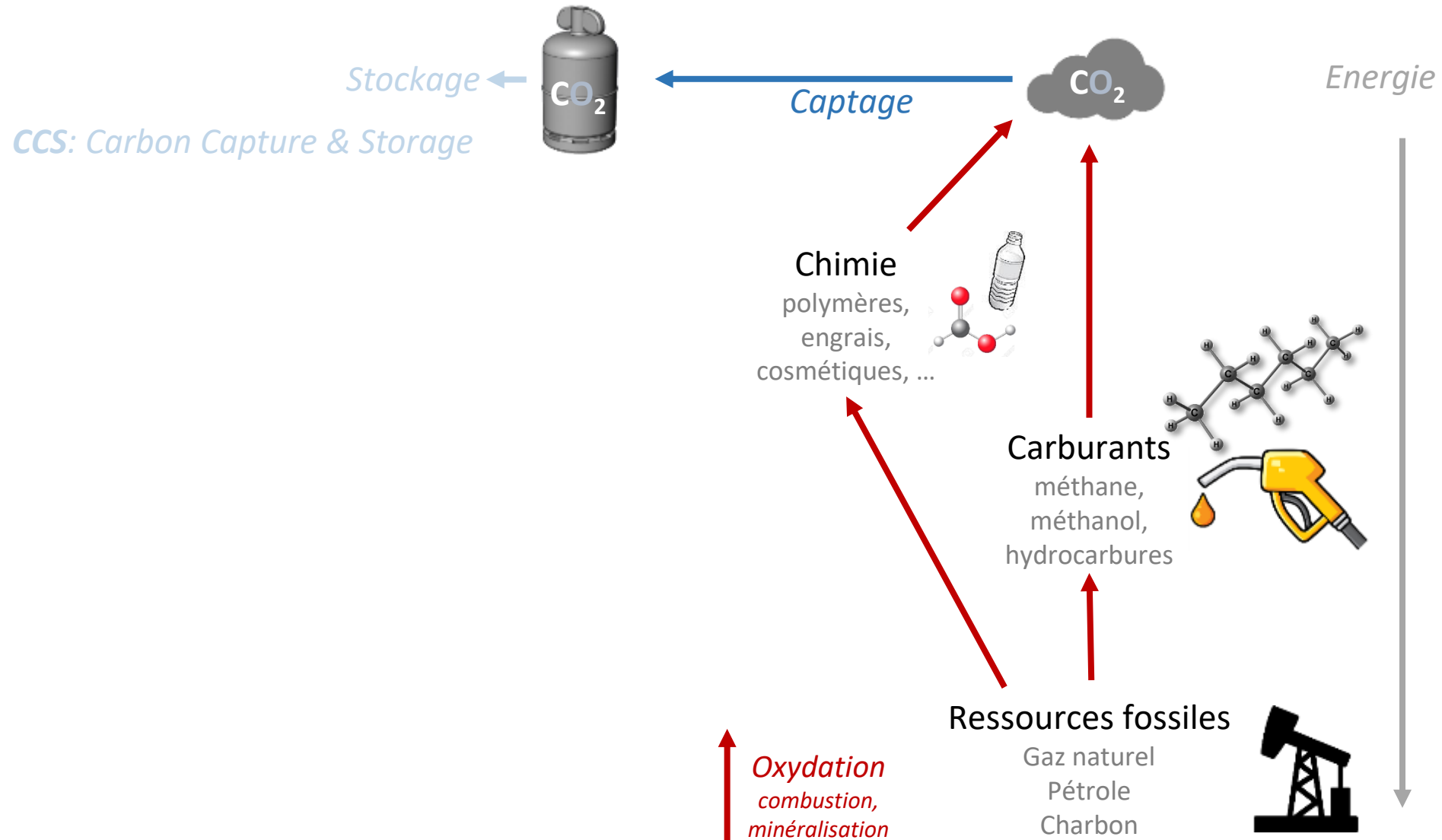


Une économie linéaire du carbone complétée par le captage et stockage du CO₂ ?



A terme : CCS réservé uniquement aux émissions inévitables
Par exemple : émissions de CO₂ « process » comme la fabrication de la chaux à partir de calcaire

Vers une économie circulaire du carbone



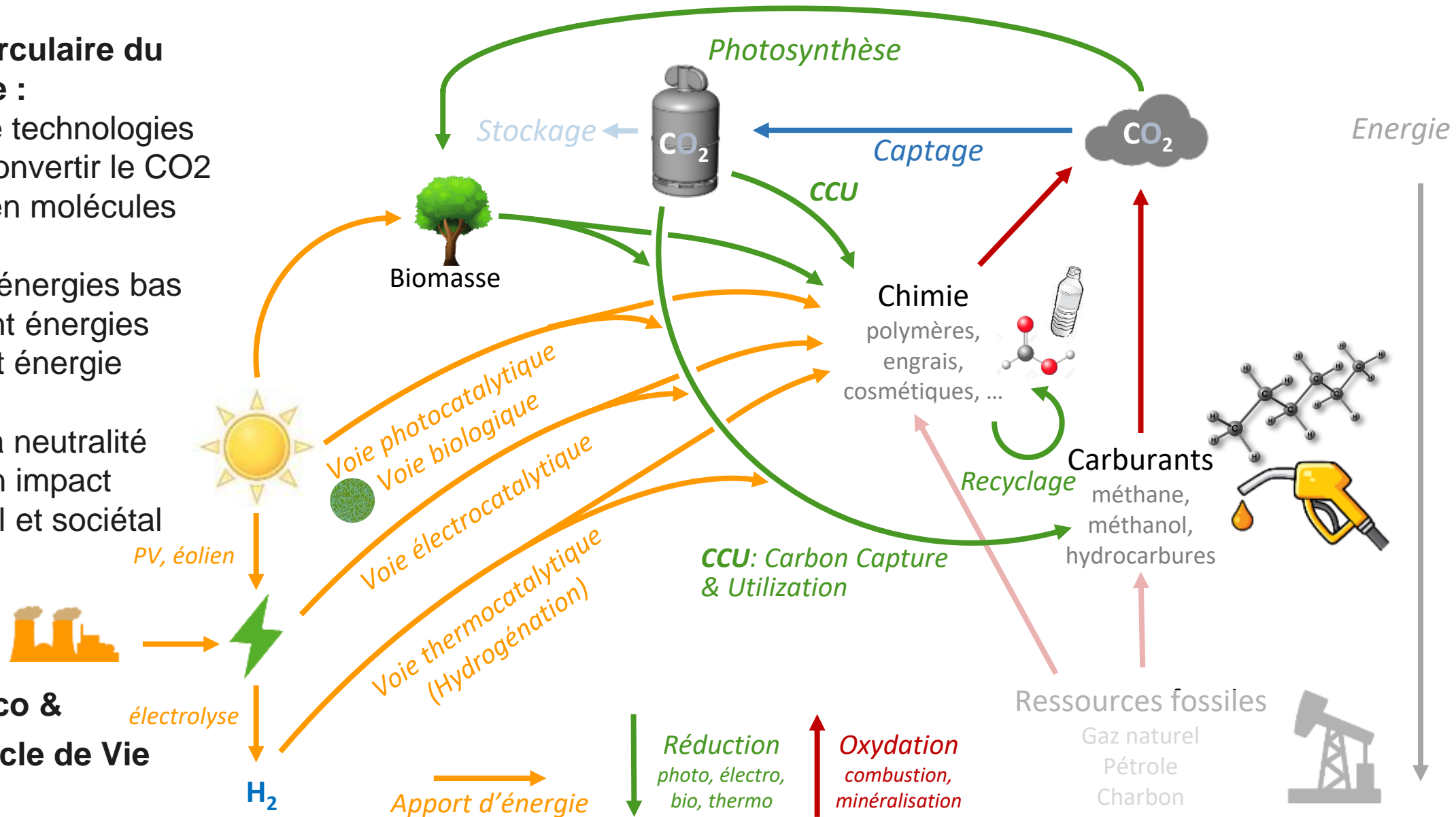
Vers une économie circulaire du carbone



Une économie circulaire du carbone implique :

- Un ensemble de technologies permettant de convertir le CO₂ et la biomasse en molécules d'intérêt,
- En utilisant des énergies bas carbone (incluant énergies renouvelables et énergie nucléaire),
- Pour atteindre la neutralité carbone avec un impact environnemental et sociétal positif.

⇒ Etudes tech-éco & Analyse du Cycle de Vie

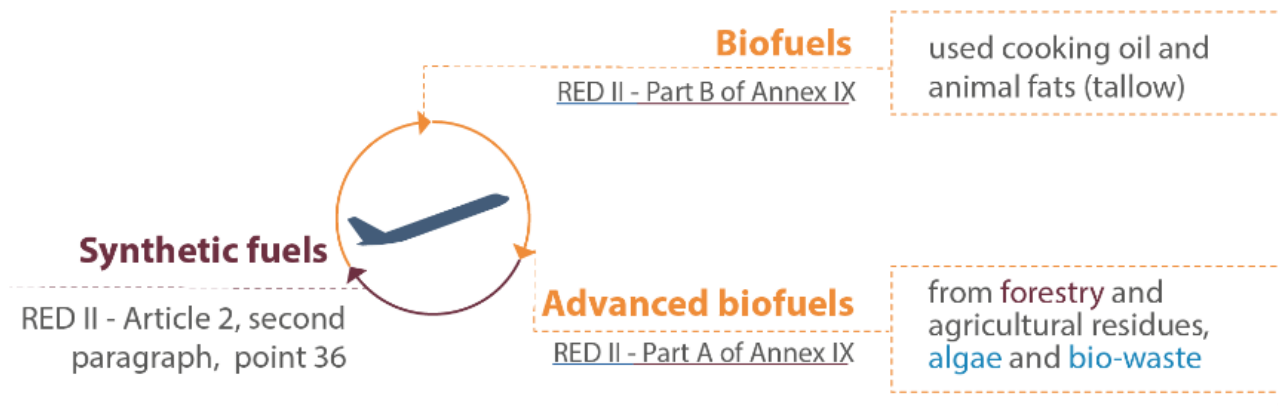
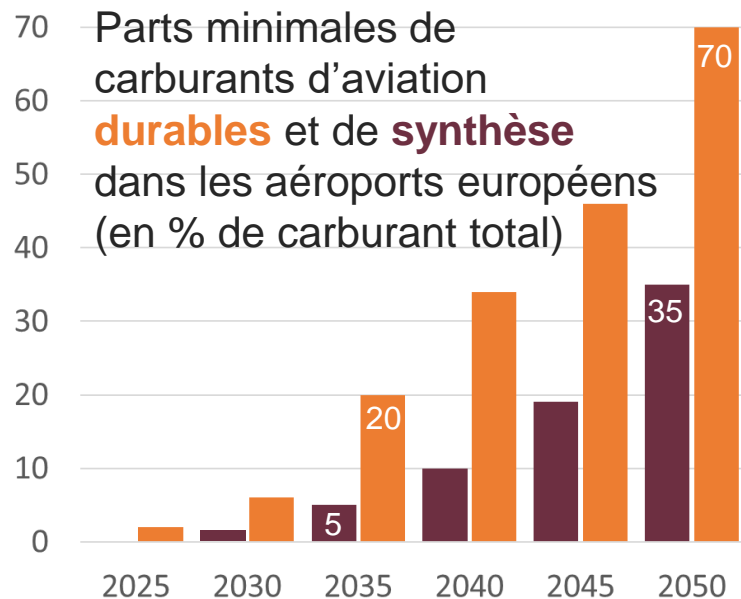


Une “raison d’être” portée par l’Europe

La réglementation européenne Fit-for-55 donne la trajectoire



➤ Pour l’aviation → ReFuelEU



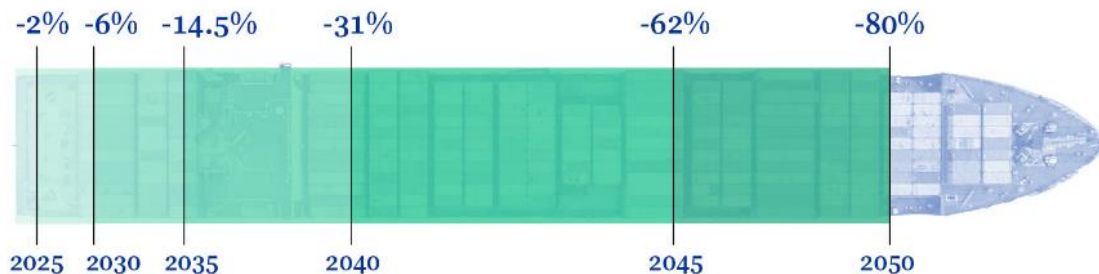
Source: Sustainable aviation fuels, EPRS, March 2022.

➤ Pour le maritime et le fluvial → FuelEU

Les navires de plus de 5000 t faisant escale dans les ports européens devront :

- ✓ réduire leurs niveaux de GES émis par l’énergie utilisée à bord,
- ✓ utiliser a minima 2% de carburants renouvelables en 2034 au plus tard.

Annual average carbon intensity reduction compared to the average in 2020



➤ Pour la chimie : réglementation attendue d’ici fin 2025

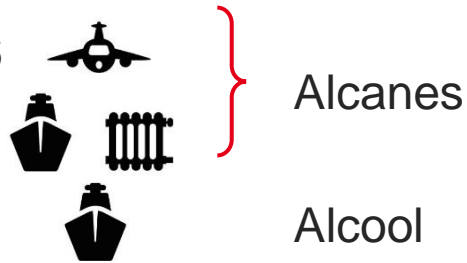


3 ■ En pratique

Un peu de chimie pour comprendre les e-fuels

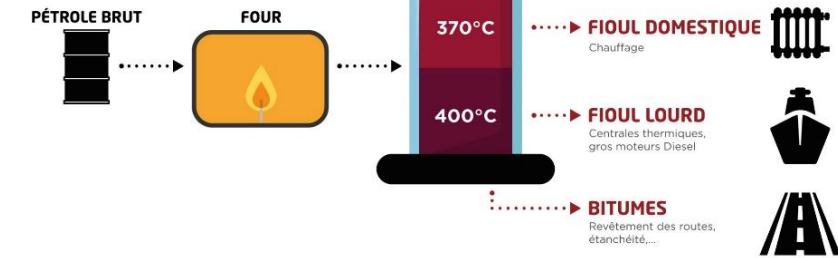
3 molécules d'intérêt :

- Le kérosène : C_nH_{2n+2} avec $8 \leq n \leq 16$
- Le méthane : CH_4
- Le méthanol : CH_3OH



Et quelques réactions pour les obtenir :

- Réaction de méthanation dite de **Sabatier** : $CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$
- Synthèse du méthanol ou **méthanolation** : $CO_2 + 3H_2 \rightarrow CH_3OH + H_2O$
- Synthèse du kérosène par **Fischer-Tropsch** : $nCO + (2n+1)H_2 \rightarrow C_nH_{2n+2} + nH_2O$ avec $8 \leq n \leq 16$
 - Nécessitant au préalable la synthèse de CO par **RWGS** : $CO_2 + H_2 \rightarrow CO + H_2O$
- Synthèse du kérosène par voie méthanol ou voie **Méthanol-to-Jet** :
 - Méthanol-to-Oléfine : $2CH_3OH \rightarrow C_2H_4 + 2H_2O$
 - Puis oligomérisation pour la formation de chaînes longues de type C_nH_{2n}
 - Puis hydrogénation pour obtention d'hydrocarbures saturés de type C_nH_{2n+2} avec $8 \leq n \leq 16$



... et de biologie pour comprendre les biocarburants

La biomasse :

- Formule moyenne : $C_6H_9O_4$...
- 2 types :
 - Biomasse sèche avec taux d'humidité < 20%
 - Biomasse humide avec taux d'humidité > 20%



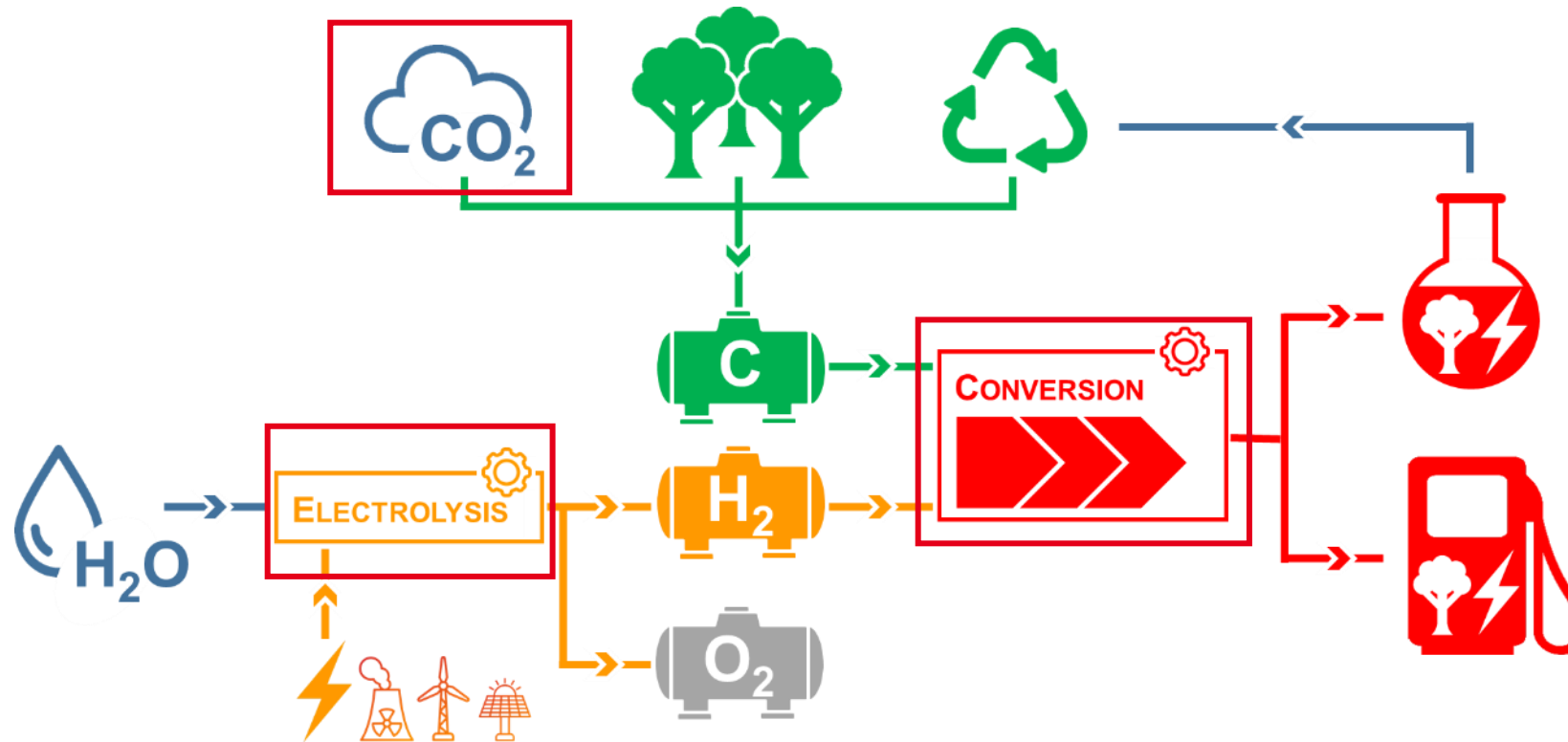
Les technologies de thermoconversion de la biomasse :

- Biomasse sèche : la pyrogazéification → Syngas = $CO + H_2$
- Biomasse humide : les procédés hydrothermaux
 - Gazéification hydrothermale → Biogaz constitué de CH_4 , CO_2 , H_2 , ...
 - Liquéfaction hydrothermale → Biocrude à raffiner
 - Carbonisation hydrothermale → Biochar

Les voies biologiques, c'est aussi :

- Les microalgues
- Les micro-organismes divers et variés, par exemple archées, cyanobactéries, ... capables par exemple de transformer du CO_2 et de l'eau en méthane, de générer la fermentation de la biomasse, ...
- La capacité à produire des molécules proches des hydrocarbures (par ex : sucres, lipides) qu'on peut transformer en carburants

Chaîne de valeurs générique : les briques clés



- **Captage du CO₂ (IFPEN)**
 - Mature : captage aux émetteurs
 - R&D: DAC (Direct Air Capture)

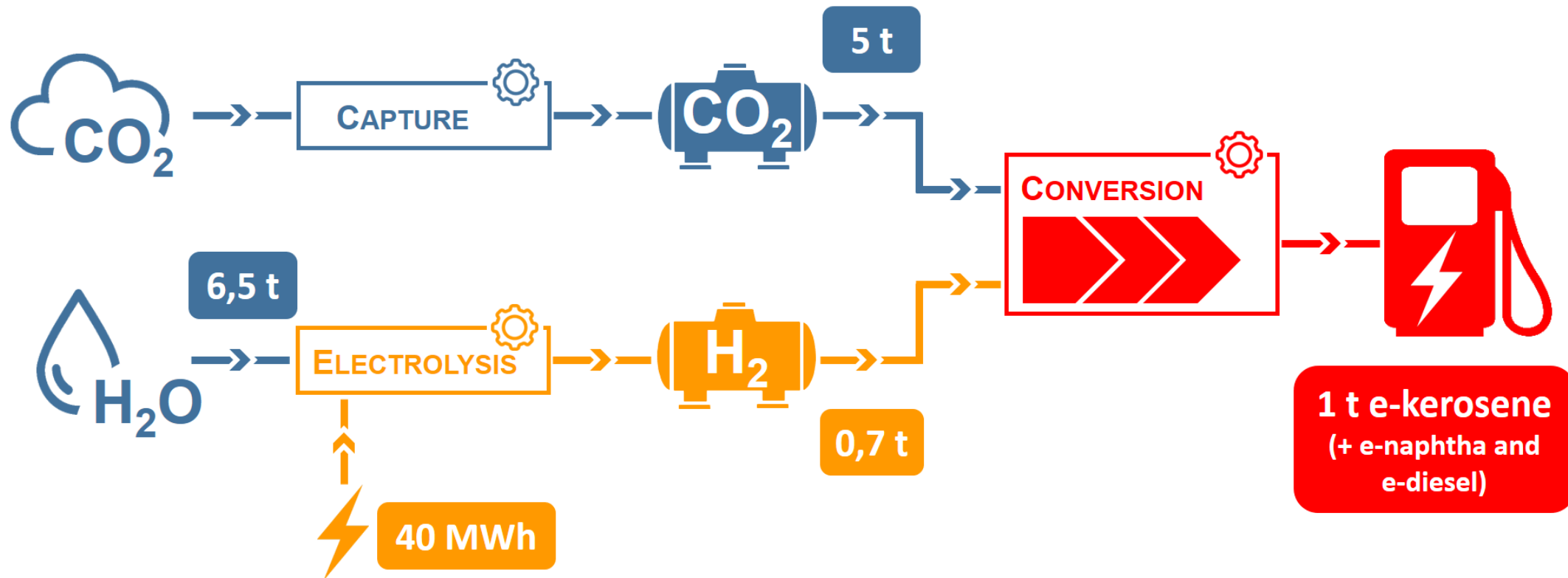
- **Production H₂**
 - Mature: électrolyse alcaline
 - R&D : électrolyse PEM, EHT

- **Conversion du CO₂**
 - Mature : synthèse Fischer-Tropsch, Methanol-to-Kerosen
 - R&D: Electrocatalyse, Photoélectrolyse, Biologie, Hybride

- **Conversion de la biomasse**
 - Mature : Méthanisation, fermentation
 - R&D : Pyrogazéification, process hydrothermaux, ...
 - Transformation acides gras, sucres, ...

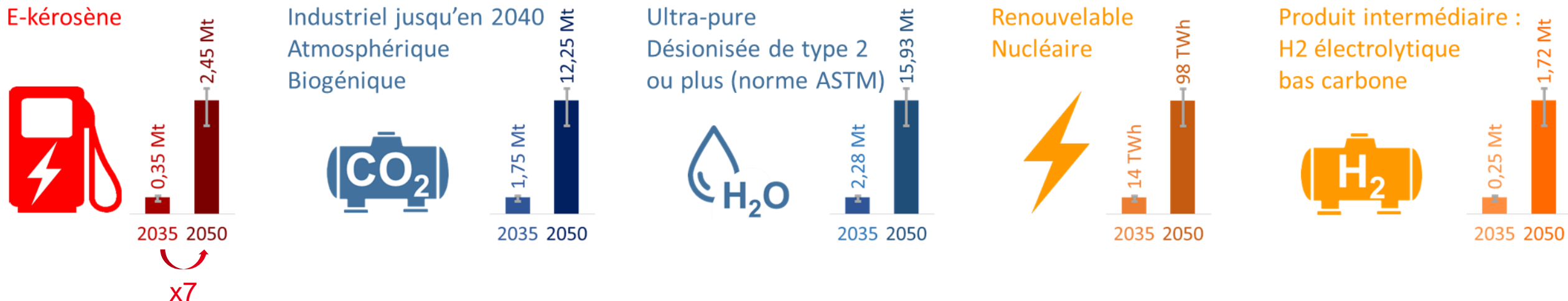
Les ressources sont clés pour la production de e-fuels

- En considérant la voie Fischer-Tropsch, la plus mature aujourd'hui, les ressources nécessaires pour produire 1 t de e-kérosène sont les suivantes :



Les ressources sont clés pour la production de e-fuels

- Pour satisfaire à la réglementation ReFuelEU en France, en 2035 et 2050 :



- **12 Mt de CO₂** : 3% des émissions annuelles françaises, 17% des émissions industrielles de 2023 – En 2050 :
 - ✓ CO₂ biogénique (dès 2041), provenant des papeteries, production d'éthanol, méthaniseurs, ...
 - ✓ CO₂ atmosphérique
- **16 Mt d'eau** : < à la consommation annuelle de 300 000 français
- **100 TWh** : ~9 EPR 1600MW ou ~3200 éoliennes 8MW
- **1,7 Mt d'H₂ en 2050** : ~13 GW d'électrolyseurs / **0,25 Mt d'H₂ en 2035** : ~2 GW d'électrolyseurs, soit ¼ de la production d'H₂ prévue par la Stratégie Nationale H₂ 2025



3 ■ L'ECC au CEA

L'Économie Circulaire du Carbone au CEA

Chaîne de valeurs de molécules pour l'énergie et la chimie

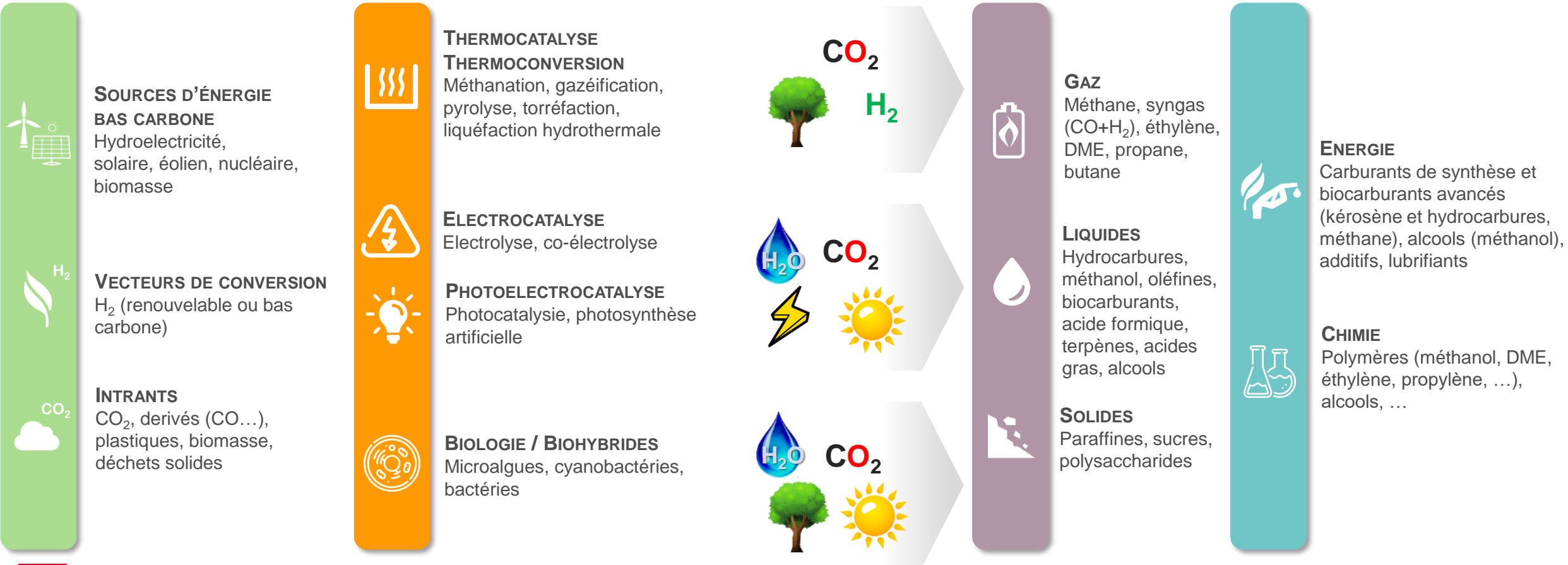


Collecte des ressources

Production - Transformation

Molécules

Applications

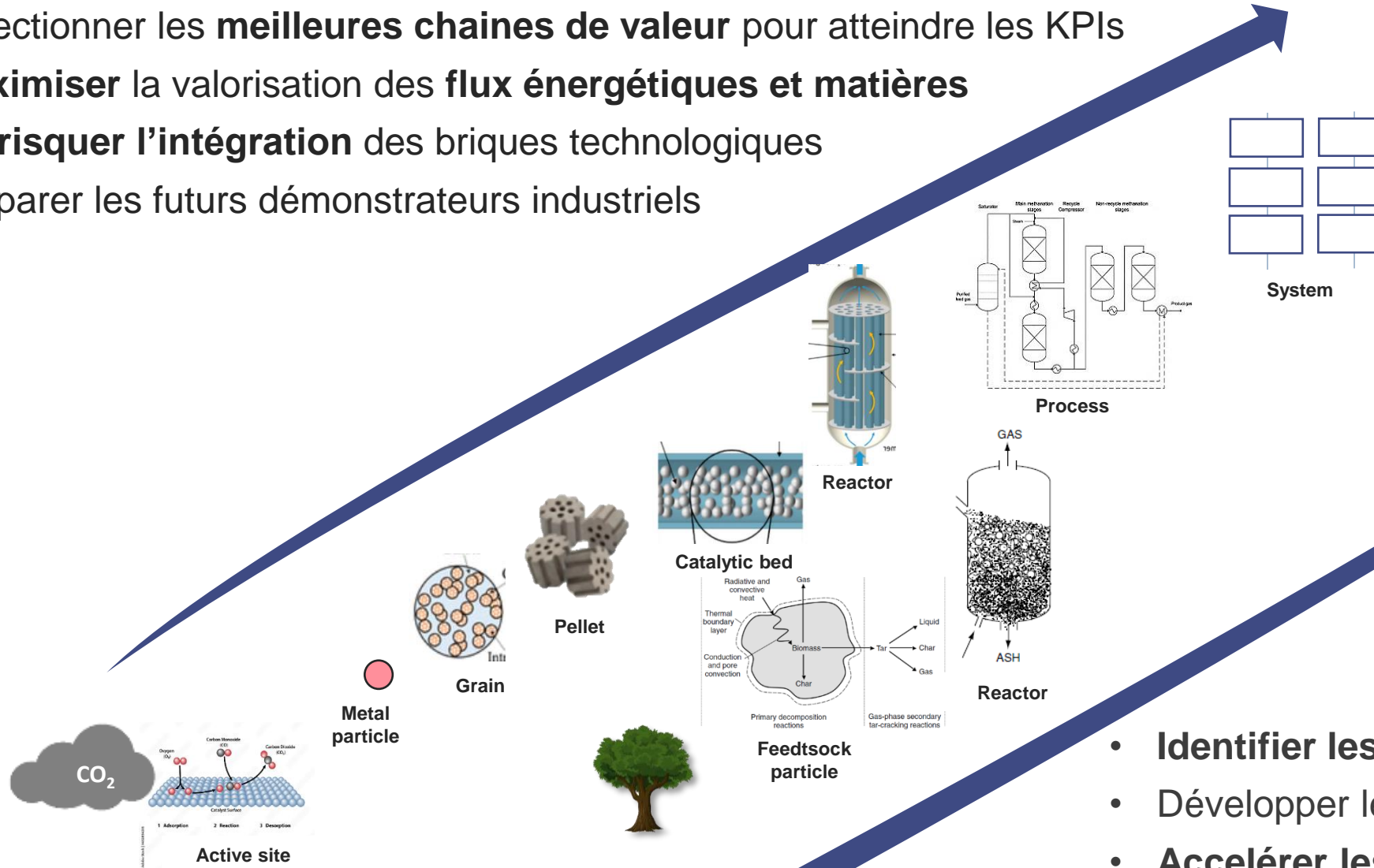


L'approche du CEA



Une approche multi-échelle et multi-physique

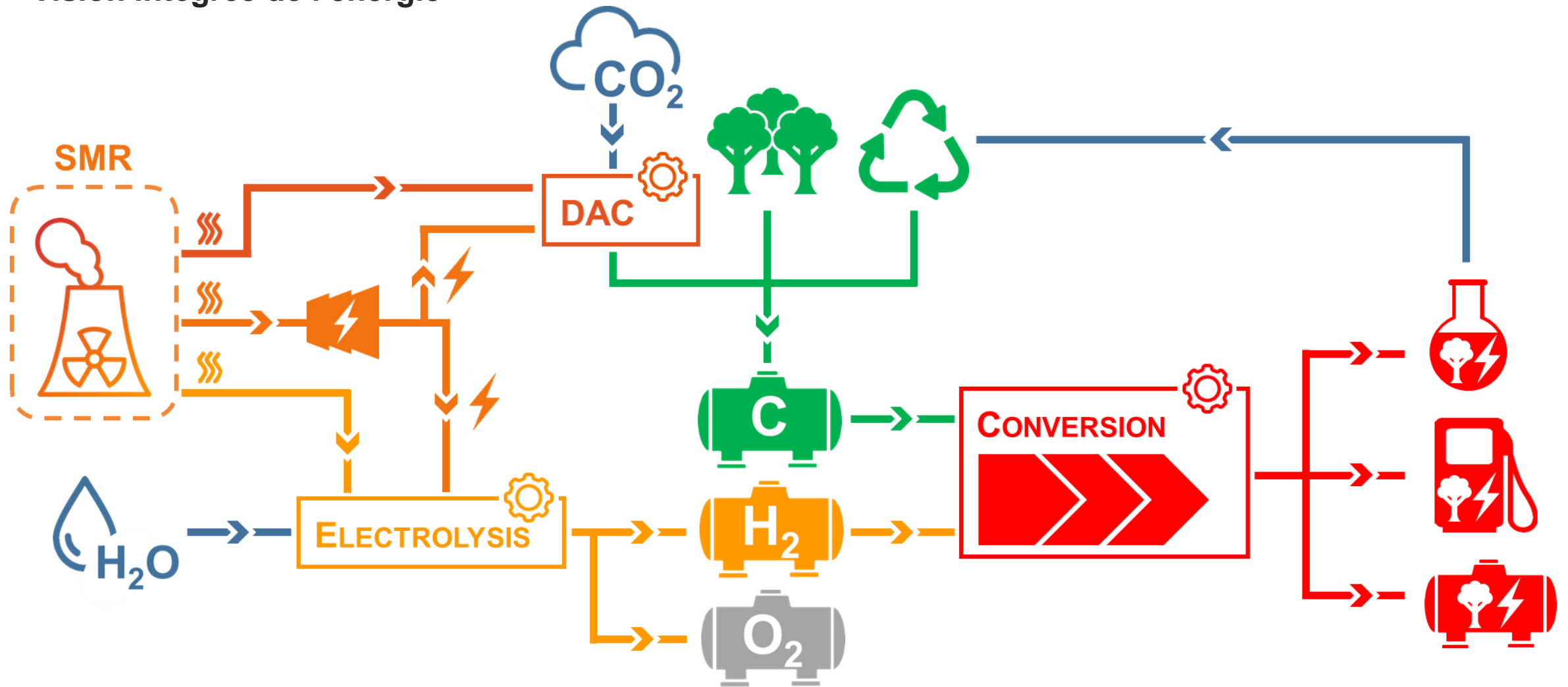
- Sélectionner les **meilleures chaînes de valeur** pour atteindre les KPIs
- **Maximiser** la valorisation des **flux énergétiques et matières**
- **De-risquer l'intégration** des briques technologiques
- Préparer les futurs démonstrateurs industriels



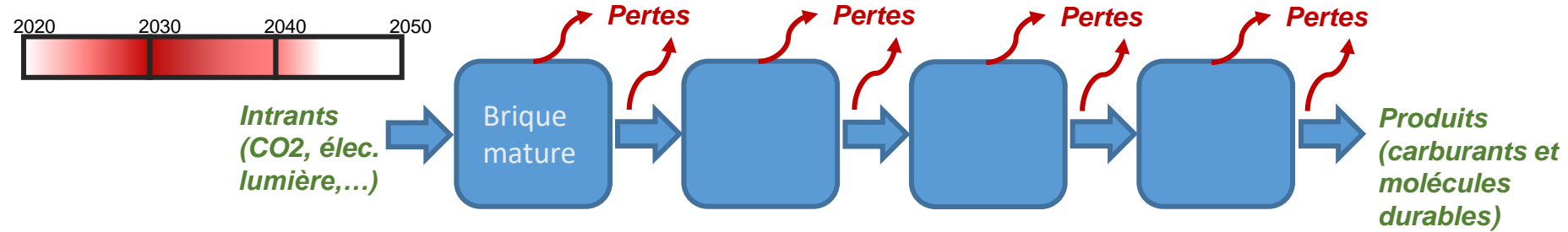
- **Identifier les KPIs** à chaque échelle
- Développer les briques **haut potentiel**
- **Accélérer les boucles de feedback** entre matériaux, composants et systèmes

L'approche du CEA

Vision intégrée de l'énergie

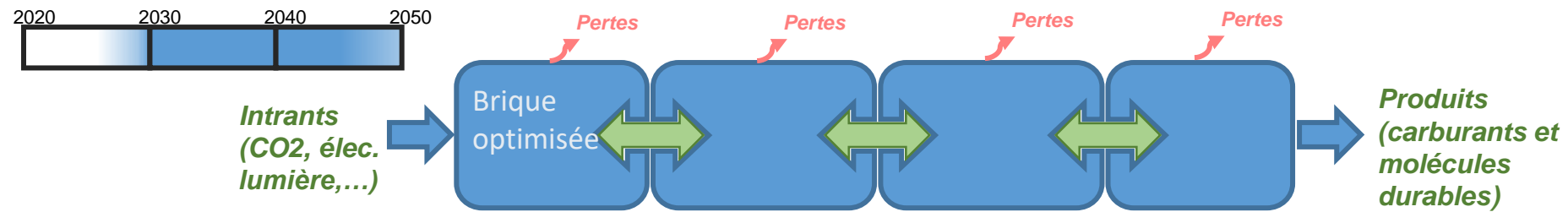


R&D pour accélérer l'émergence d'une nouvelle industrie et développer les briques technologiques innovantes



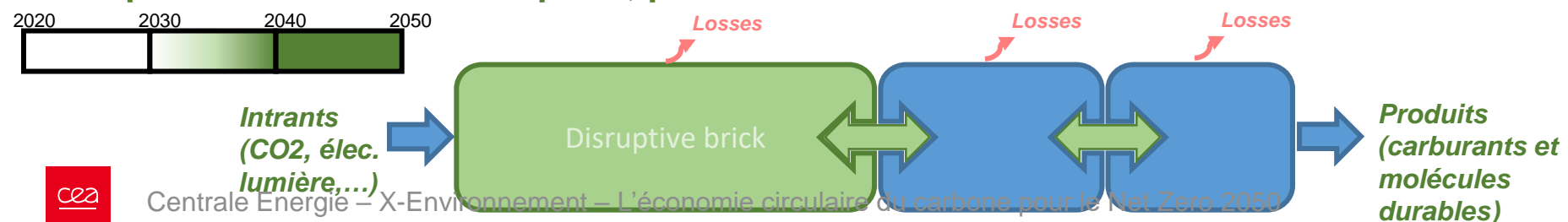
1^{ère} filière de production, non optimisée
 Prix de vente e-fuel : 5 à 10 fois le prix du kerosene fossile

Une filière de production de carburants et molécules durables basée sur des briques de conversion revisitées, optimisées et intégrées, pour optimiser les rendements matière et énergie



Accompagner les industriels dans le développement de briques technologiques optimisées et intégrées

Une génération future de production de carburants et molécules durables basée sur des briques innovantes et en rupture, pour réduire la chaîne de valeur et maximiser les rendements



Intensifier la recherche académique pour proposer des procédés capables de raccourcir les chaînes de valeur

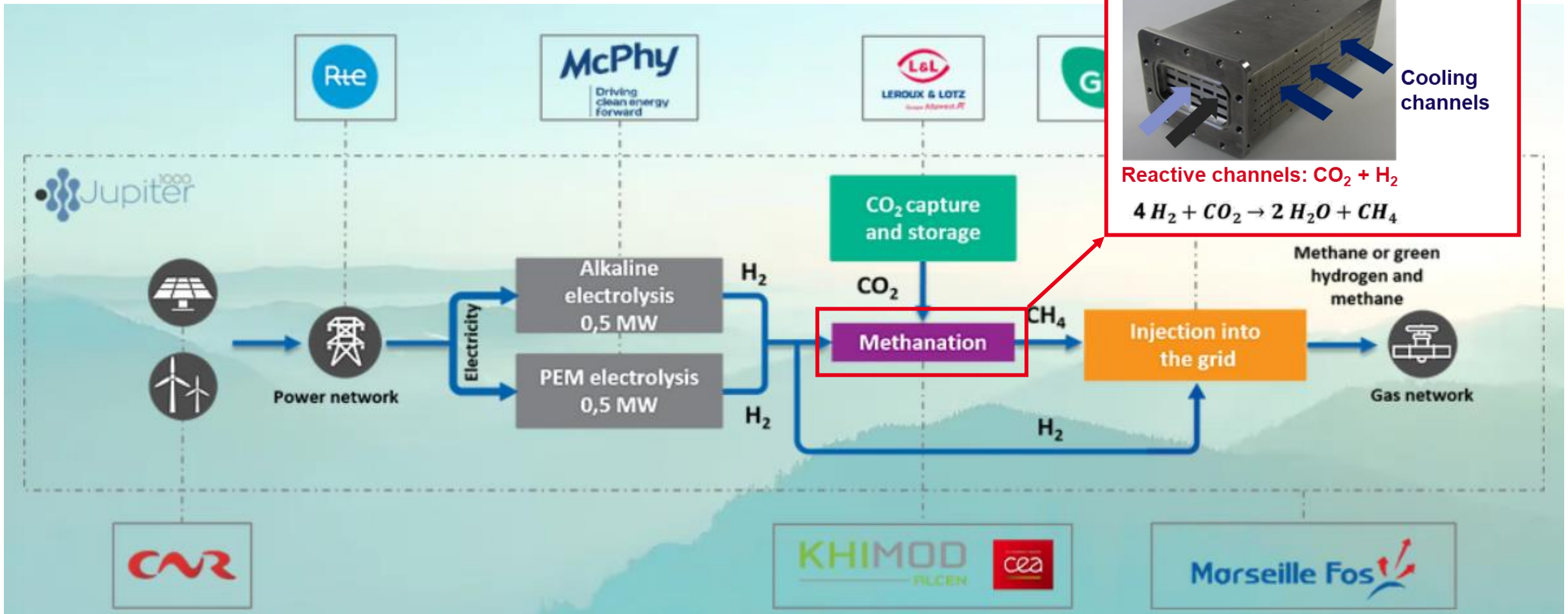


4 ■ Quelques exemples de projets de R&D

Quelques exemples de projets de R&D au CEA

JUPITER 1000 : 1^{er} démonstrateur industriel « POWER TO GAS » en France

- Production de méthane par hydrogénation de CO₂ (thermocatalyse)



Thermocatalyse

CO₂ H₂



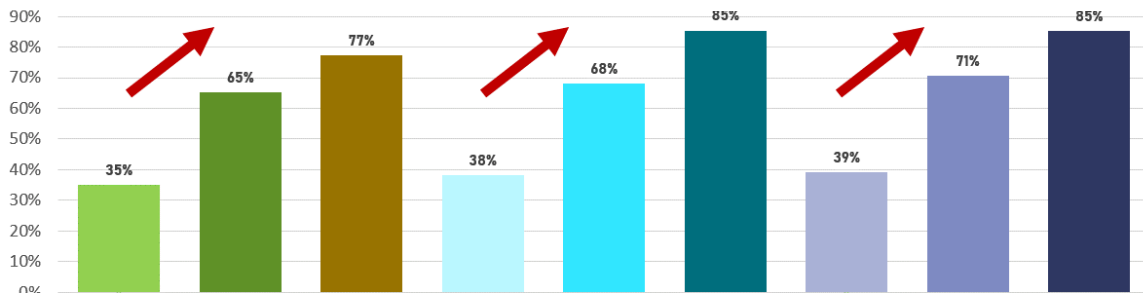
R&D

Commercial

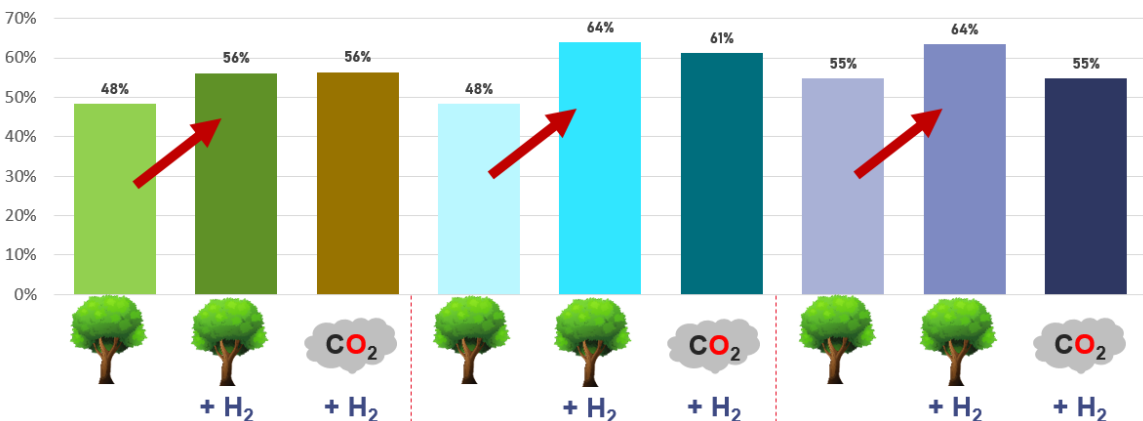
Quelques exemples de projets de R&D au CEA

Analyse tech-éco de plusieurs voies de production : biofuels, e-fuels et e-biofuels

Conversion du carbone



Rendement global

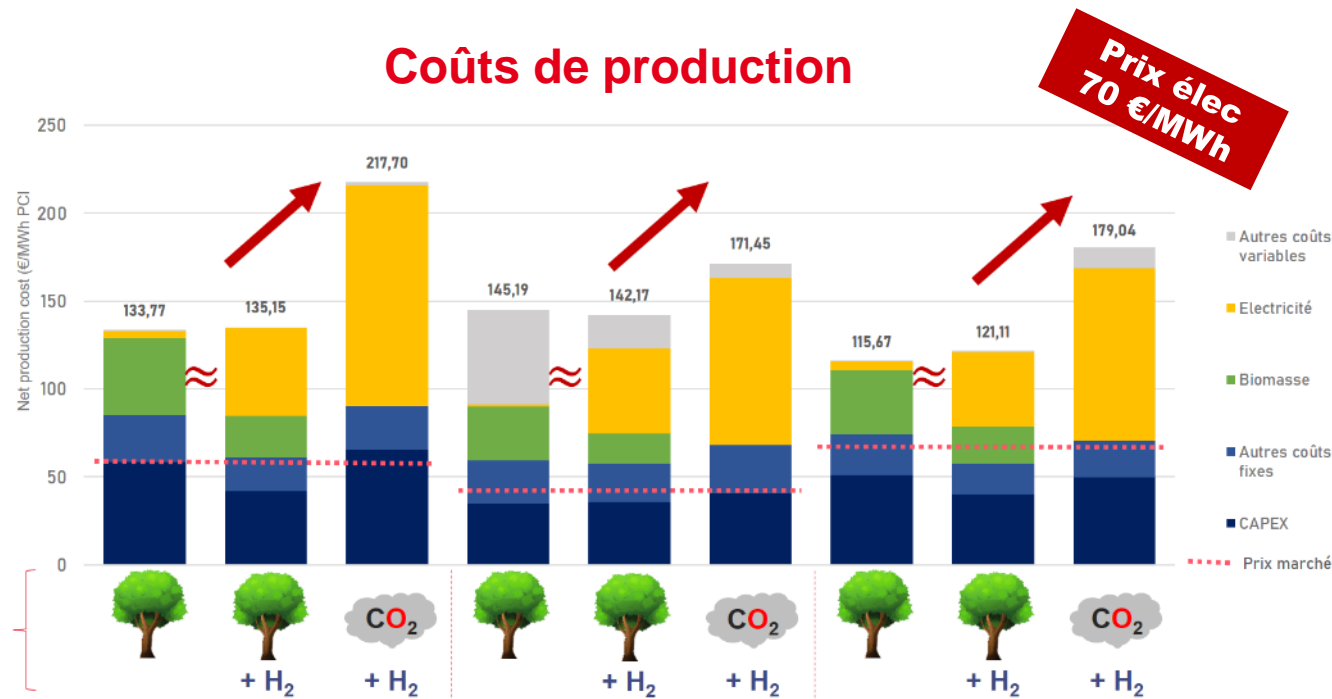


Oil

SNG

Methanol

Coûts de production



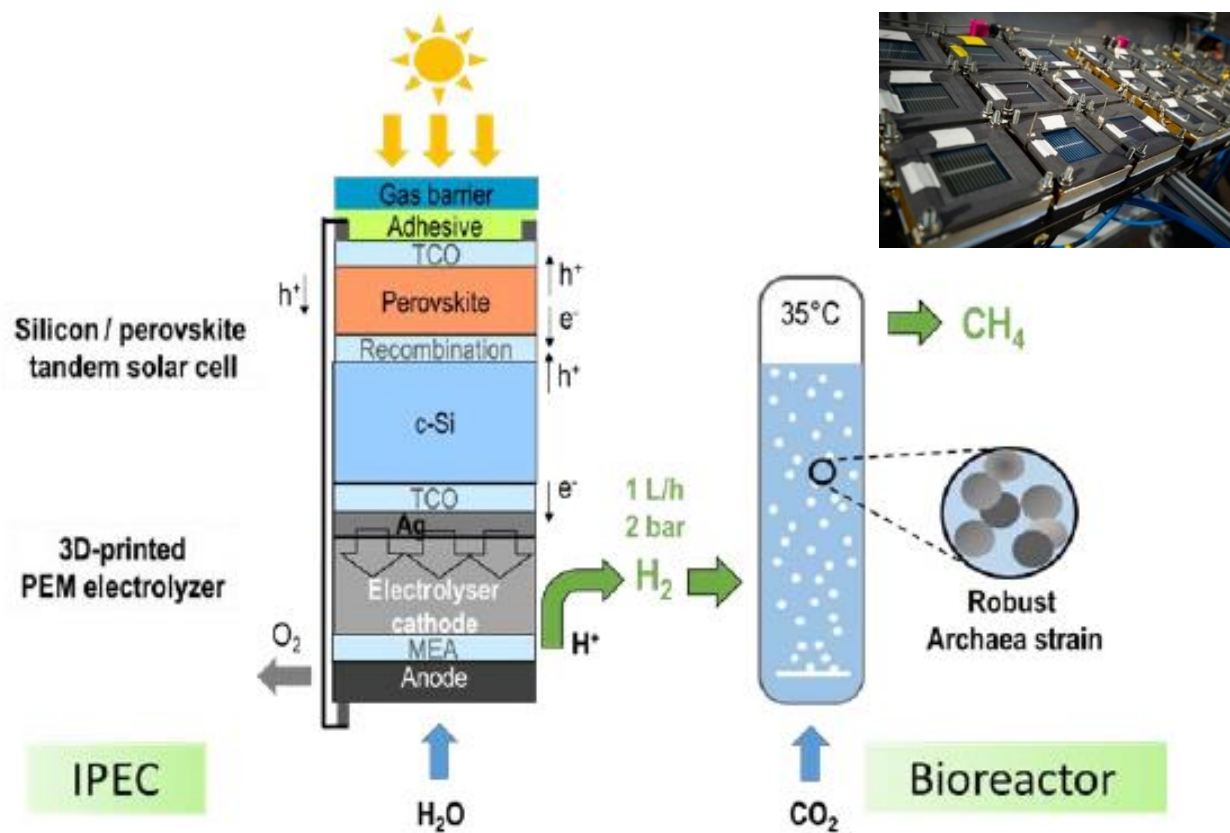
Oil

SNG

Methanol

Quelques exemples de projets de R&D au CEA

EASI Fuel : un démonstrateur pour la production of carburants solaires



EIC Horizon Prize
Artificial Photosynthesis:
Fuel from the Sun



Photo(electro)catalyse
Biologie

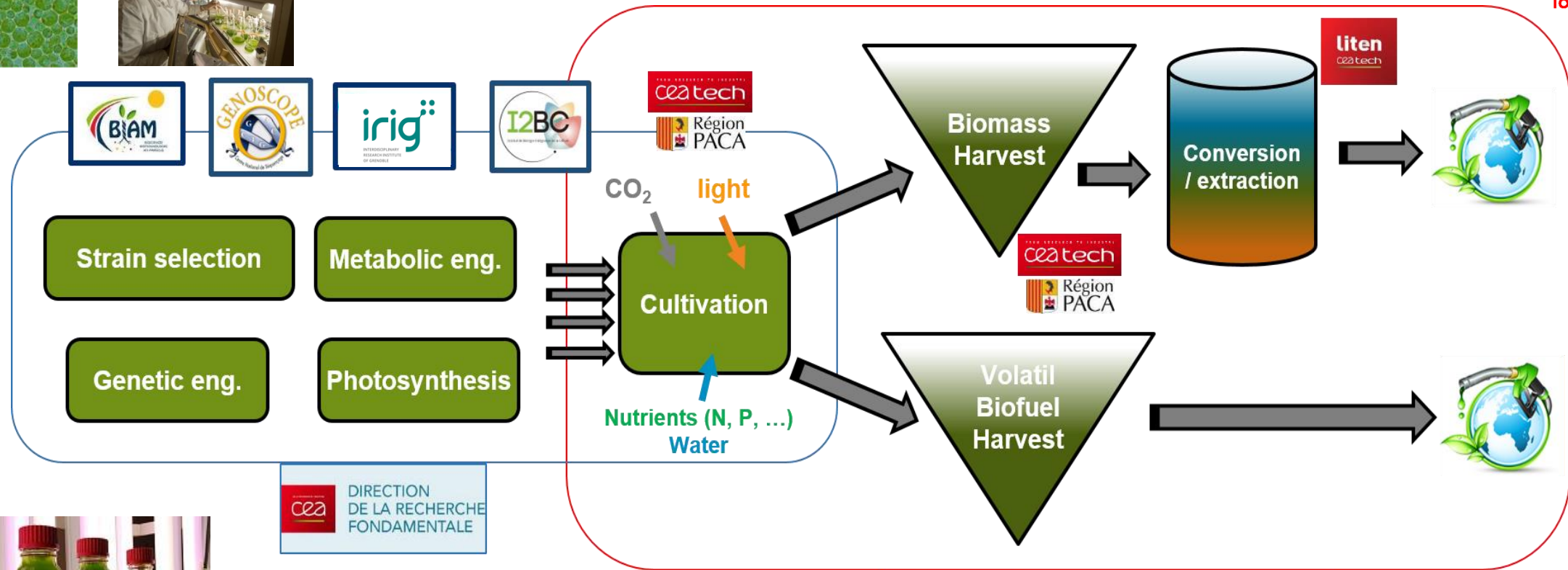
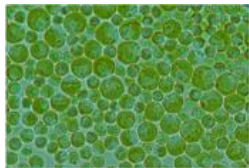


H₂ CO₂



Quelques exemples de projets de R&D au CEA

Plusieurs instituts du CEA pour s'attaquer à la production de biocarburants de 3^{ème} génération



cea DIRECTION DE LA RECHERCHE FONDAMENTALE

cea tech DRT Direction de la Recherche Technologique



Biologie et biohybrides





Merci de votre attention

claire.gauthier@cea.fr

