



Marc FONTECAVE

CHAIRE CHIMIE DES PROCESSUS BIOLOGIQUES

La transition énergétique : aujourd'hui et demain (III)

5 nov. > 17 déc. 2025

Emissions de CO₂ (France)

360 Mt

Industrie: **18 %- 70 Mt**

- *Acier* (10 Mt) (1t acier > 2 t CO₂)
- *Chimie* (20 Mt)
- *Construction* (ciment/chaux) (20 Mt)
(1 t ciment > 1 t CO₂)
- *Autres* (20 Mt)

Quelle partie des **70 Mt**
pourra-t-on capter ??

6 Mt (2030)

32 Mt (2040)

52 Mt (2050)

Objectifs Union européenne

HAUT CONSEIL
pour le **CLIMAT**

France 2030:

Ø **4-8 Mt** (SNBC)

Ø **2-4 Mt** (HCC)

France 2050:

Ø **15-30 Mt** (SNBC)

Ø **15-20 Mt** (HCC)

Les 50 sites les plus émetteurs:

12 %- **44 Mt**- 66% de l'industrie



COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—

CO₂, une source de carbone:

2. L'hydrogène

Marc FONTECAVE

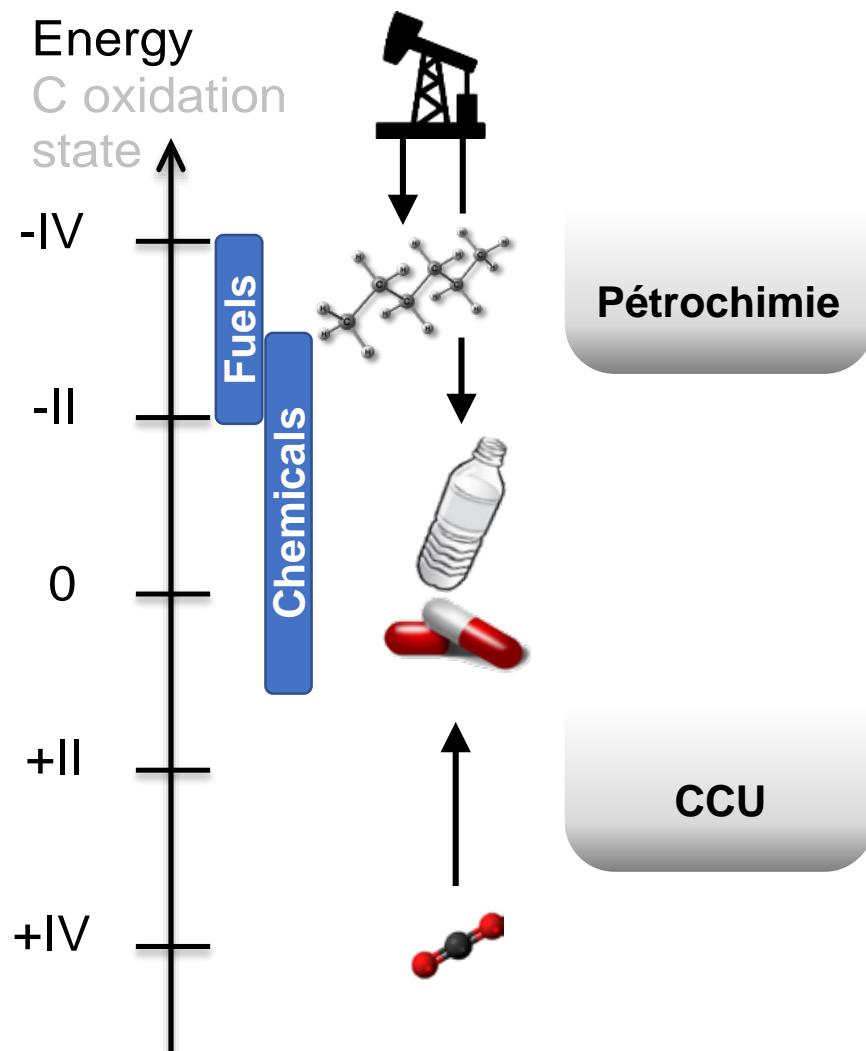
*Professeur au Collège de France
Président du Comité de Prospective en Energie
(Académie des Sciences)*

SÉMINAIRE :

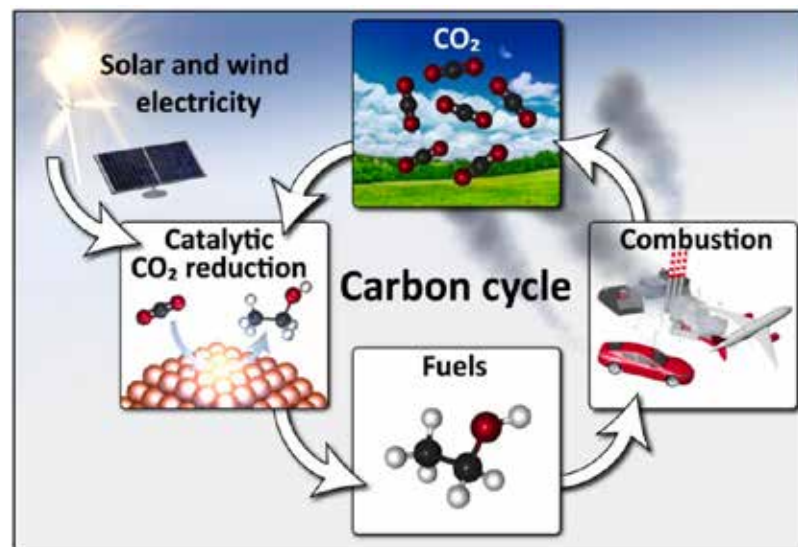
Christophe Copéret, Professeur, Professeur, ETH Zurich,
Department of Chemistry and Applied Biosciences,
Zurich, Suisse

« Convertir le dioxyde de carbone en méthanol :
compréhension des processus élémentaires et exploration
de l'espace chimique »

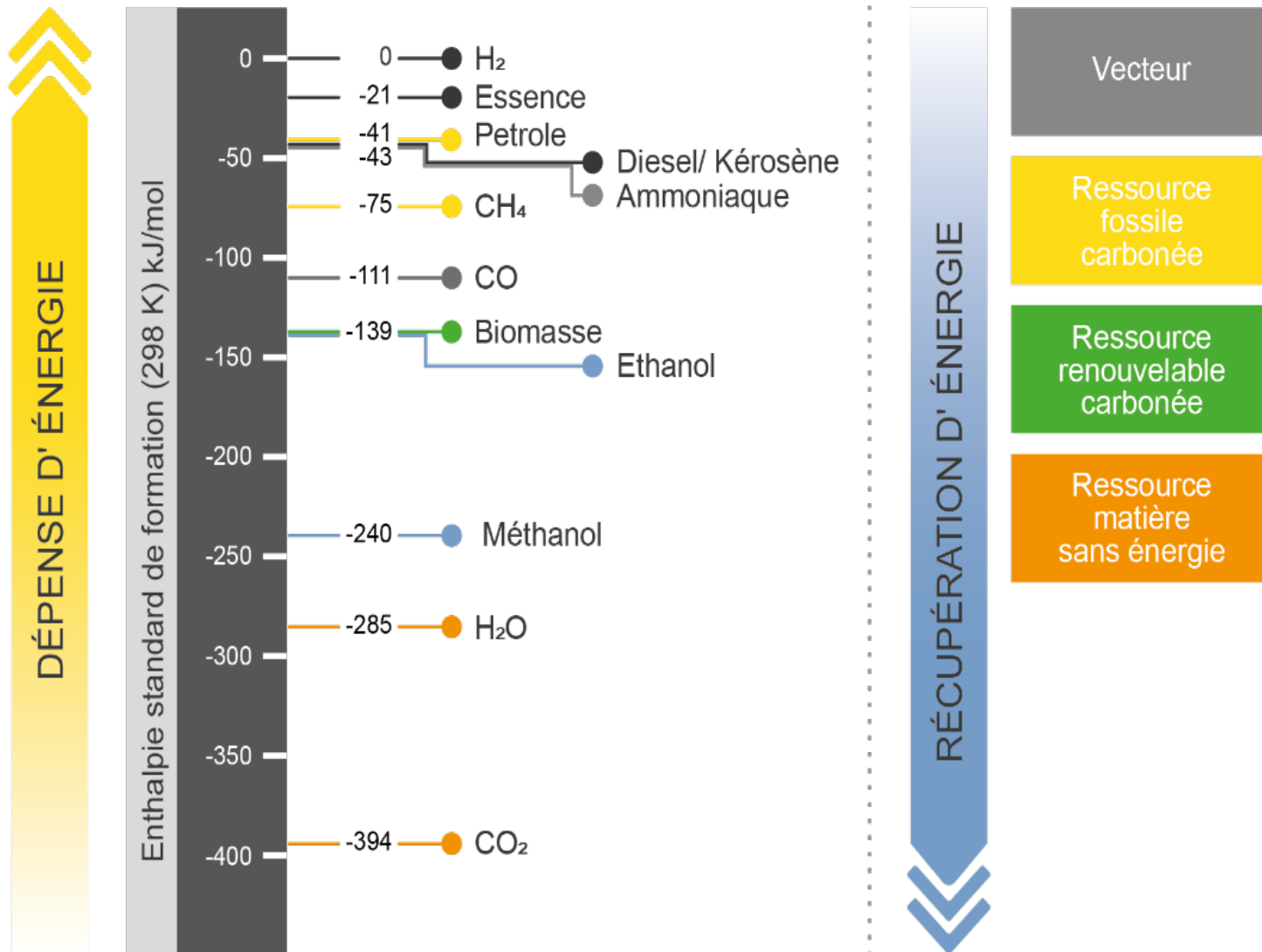
Utilisation = réduction du CO_2



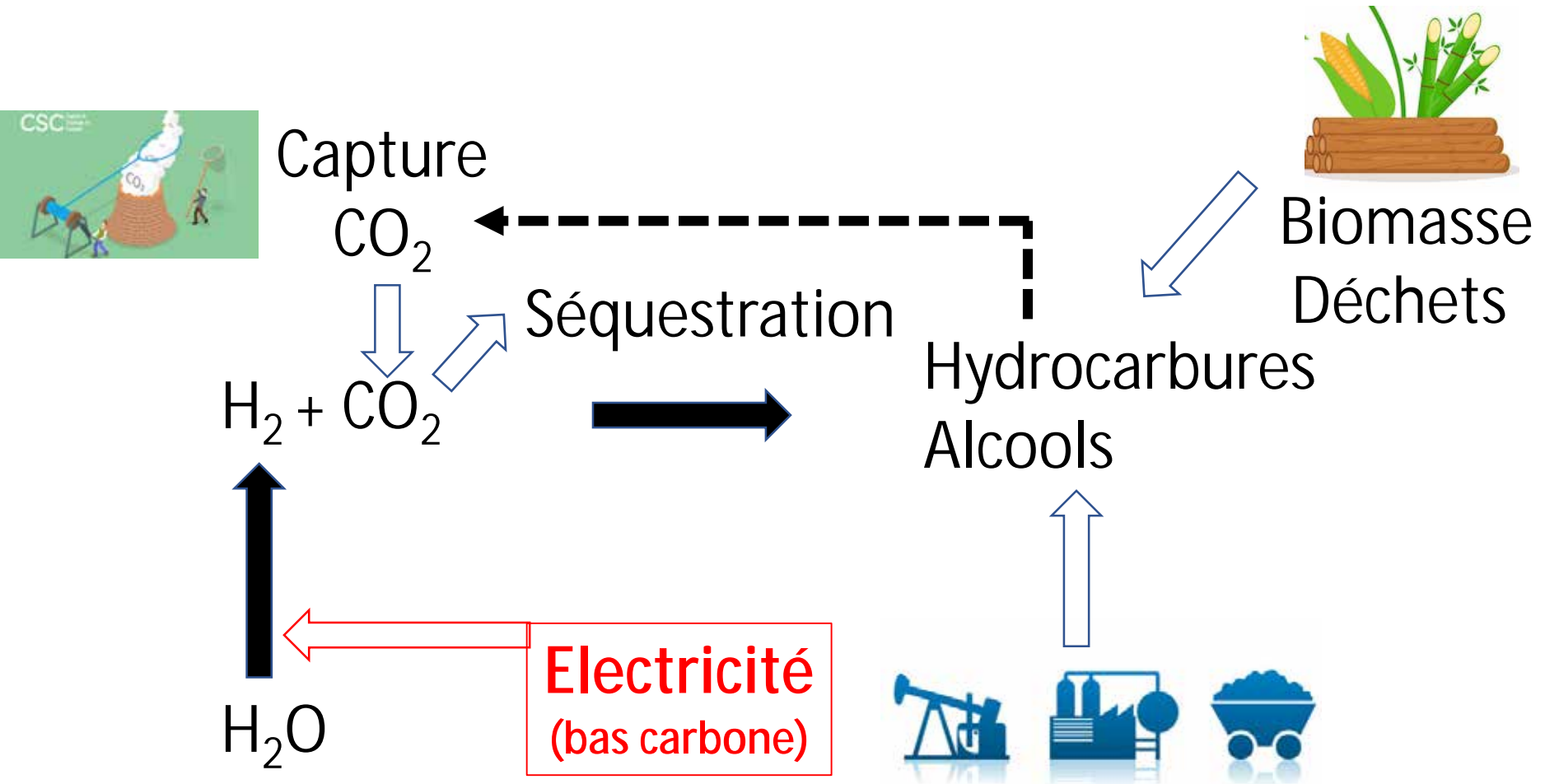
Il faut de l'énergie !
(bas carbone !!)
de l'eau
du CO_2



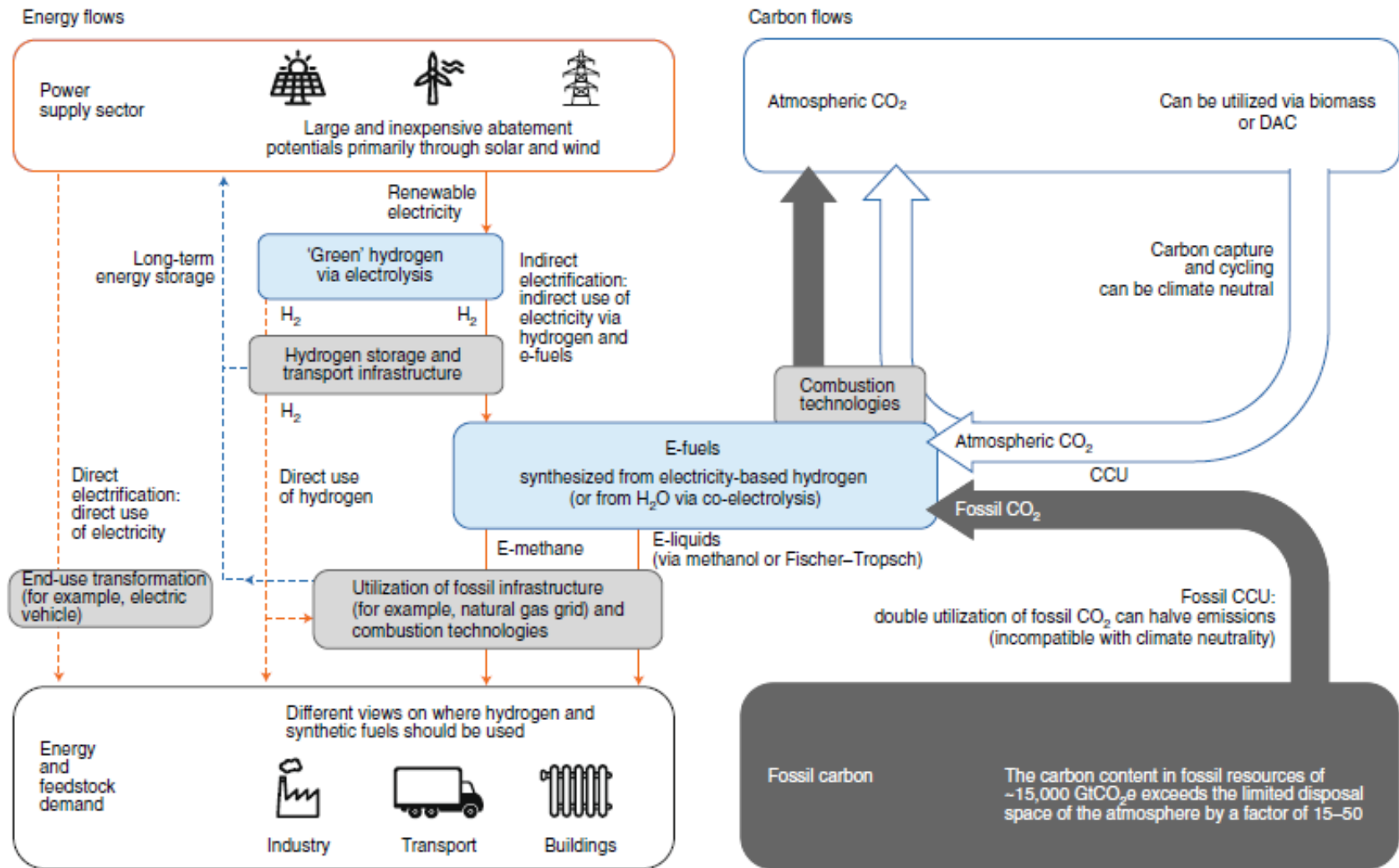
Energie chimique



Carburants de synthèse = hydrogénation du CO₂



Demain quel carbone ?

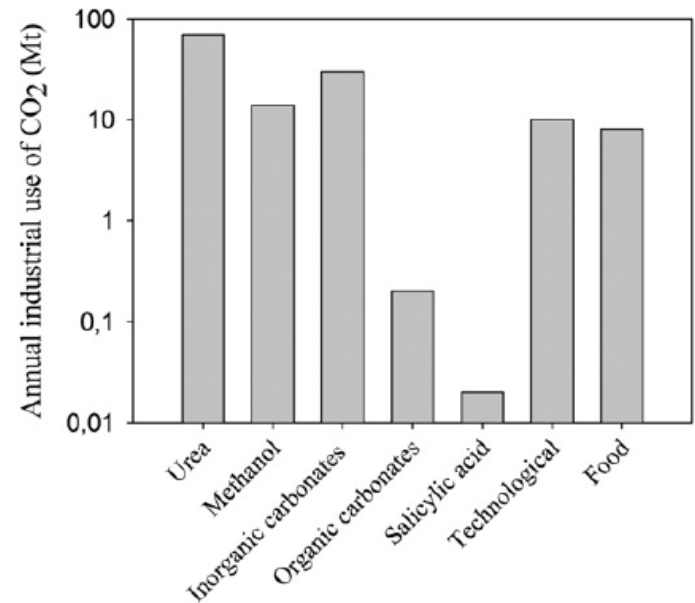
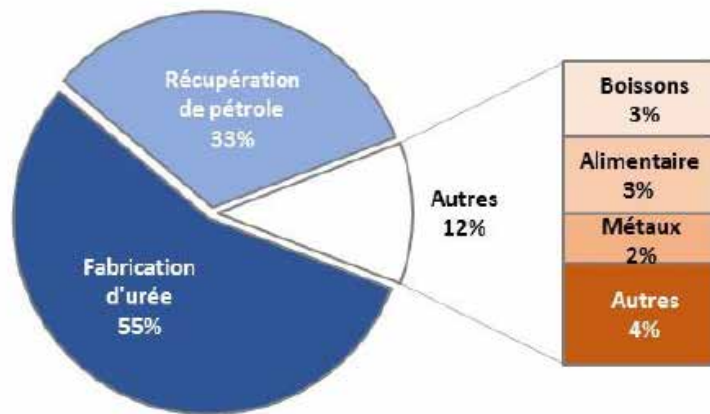


Utilisation industrielle du CO₂

- Atmosphère 3300 Gt CO₂ (420 ppm)
- Production anthropogénique 37 Gt/an
- Industrie: 230 Mt/an (0.6% des émissions anthropogéniques)**
(France 1 Mt)

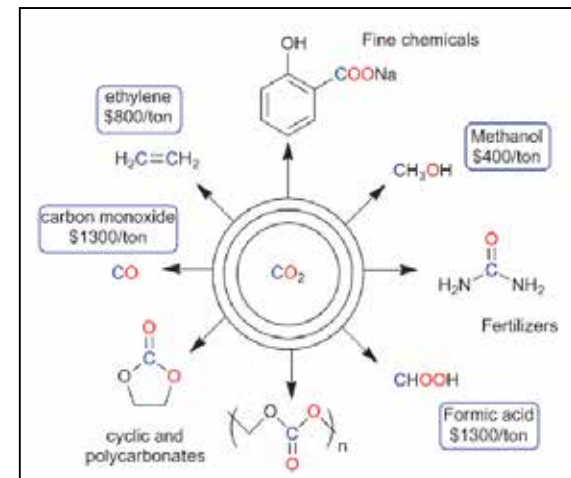
Sources:

- 50 Mt captage CCUS
- 180 Mt (puits naturels, récupération industrie)



Répartition des débouchés actuels du CO₂ – Source : Données AIE (2019).

- Ø Urée (engrais) : 120 Mt
- Ø Récupération assistée du pétrole: 70 Mt
- Ø Autres (méthanol, carbonates..): 40 Mt



Transports lourds (aviation): des combustibles liquides

Commission/Parlement Européens initiative (ReFuelsEU Aviation)

Carburants durables ou Sustainable Aviation Fuels (SAF)

ü Biocarburants (1G exclus)

ü e-kérosène

SAF: 2% (2025); 20 % (2035); 70 % (2050)

2050: 35 % biocarburants; 35 % e-carburants; 30 % kérosène fossile

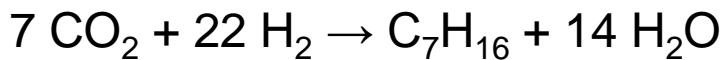


France 2050 : 8 Mt/100 TWh (6 Mt/76 TWh = 2023)

ü Biocarburants 2,8 Mt (35%)

ü e-kérosène 2,8 Mt/35 TWh (35%)

ü Kérosène fossile: 2,4 Mt



gasoline (C₇H₁₆) : 12.7 kWh/kg



Besoins pour le e-kérosène:

Ø hydrogène: 1,2 Mt

Ø Électricité: 75 TWh*

Ø CO₂: 8,4 Mt

* Coût électrolyse 85%, captage 15%

Transports lourds (maritime): des combustibles liquides

Besoin de **2,5 Mt** e-carburants (30 TWh)
(aujourd'hui fioul lourd)

(Équivalent de 5 Mt Méthanol)



Besoins

Ø hydrogène: 1 Mt

Ø Électricité: 64 TWh*

Ø CO₂: 7,5 Mt

* Coût électrolyse 85%, captage 15%

Transports lourds : des combustibles liquides

TOTAL : 8,1 Mt de carburants durables (100 TWh)
dont 5,3 Mt de *e-carburants* (+ 2,8 Mt biokérosène)



Besoins

Ø Hydrogène: 2,2 Mt

Ø Électricité: 140 TWh*

Ø CO₂: 16 Mt

* On dépense 140 TWh pour obtenir 70 TWh d'énergie sous forme de e-carburants

13 novembre 2023

**PROPOSITION D'UNE
« FEUILLE DE ROUTE 2035 »
POUR LE DÉVELOPPEMENT
DE E-CARBURANTS**

France	2035	2050	2035	2050
Besoin en carburant des aéroports	9,0 MT	9,0 MT	110 TWh	110 TWh
dont carburant durable	1,8 MT	6,3 MT	22 TWh	77 TWh
besoin en carburant des ports	2,8 MT	3,8 MT	31 TWh	43 TWh
dont carburant durable	0,3 MT	3,0 MT	3 TWh	34 TWh
Carburant durable - Total	2,1 Mt	9,3 Mt	25 TWh	111 TWh

Industrie: remplacer la pétrochimie

France 2050:

80 TWh comme en 2023

(6,2 Mt de produits pétroliers)

On peut remplacer* le pétrole comme source de carbone par CO₂



Ø **6,2 Mt de méthanol (35 TWh)**

Ø **1,2 Mt d'H₂**

Ø **8,5 Mt CO₂**

Ø **70 TWh****

* Hypothèse:
on utilise la biomasse à 55%
et e-méthanol à 45 %

** Coût électrolyse 85%, capture 15%

Besoins totaux pour carburants et sources de C alternatifs

CONCLUSION CCU:

Pour transports lourds + industrie chimique,

Les besoins en carbone (CO_2) sont de **25 Mt ***

Les besoins en H_2 sont de **3,4 Mt* ****

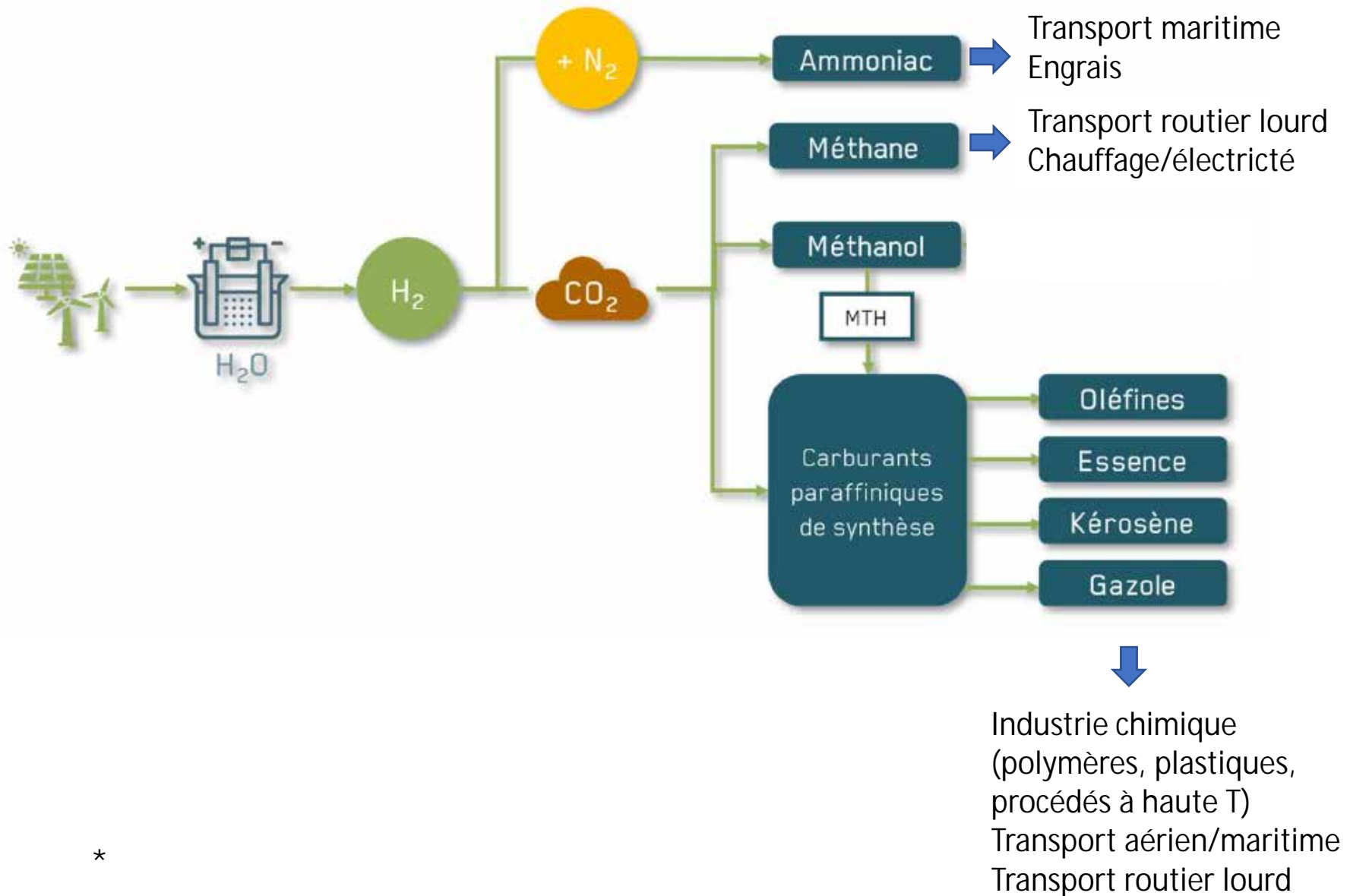
Les besoins en **électricité** sont de **210 TWh (17 EPR !)**

* rappel: 15-30 Mt CO_2 (SNBC, HCC)

* rappel: on a aussi besoin de H_2 pour ammoniac/raffinage/autres (0.9 Mt en 2023)

** Si H_2 était gris l'ensemble émettrait 32 Mt CO_2 !!!


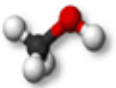

Hydrogénations



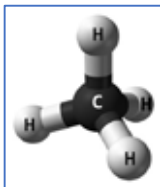
	Densité ¹	Densité énergétique ² massique	Densité énergétique volumique
	kg/m ³	MJ/kg	MJ/L
e-gazole ou e-diesel	780	44	34.3
e-kérosène ou e-jetfuel	756	44.1	33.3
e-essence ou e-gasoline	748	41.5	31
e-méthane liquide (-161°C)	425	50.1	22
e-méthanol	793	19.9	15.8
e-ammoniac liquide (-33°C)	681	18.6	12.7
Hydrogène liquide (-253°C)	71	120	8.5
e-méthane gaz	0.65	50.1	0.04
e-ammoniac gaz	0.69	18.6	0.013
Hydrogène gaz (0°C)	0.09	120	0.0108

Tableau 2-1 Propriétés principales des e-fuels

Cartographie des carburants de synthèse étudiés dans le périmètre de l'Observatoire français des e-fuels

Molécule	État physique en conditions industrielles	Densité énergétique massique (kWh/kg)	Densité énergétique volumique (MWh/m³)	Prix constaté équivalent fossile (€/tep)	Cas d'usages pertinents	Atouts clés	Projets annoncés en France	Prévision de production en 2030 (ktep/an)
e-méthane 	Gaz / Liquide Liquéfaction possible via technologies et terminaux GNL matures	16,63 Moyenne à l'état gazeux 14,72 Moyenne à l'état liquide	0,01 Très faible à l'état gazeux 6,22 Élevée à l'état liquide	516	Transport maritime, ferroviaire et routier lourd Injection dans les réseaux gaziers	Positionnement d'acteurs français et développement de projets sur tout le territoire Potentiel de décarbonation des réseaux et usages gaziers, et liquéfiabilité Déploiement d'unités locales et à petites échelles en lien avec la filière biométhane (couplage méthanisation / méthanation)	12 Energo, SIAH Croult, Hycaunais, Gaya, Bergeracois, Trifyl, Thyreco, Occi-Biome, Jupiter 1000, Methycentre, STEP Perpignan, Pau'wer	2 15000 t
e-méthanol 	Liquide Contraintes de transport et d'usage comparables aux carburants conventionnels	5,48 Faible	4,33 Moyenne	1 116	Intrants pour l'industrie chimique Incorporation dans l'essence Mobilité lourde, notamment maritime	Externalités positives sur la qualité de l'air (pas de SOx et peu de Nox à la combustion) Renationalisation d'une production industrielle de méthanol bas-carbone et substitution d'importations fossiles Potentiel et intérêts très favorables pour le secteur maritime	5 eM-CTY, eM-Rhône, eM-Lacq, Neocarb, Hynovi	272 0,6 Mt
e-kérosène 	Liquide Contraintes de transport et d'usage comparables aux carburants conventionnels	13,08 Moyenne	10,47 Très élevée	793	Transport aérien, en particulier long courrier	Soutien politique et aides financières au niveau européen et mondial pour les carburants d'aviation durables Filière e-biokérosène privilégiée et seule alternative crédible pour décarboner le transport long courrier actuel en utilisant les infrastructures et flottes d'appareils existants	7 Reuze, KerEAUzen, Take Kair, MassHyllia, BioTJet, Hynovera, Avebio	254 0,25 Mt

1 tep = 11630 kWh



e-méthane

Gaz; 50 MJ/kg; transport par réseaux de canalisation; sites de stockage;...
GNL (T<-161°C)- 22 MJ/L;

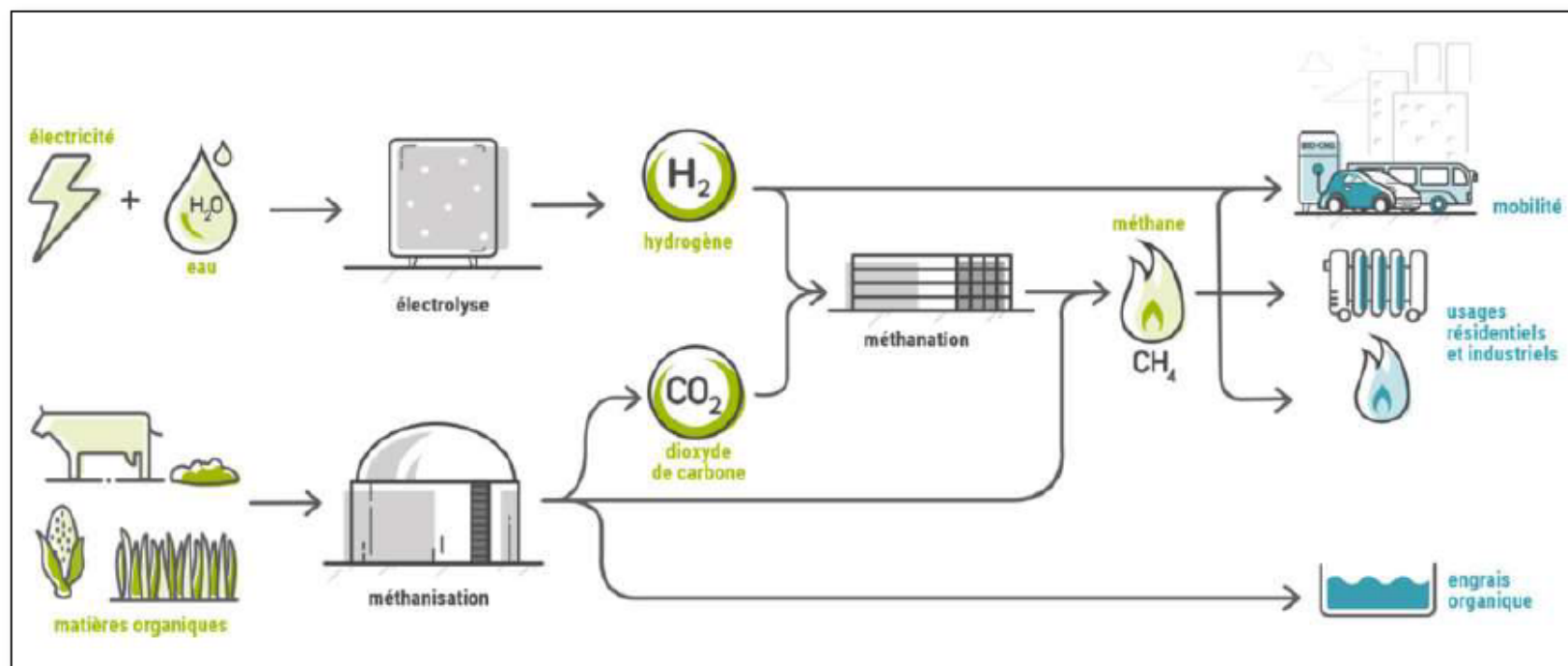


Réaction de Sabatier (1897)

250-350°; 10-15 bar

Catalyseur: Ni(Rh,Ru)

Rendement énergétique: 48-52%



e-méthane

France: 360 TWh de gaz naturel

Avec 1 kg CH₄ = 14 kWh > 360 TWh = 26 Mt e-CH₄



Avec un rendement de 90 %

Ø 80 Mt de CO₂

Ø 15 Mt H₂

Ø 800 TWh électricité (70 EPR)... pour obtenir 360 TWh d'énergie !

Avec un prix de l'électricité de 50 €/MWh

Ø Coût électrique du e-méthane: 1,5 €/kg

Ø + autres coûts: capture et transport CO₂; transport H₂; : 3 €/kg (200 €/MWh)

Ø Prix du gaz naturel (aout 2025): 0.4 €/kg (25 € /MWh)

Ø Un facteur 8 !!

e-méthane: un e-carburant coûteux

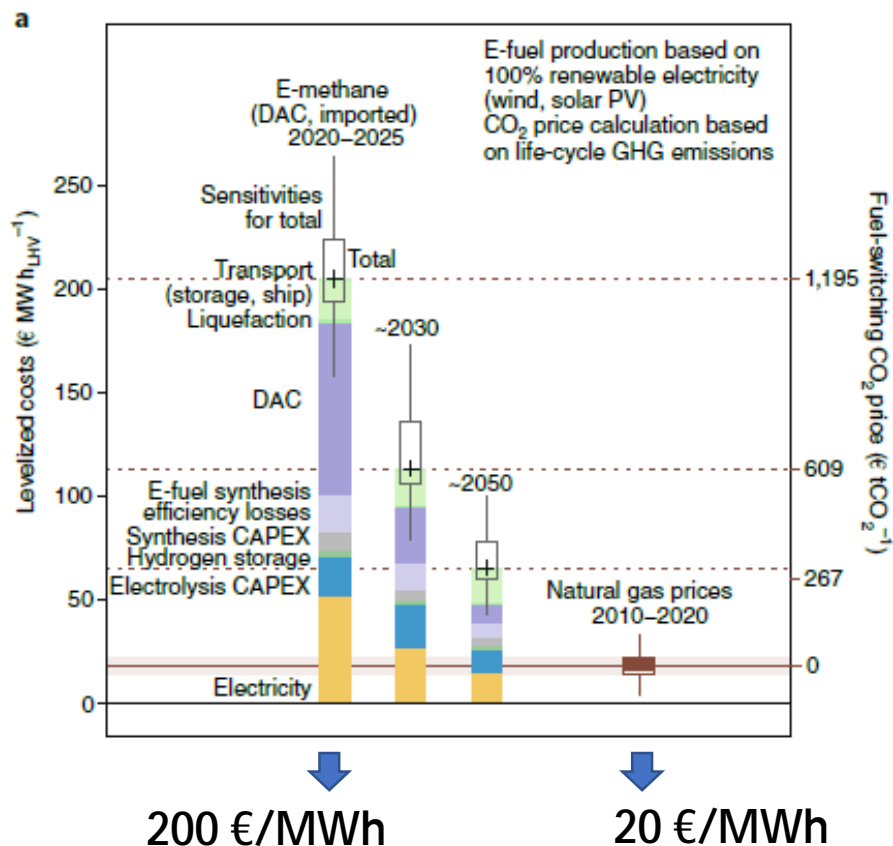


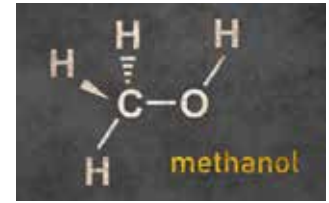
Table 1 | Most important parameters for e-fuel cost estimation and sensitivity analysis

	2020-2025	2030	2050
Annual average electricity price (€ MWh ⁻¹)	50 ± 10	50 ± 10	30 ± 10
Electrolysis CAPEX (€ kW ⁻¹ , median of AEC/PEMEC literature review)	1,100 ± 389	625 ± 258	334 ± 189
DAC (€ per tCO ₂ captured)	460 ± 90	150 + 150/– 50	50 + 50/– 10

For the full table and references, see Supplementary Information S2.

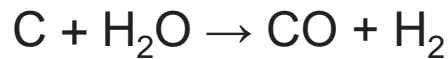
Méthanol

Liquide $T_{eb} = 64,7^{\circ}\text{C}$
22 MJ/kg

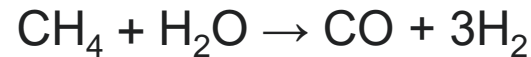


1. Production de gaz de synthèse

À partir de **charbon** (45%)
(haute T, vapeur d'eau)

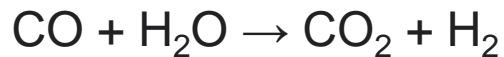


À partir de **gaz naturel** (vaporeformage) (52%)
(10-20 atm; 850°C)



2. Ajustement rapport CO/H₂

RWGS: Reverse Water Gas Shift



2. Synthèse du méthanol

50-100 atm; 250°C ; cata: Cu, ZnO, Alumine

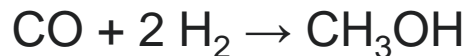
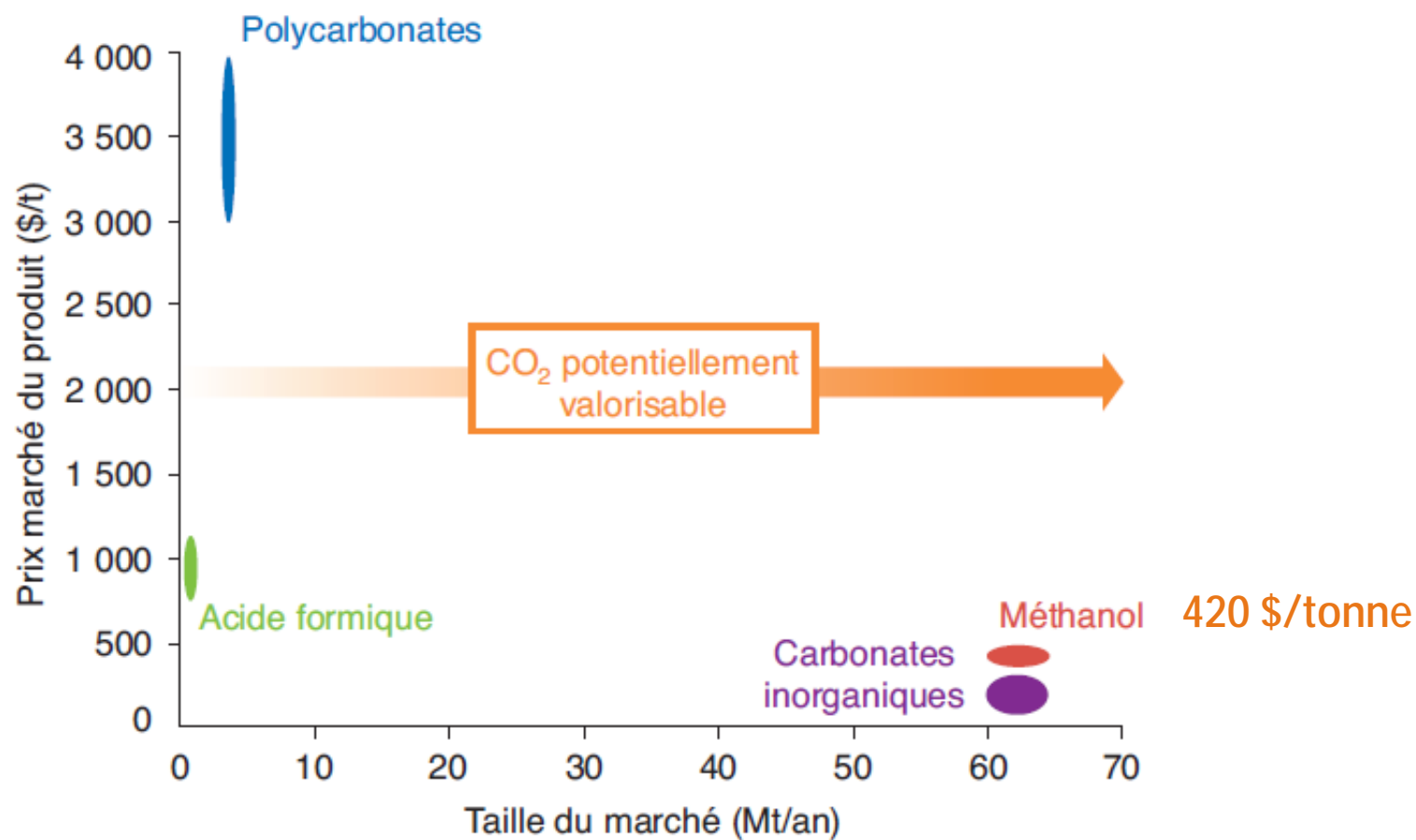


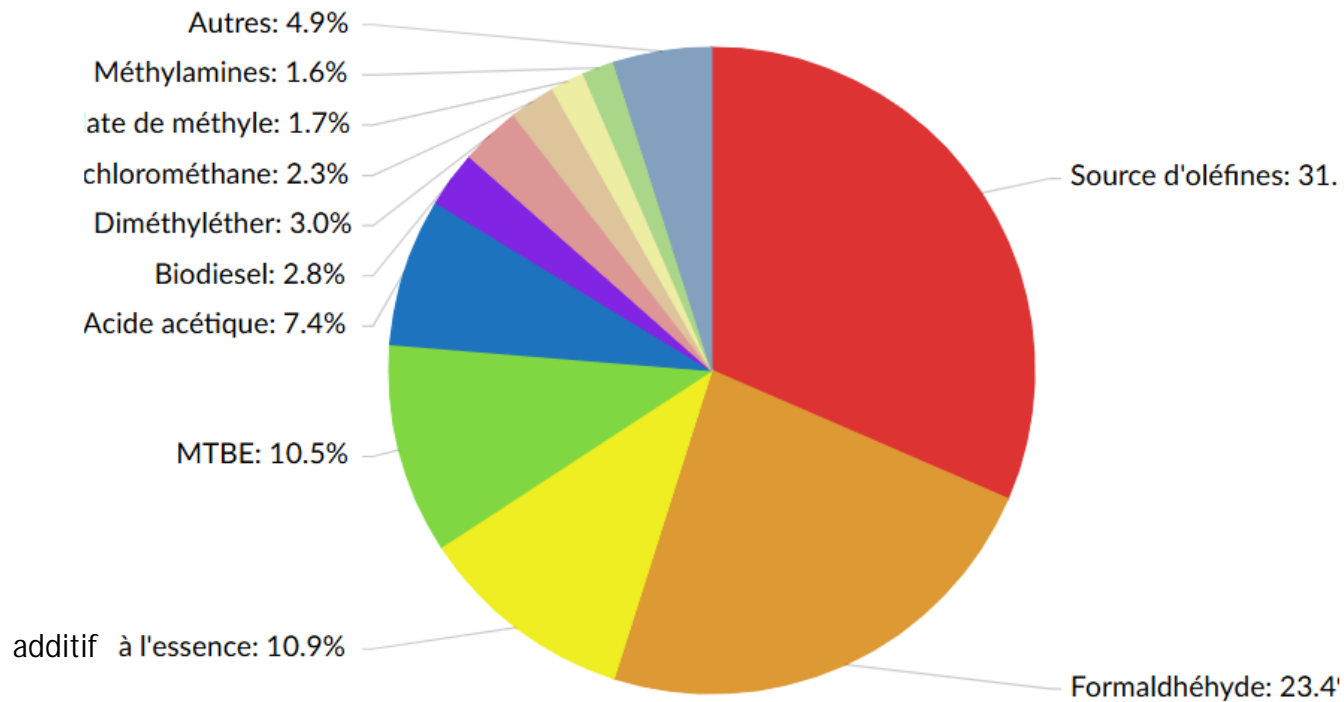
Fig. 3 – Taille des marchés et prix des produits à application majoritairement chimique



Sources : IFPEN, IHS chemical

Méthanol

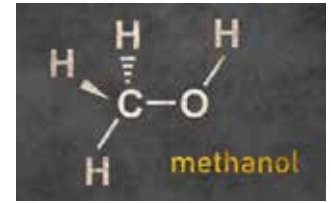
Secteurs d'utilisation du méthanol



En 2021, dans le monde. Source MMSA

MTBE: MethylTerButyl Ether

e-Méthanol

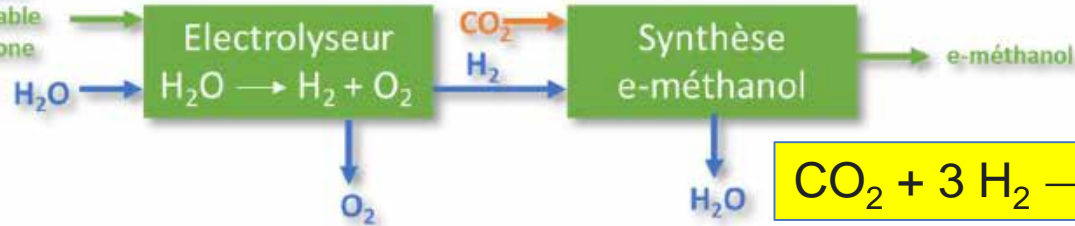


- ① Production de méthanol par électrolyse de l'eau suivie d'une synthèse catalytique
Rendement: 48-50% (électrolyse de l'eau + hydrogénation CO₂)

CCU



Électricité
renouvelable
bas carbone



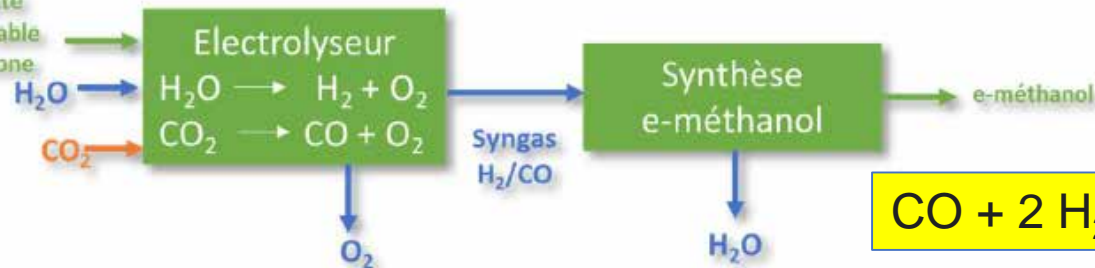
TRL 7-8

- ② Production de méthanol par co-électrolyse de l'eau et du dioxyde de carbone suivie d'une synthèse catalytique

CCU



Électricité
renouvelable
bas carbone



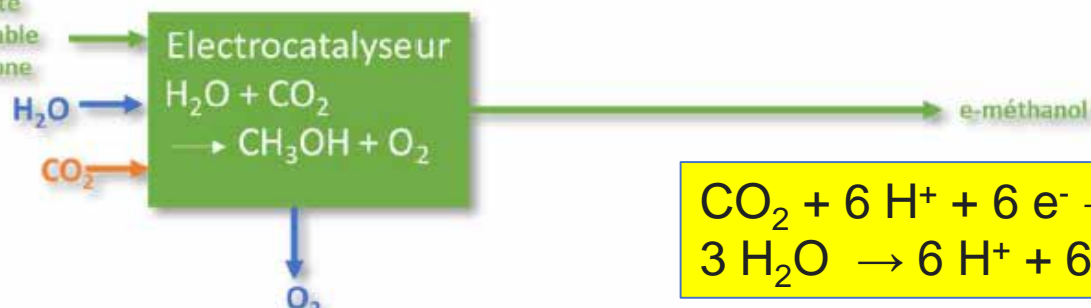
TRL 4-5

- ③ Production de méthanol par synthèse électro-catalytique directe à partir d'eau et de dioxyde de carbone

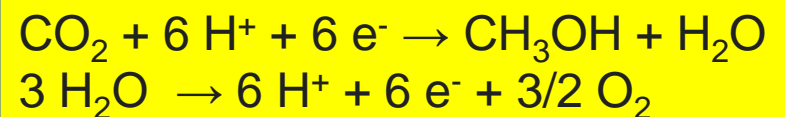
CCU



Électricité
renouvelable
bas carbone



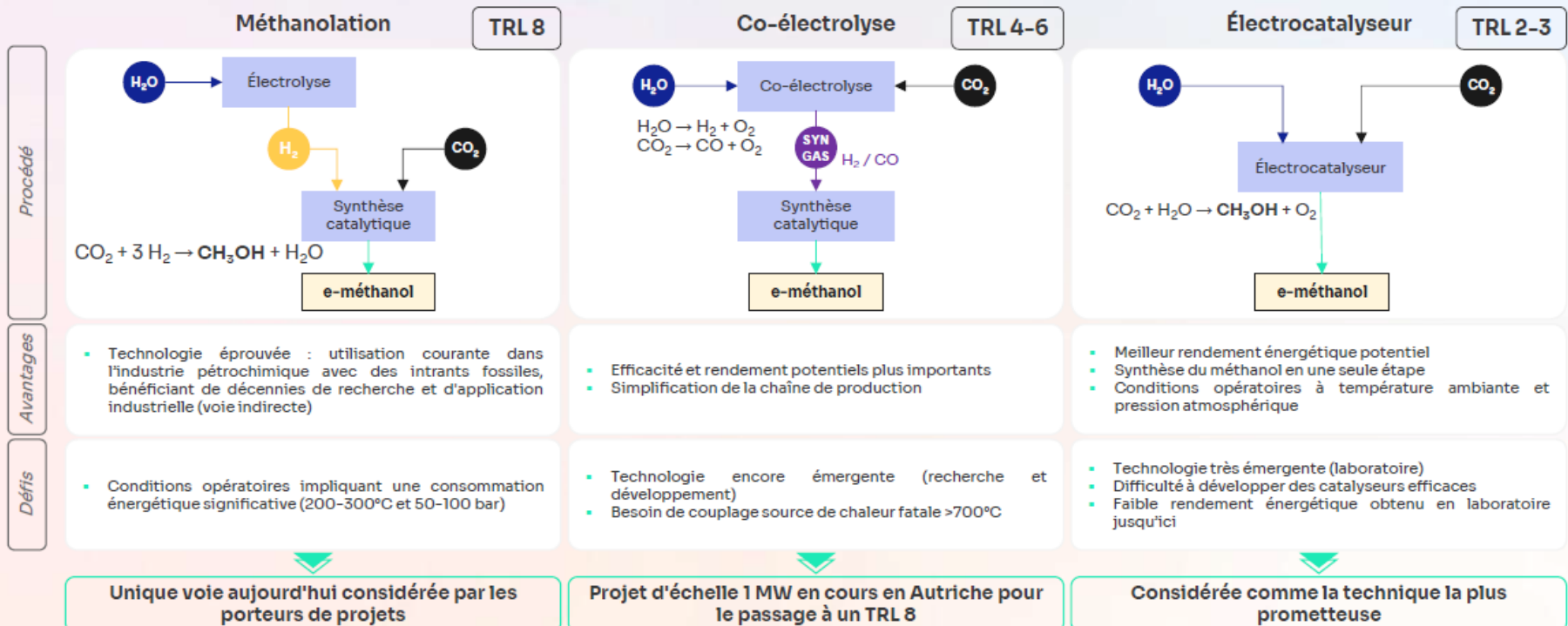
TRL 2-3



e-Méthanol

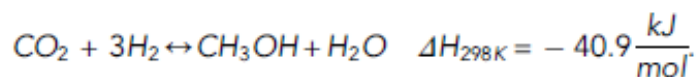
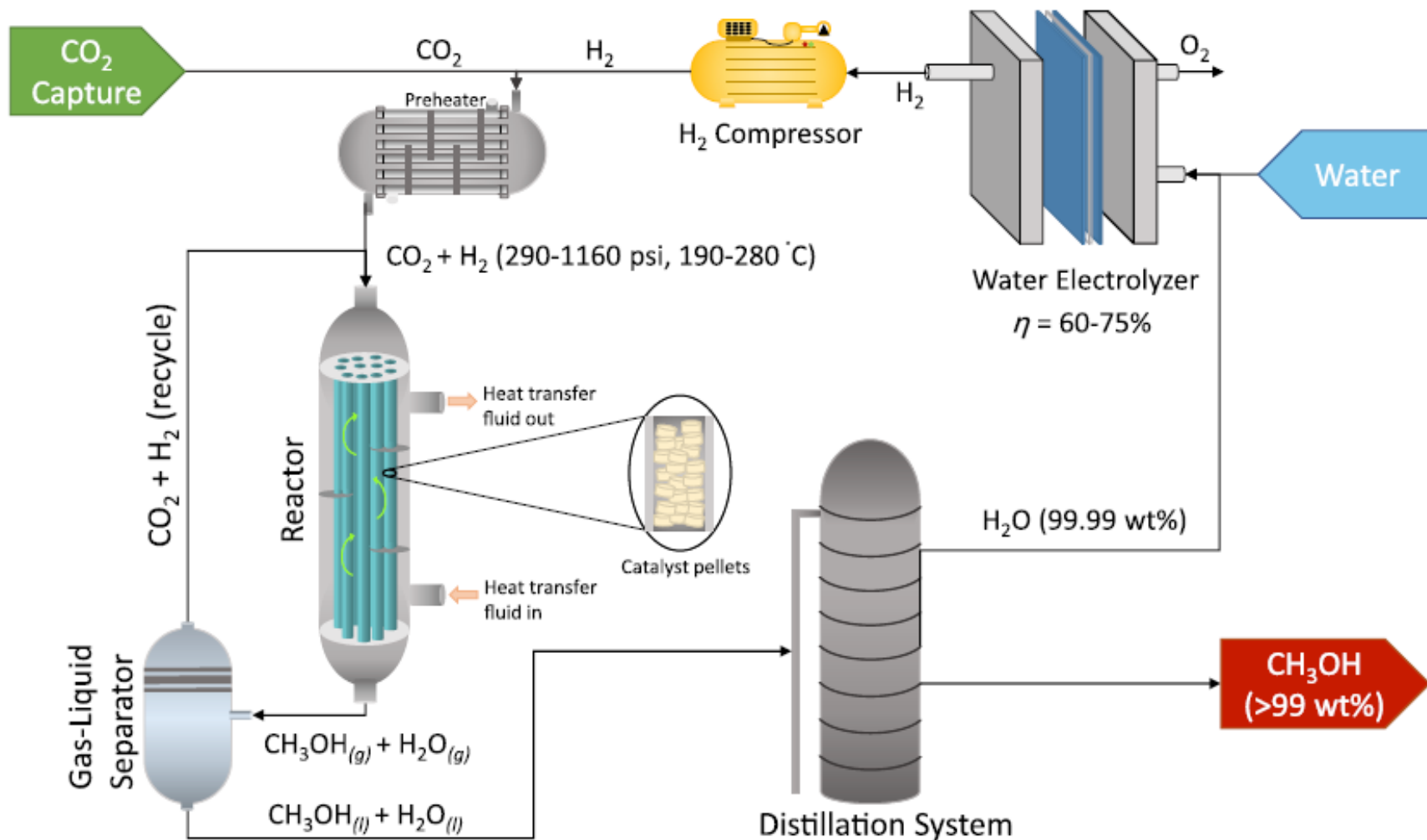
Technologies de production. *Focus sur l'e-méthanol*

La seule voie de synthèse du e-méthanol implémentable à échelle aujourd'hui est celle de la méthanolation, qui consiste à produire de l'hydrogène puis du e-méthanol en deux étapes distinctes. Des recherches sont en cours pour développer deux autres méthodes de production qui permettraient de contourner l'étape d'électrolyse, en la combinant à d'autres procédés, et qui permettraient un meilleur rendement énergétique.

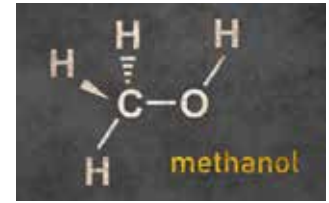


Sources : IEA, Evolen, IRENA

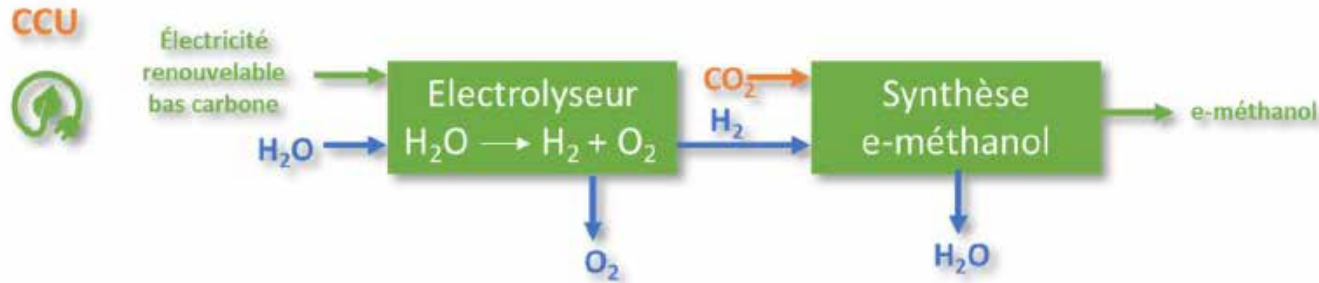
e-Méthanol



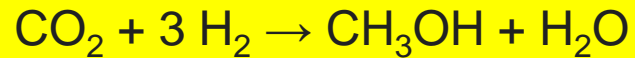
e-Méthanol



- ① Production de méthanol par électrolyse de l'eau suivie d'une synthèse catalytique
Rendement: 48-50% (électrolyse de l'eau + hydrogénation CO₂)



TRL 7-8



- Réaction exothermique : $\Delta H = -49,4 \text{ kJ/mol}$
- Conditions: 5-10 Mpa; 210-270°
- MeOH purifié par distillation
- **Catalyseurs** (Cu/ZnO/Al₂O₃)

Pour 1 Mt méthanol (France)

Ø 1,4 Mt CO₂

Ø 0,2 Mt H₂

Ø 11 TWh électricité (1 EPR)

Pour 10 Mt méthanol

Chimie + transport

Ø 14 Mt CO₂

Ø 2 Mt H₂

Ø 110 TWh électricité (10 EPR)

Prix des e-fuels: sensibilité au prix de H2

MeOH-Prix du marché

1,5 dollar par GGE

1,2 euros par GGE

GGE= gasoline gallon equivalent

équivalent en gallon d'essence

(1 GGE = 3,785 L)

0,4 €/kg

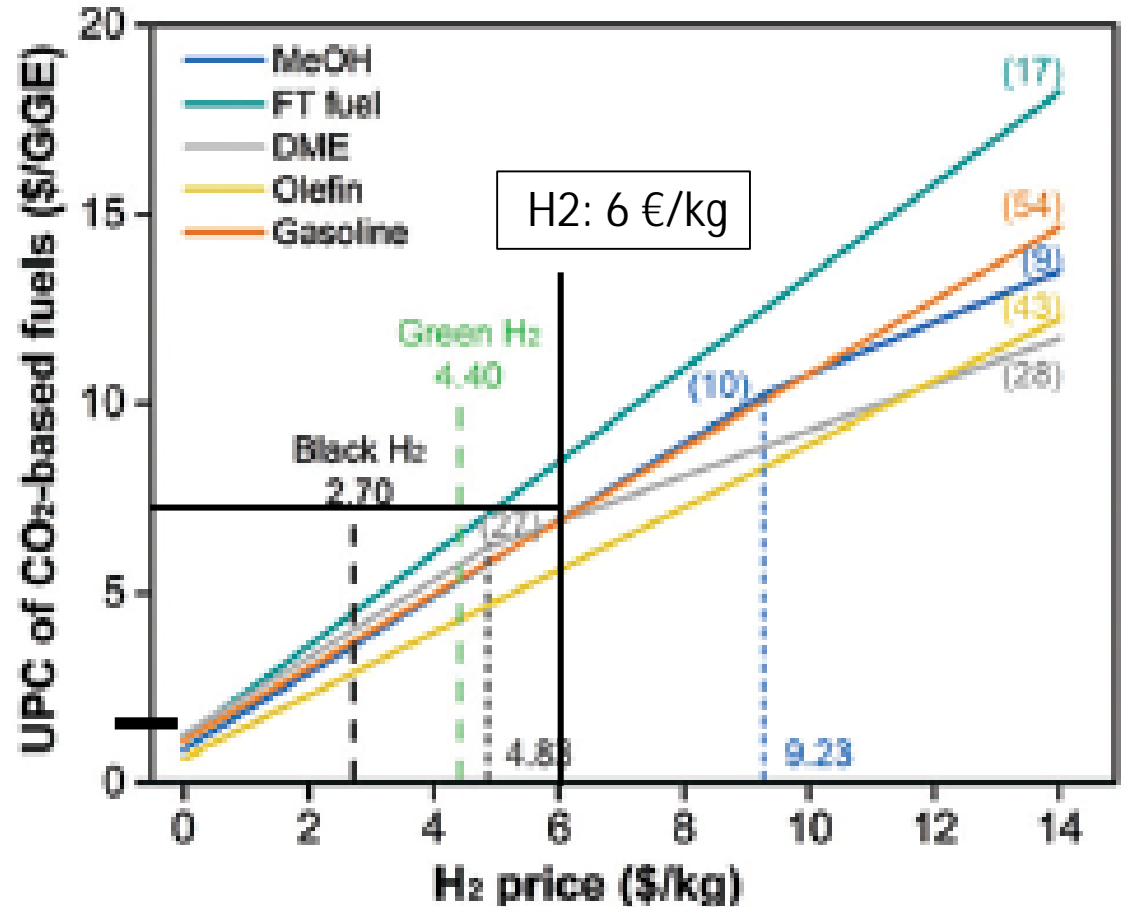
7.5 \$/GGE

6.5 €/GGE

2 €/kg



Un facteur 5



e-carburants: projets

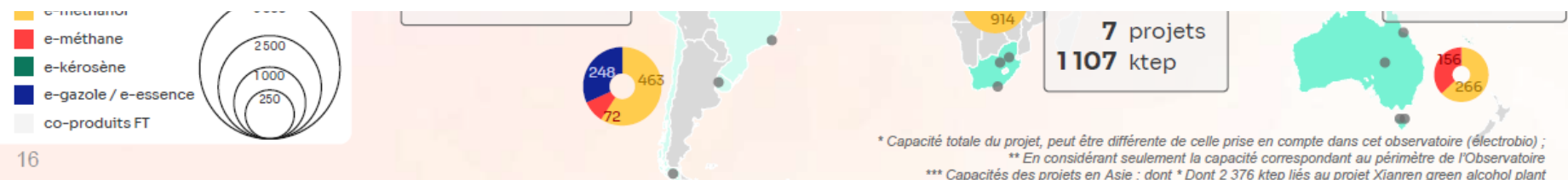
Cartographie des projets.

Sur la base des projets ≥ 50 ktep annoncés publiquement > 0,5 TWh

L'Amérique du Nord, l'Europe et la Chine dominent largement la filière des e-fuels, regroupant 85 % des projets annoncés dépassant les 50 ktep, et une part équivalente en termes de capacité de production. Ces initiatives se concentrent principalement sur l'e-méthanol et l'e-kérosène (respectivement 50% et 25% des capacités annoncées), avec pour objectif de décarboner les secteurs de l'aviation et du transport maritime.

L'Europe concentre 32% des capacités mondiales annoncées. Elle se distingue par l'accent sur les carburants d'aviation durables avec 75 % des capacités mondiales annoncées de production d'e-kérosène. Ce penchant s'explique notamment par un cadre réglementaire favorable – ReFuelEU Aviation – qui inclut un sous-mandat dédié au e-kérosène de 1,2 % dès 2030 qui montera par palier de 5 ans à 35 % en 2050.

L'Europe manque de réalisation. A ce jour, aucun projet n'a franchi l'étape de la décision finale d'investissement, ni démarré sa construction, à l'exception d'un projet d'environ 15 ktep au Danemark, mis en service en mars 2025.



e-carburants: projets

Les filières e-fuels en Europe. Carte des principaux projets, ≥ 50 ktep*

L'Europe est le continent comptant le plus de projets e-fuels supérieurs à 50ktep, principalement de e-kérosène et e-méthanol, en lien avec sa politique contraignante de décarbonation du maritime et de l'aérien.

Légende

Pays concerné par au moins un projet d'implantation

Projets d'e-méthane

Projets d'e-méthanol

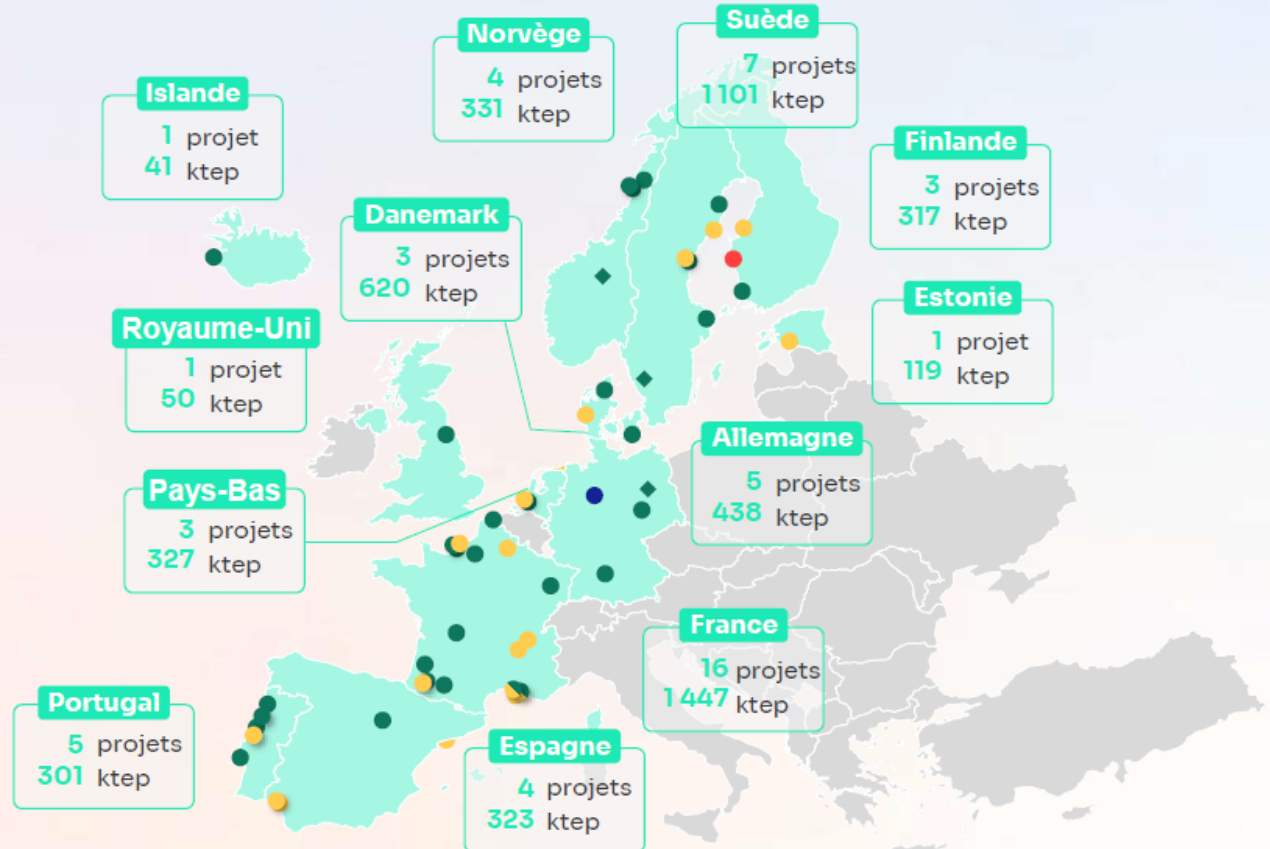
Projets d'e-kérosène

Projets e-gazole/e-essence

Localisation imprécise

Nombre de projets

Somme des capacités de tous les projets en ktep/an**



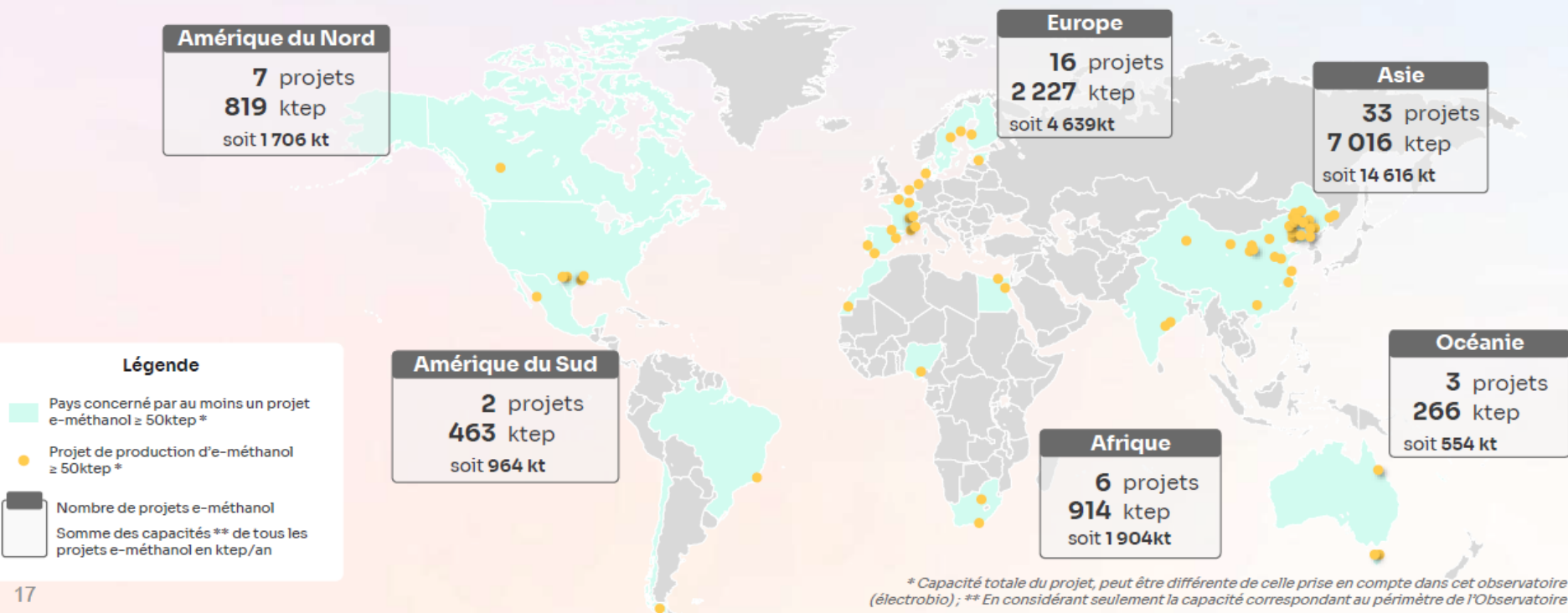
* Capacité totale du projet, y compris co-produits et part biosourcée des e-biofuels
** Hors co-produits et part biosourcée des e-biofuels

e-Méthanol: projets

Cartographie des projets. E-méthanol

Sur la base des projets ≥ 50 ktep annoncés publiquement

La Chine concentre à elle seule plus de la moitié des capacités de production d'e-méthanol annoncées dans le monde, avec des projets plus avancés qu'ailleurs. Elle sera donc très rapidement leader dans la production d'e-méthanol. Cette molécule est **principalement destinée à l'industrie chimique ou au transport maritime**.



Projet	Pays	Mise en exploitation	Acteurs principaux	Capacité (t/an)	Procédé / Source énergie
George Ohla renewable plant	Islande	2011	CRI	4 000	CO ₂ et énergie géothermiques, H ₂ électrolyse
Liquid sunshine	Chine	2020	Dalian Institute of Chemical Physics	1 000	CO ₂ et H ₂ électrolyse (solaire)
Shunli Anyang ⁶	Chine	2022	CRI	110 000	CO ₂ et H ₂ (non électrolytique)
ReIntegrate	Danemark	2023	European Energy	10 000	CO ₂ biogaz et H ₂ électrolyse
The sailboat CO ₂ to green methanol project	Chine	2023	CRI, Jiangsu Sailboat Petrochemicals	100 000	CO ₂ et H ₂ électrolyse
FlagshipOne	Suède	2024	Liquid Wind	50 000	CO ₂ et H ₂ électrolyse
The Finn fjord e-methanol project	Norvège	2024	CRI, Finnfjord, et Statkraft	100 000	CO ₂ ferro-sillicium et H ₂ électrolyse (hydro)
AIR	Suède	2025	Perstorp	200 000	CO ₂ et H ₂ électrolyse
Hynovi	France	2025	Vicat, Hynamics	200 000	CO ₂ ciment et H ₂ électrolyse
eM-Lacq	France	2027	Elyse Energy	200 000	CO ₂ et H ₂ électrolyse
North Sea Methanol	Rodenhuize, Belgique	2024	ArcelorMittal, ENGIE et 8 autres partenaires	65 MW (2024) puis 600MW en 2030 électrolyse 45.000 tonnes de méthanol par an	Energie renouvelable (éolien offshore)

Tableau 4-1 Liste de projets représentatifs de production de e-méthanol (non exhaustif)

Qu'est-ce que le projet Hynovi ?

- **Porteurs du projet** : Vicat (cimentier) + Hynamics (filiale d'EDF spécialisée hydrogène)
- **Objectif** : produire du **méthanol décarboné** (e-méthanol) en captant le CO₂ de la cimenterie de Vicat à Montalieu-Vercieu (Isère) et en le combinant avec de l'hydrogène bas carbone
- **Visée climatique** : capter environ **40 %** des émissions de CO₂ de la cimenterie.
- **Infrastructure prévue** :
 - Un électrolyseur de **330 MW** pour produire l'hydrogène nécessaire.
 - Utilisation de l'oxygène issu de l'électrolyse pour faire de l'oxy-combustion, ce qui facilite le captage de CO₂.
 - Une unité de méthanolisation pour transformer CO₂ + H₂ en méthanol.
- **Production visée** : ~ 200 000 tonnes de méthanol par an.
- **Impact CO₂** : éviter environ **500 000 tonnes de CO₂ par an** par rapport à un méthanol fossile.
- **Calendrier visé** : mise en exploitation du projet autour de **2027**.
- **Statut réglementaire / financement** : le projet a été **pré-notifié** dans le cadre d'un **IPCEI / PIIEC** (Projet Important d'Intérêt Européen Commun) pour l'hydrogène.



Où en est actuellement (2025) ?

- Selon la plateforme *Vig'Hy* (France Hydrogène), le projet est toujours « en cours » avec une mise en exploitation prévue en 2027.
- Dans le “Panorama des projets hydrogène” de France Hydrogène (juillet 2025), Hynovi est bien listé, mais avec une puissance de 180 MW mentionnée, ce qui suggère peut-être un ajustement du plan initial (330 MW).
- Le marché du méthanol décarboné doit exister / être soutenu : il faut des débouchés industriels, des clients (chimie, transport, maritime) pour que la production soit rentable.

Où en est le projet eM-Lacq (Elyse Energy)

- Il vise à produire **88 000 tonnes de e-méthanol** par an sur le bassin de Lacq.
 - L'hydrogène utilisé proviendra d'un électrolyseur (électrolyse de l'eau), alimenté par de l'électricité renouvelable ou nucléaire.
 - Le carbone (CO₂) sera capté localement dans des industries du territoire.
 - Il s'inscrit dans le projet plus large **E-CHO**, qui combine eM-Lacq avec un projet de e-biokérosène ("BioTJet") pour créer un pôle de molécules bas-carbone.
-
- D'après Elyse, la production de ce e-méthanol permet une réduction des émissions de gaz à effet de serre d'au moins **70 %** sur le cycle de vie par rapport au méthanol fossile.
 - Il peut servir à des usages industriels ou comme carburant—notamment pour le transport maritime.
 - Le projet E-CHO (eM-Lacq + BioTJet) prévoit une réduction de **430 000 tonnes de CO₂ par an**.
-
- mise en service progressive : eM-Lacq + HyLacq (hydrogène) en **2027**, BioTJet en **2028**.
 - Le projet E-CHO (incluant eM-Lacq): l'investissement total est estimé à **2 milliards d'euros** selon Elyse. (Elyse Energy indique que les moyens mobilisés pour ses projets en France atteignent **328 millions d'euros**.)



COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—

CO₂, une source de carbone:

2. L'hydrogène

Marc FONTECAVE

*Professeur au Collège de France
Président du Comité de Prospective en Energie
(Académie des Sciences)*

SÉMINAIRE :

Christophe Copéret, Professeur, Professeur, ETH Zurich,
Department of Chemistry and Applied Biosciences,
Zurich, Suisse

« Convertir le dioxyde de carbone en méthanol :
compréhension des processus élémentaires et exploration
de l'espace chimique »