

Atelier thématique – Etagnac | 15 mai 2025



LE PROJET

LiCHEN

Les technologies utilisées



01

Le contexte

02

Capture du CO₂

03

**Production d'hydrogène par
électrolyse**

04

Production du e-méthanol

05

Synthèse du e-SAF & logistique

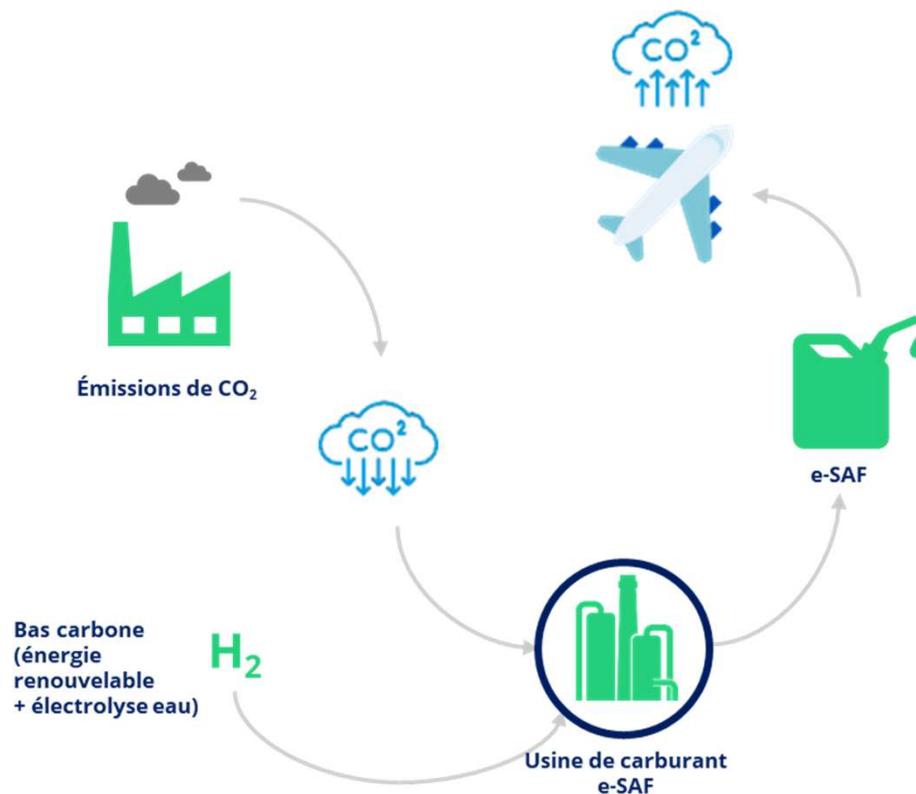


Le Contexte

01

Les e-SAF, une solution d'économie circulaire liant aviation et industrie

L'**aviation commerciale** représentait **3,1 % des émissions de GES mondiales** en 2023 et ce pourcentage pourrait doubler d'ici 2050. Pour décarboner l'aviation, l'**électrique** ou l'**hydrogène** sont des vecteurs intéressants mais **immatures à court terme**. Dès lors, les **carburants de synthèse** sont aujourd'hui **privilegiés** pour la décarbonation du secteur.



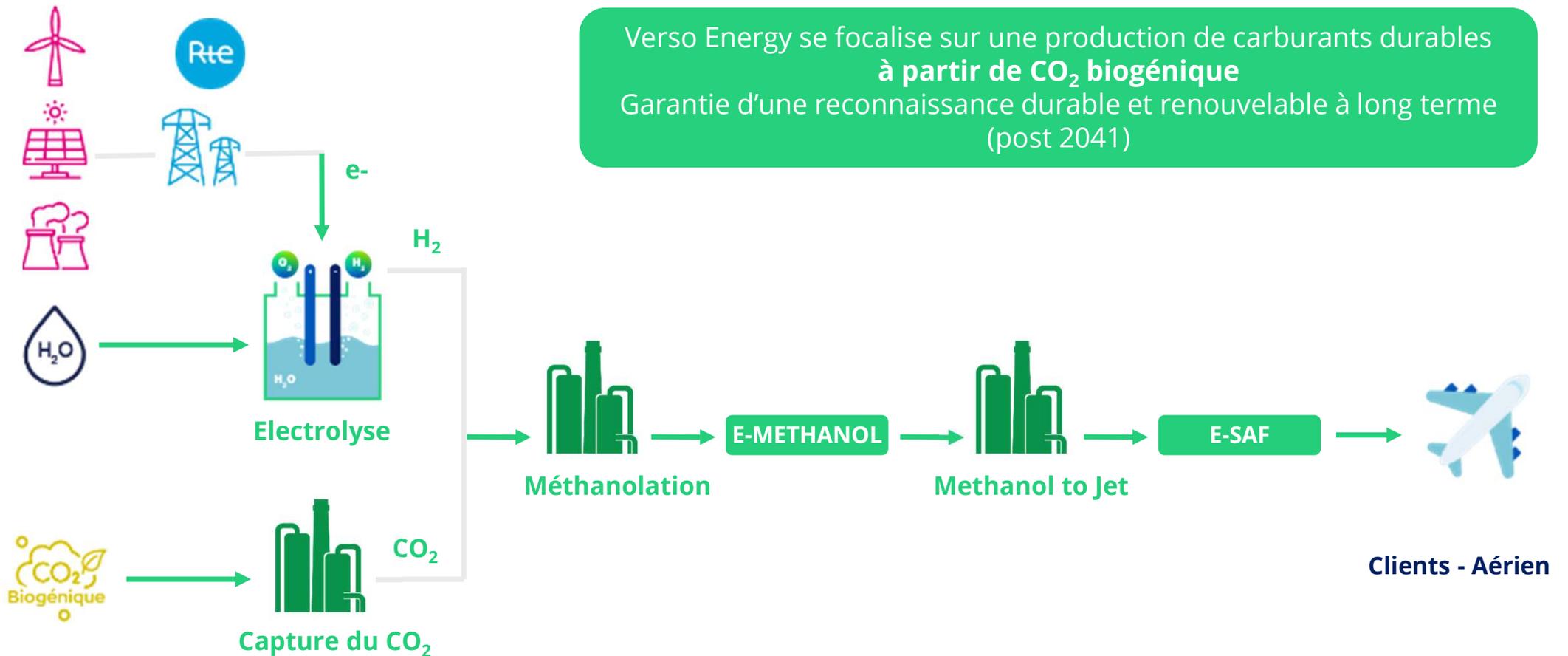
Vert (cas CO₂ biogénique)

Immédiatement Compatible

Grande production

Procédés connus

Verso Energy produit des molécules de synthèse suivant un modèle intégré



A photograph of a large industrial facility, likely a CO2 capture plant, featuring tall distillation columns, complex piping, and scaffolding under a cloudy sky. The image is framed by a dark blue background with a stylized green and blue graphic on the left side.

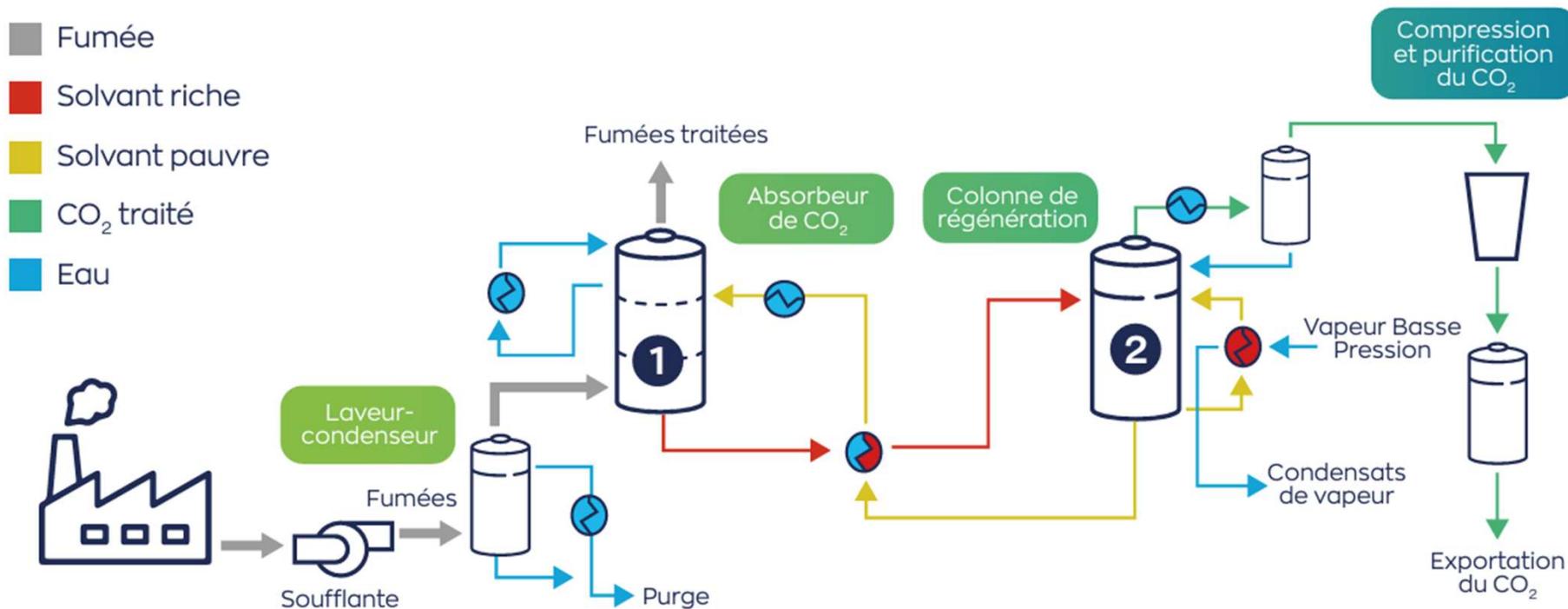
La Capture du CO₂

02

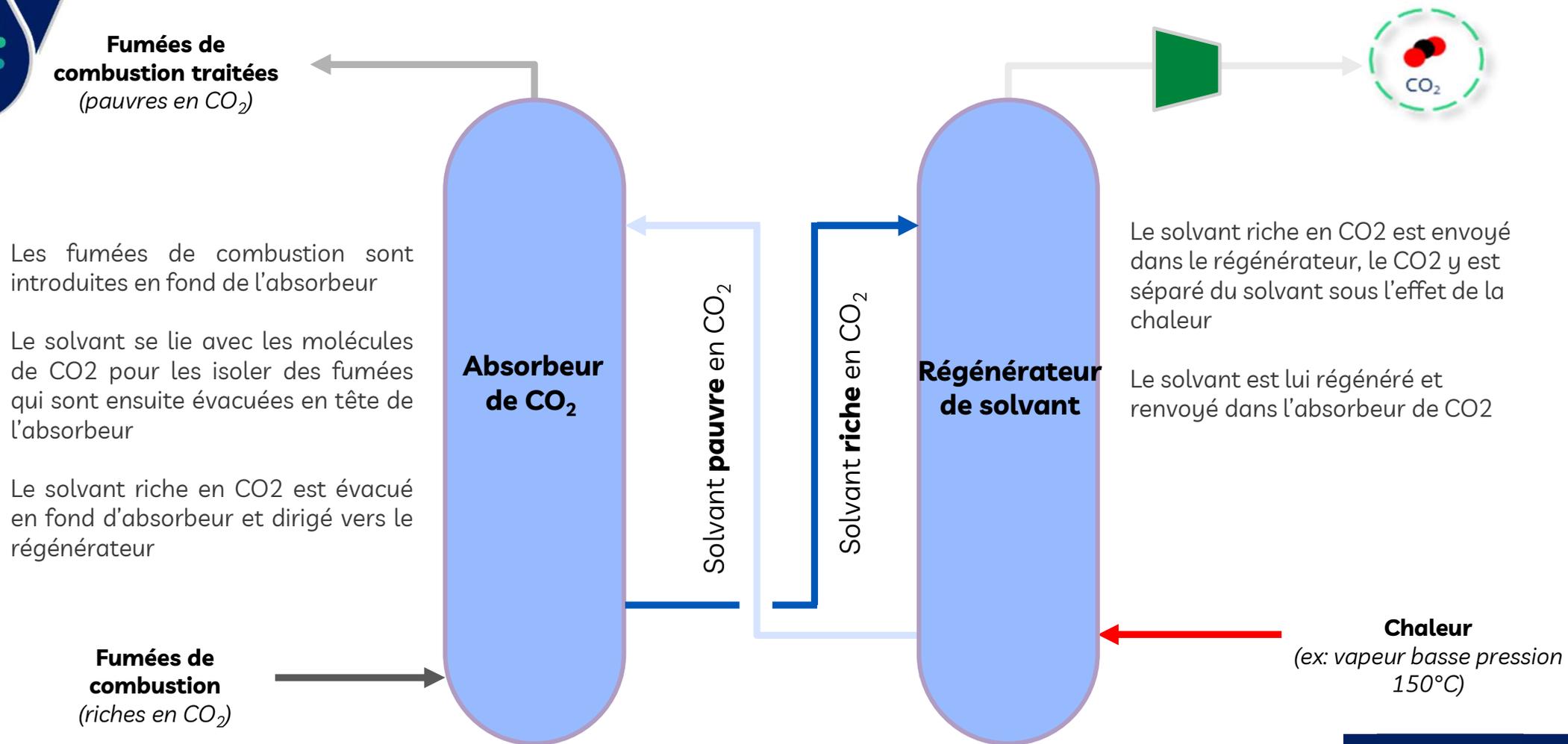
Zoom sur la brique : Capture de CO₂

SCHÉMA BLOC

Les étapes de la capture du CO₂

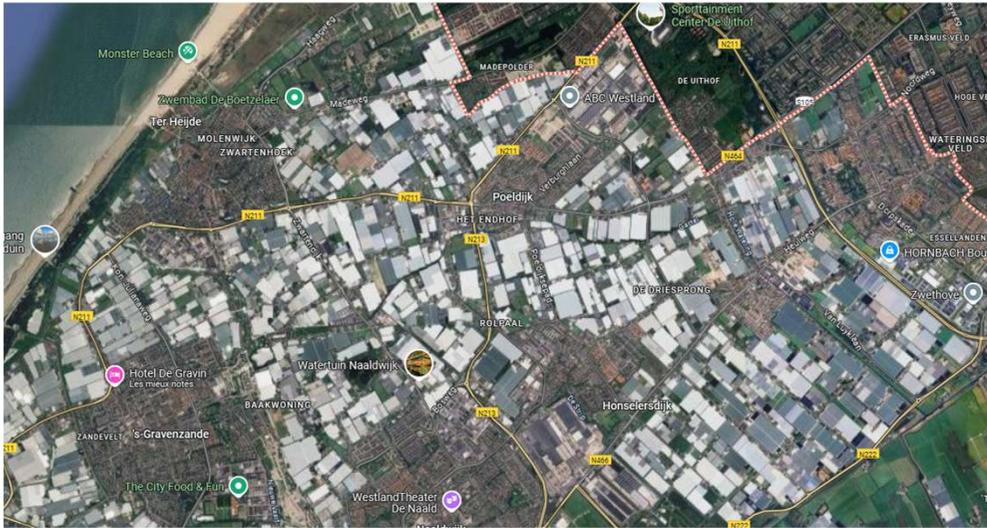


Technologie par absorption avec solvant



Quelles utilisations historiques du CO₂ ?

Serres horticoles au Sud de la Haye

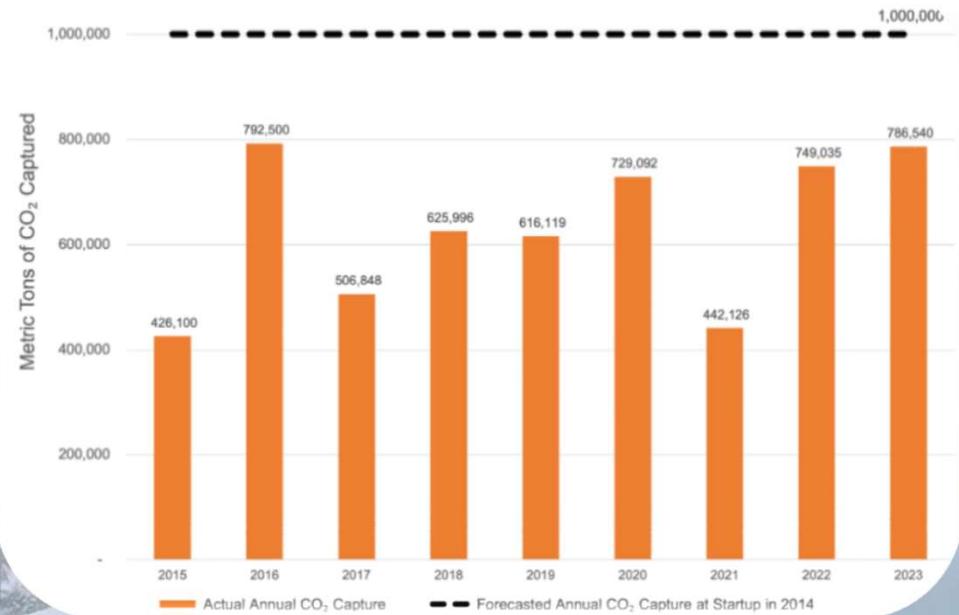


Boissons gazeuses



Le captage de CO₂, ça existe ?

Boundary Dam Carbon Capture Project



Sources: [SaskPower monthly and quarterly Boundary Dam 3 Status Updates](#)

- Canada
- Sask Power
- Mise en service en 2014
- Capacité : 1000 kt/an
- Stocké en cavité souterraine (CCS)

An aerial rendering of a hydrogen production facility. The facility consists of several large, white, rectangular buildings arranged in a cluster. A paved road with white directional arrows curves around the buildings. In the foreground, there are three smaller, green, rectangular structures. The facility is surrounded by lush green trees and a river flows along the left side. The entire scene is framed by a dark blue background with a white and green graphic element on the left side.

Production d'hydrogène par électrolyse

03

Les origines de l'électrolyse

Vemork (Norvège)

Aujourd'hui



Barrage hydraulique

En 1927



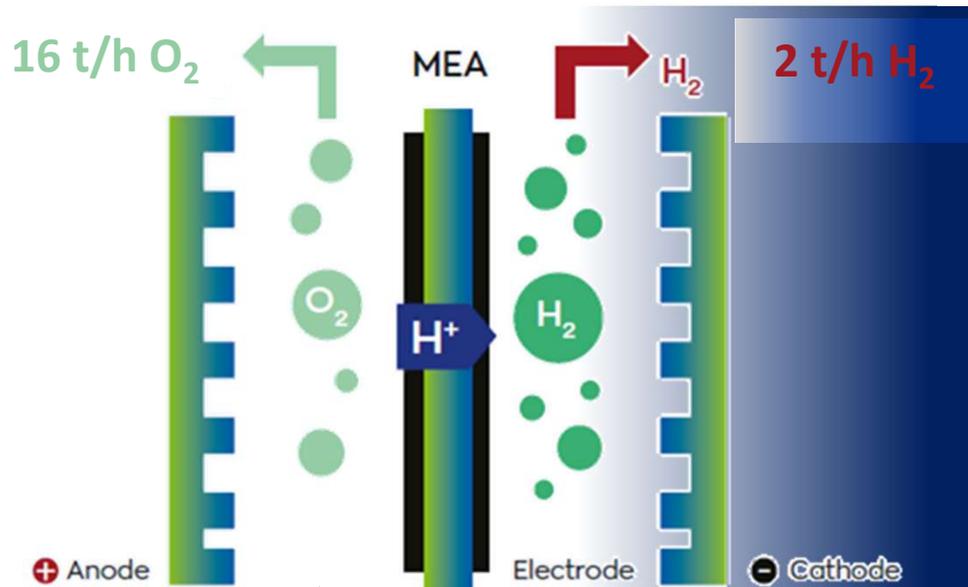
120 MW d'électrolyse
(engrais & eau lourde)

- Absence de développement ? Pas une raison technologique mais ... **économique** (compétition avec le gaz naturel)



- Découverte et compréhension du principe théorique de l'électrolyse: **1800** ! (Carlisle & Nicholson)
- **1900 → 1940**, l'électrolyse (**alcaline**) était la solution privilégiée pour la production d'hydrogène à échelle industrielle

Fonctionnement d'un électrolyseur



▪ Electrolyse de l'eau :

Dissociation de l'eau en hydrogène (H₂) et oxygène (O₂) par l'application d'un courant électrique continu.

▪ Technologie PEM (Proton-Exchange Membrane) :

Technologie d'électrolyse permettant la séparation physique des flux d'H₂ et d'O₂, compacte et particulièrement adaptée aux variations rapides de charge, caractéristiques des profils de production d'énergie renouvelable.

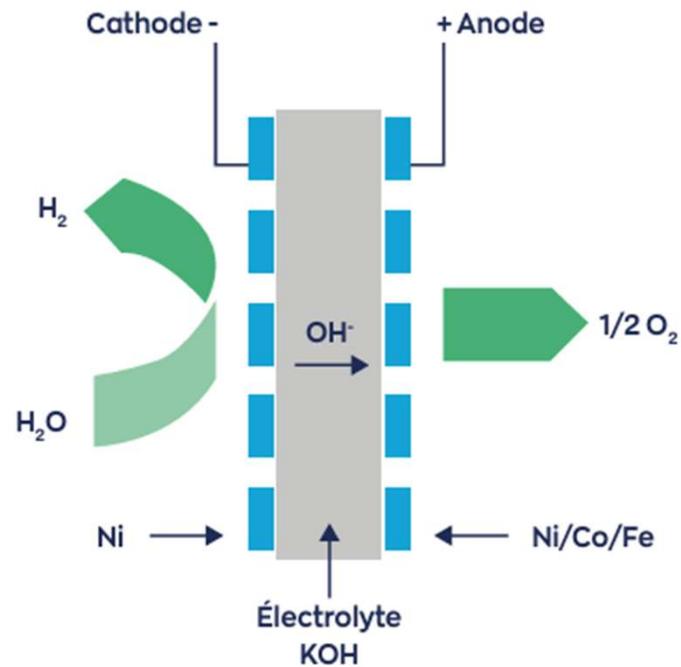
▪ Eau ultrapure :

Eau dépourvue de tous ses minéraux pour éviter toute altération des composants de l'électrolyseur, en priorité ses membranes. Ces minéraux sont évacués dans les eaux concentrées.

PRINCIPE D'UN ÉLECTROLYSEUR PEM DE 100 MWE

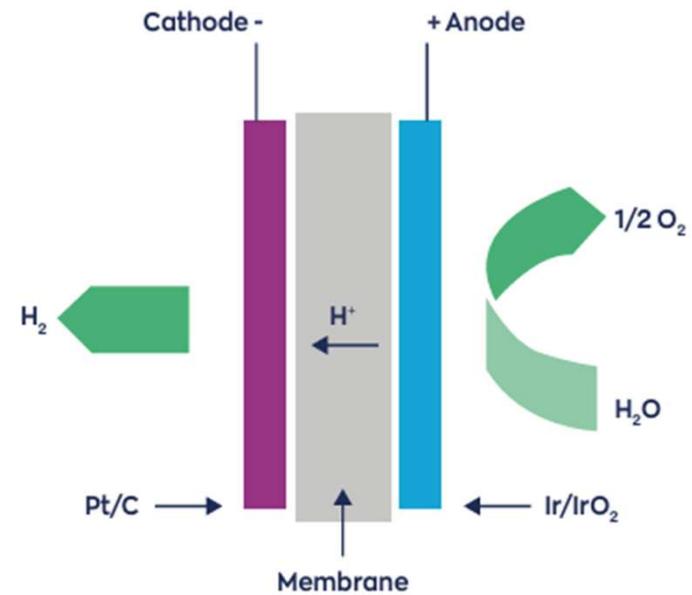
2 technologies envisagées pour l'industrie à moyen terme

Alcaline



PEM

(Membrane échangeuse de proton)





Une filière qui se structure

- 2 technologies envisagées pour l'industrie à moyen terme

Alcaline



+ Références

Plus grande référence en opération: **260 MW**

PEM

(Membrane échangeuse de proton)



+ Flexibilité

Plus grande référence en opération: **40 MW**

- 2 autres technologies en cours d'industrialisation (SOEC & AEM)



Production du e-méthanol

04

Qu'est ce que le méthanol ?



- Le plus simple des **alcools**, un seul atome de carbone (CH_3OH)
- **Liquide** incolore à température ambiante & pression atmosphérique
- Une molécule « plateforme » valorisée en tant que

Intrant matière



Contenu énergétique



MTBE

Biodiesels



- Peut être synthétisée à partir de CO_2 & d'électricité décarbonée → **e-méthanol**

Le e-méthanol, ça existe ?

1^{ère} Référence Industrielle: l'usine George Olah



- Islande
- Carbon Recycling International
- Mise en service en 2012
- H₂ électrolytique
- 4 000 tonnes/an e-MeOH
- Usage : mobilité

Le e-méthanol, quels développements ?

Producteurs



- Kassø (Danemark)
- Développeur : European Energy
- Mise en service : 2024
- Production: 42 000 t/an e-MeOH
- Maritime, chimie et pharmacie

Consommateurs

Importantes commandes de porte-conteneurs*, horizon 2024 - 2026



MAERSK

19 navires

24 navires



24 navires

(*) jusque 400 tonnes/jour (24 000 EVP)

La Synthèse de e-méthanol

① Alimentation des réactifs



② Boucle de Synthèse

③ Séparation des produits



e-méthanol



③ Séparation des produits

Le méthanol issu de la boucle de synthèse est séparé de l'eau co-produite dans un train de distillation. L'énergie thermique nécessaire à cette séparation est apportée majoritairement par l'énergie excédentaire générée dans la boucle de synthèse.

① Alimentation des réactifs

Les flux d'H₂ et de CO₂ purs sont mélangés puis comprimés à haute pression dans les proportions et conditions optimales pour la réaction de synthèse de méthanol

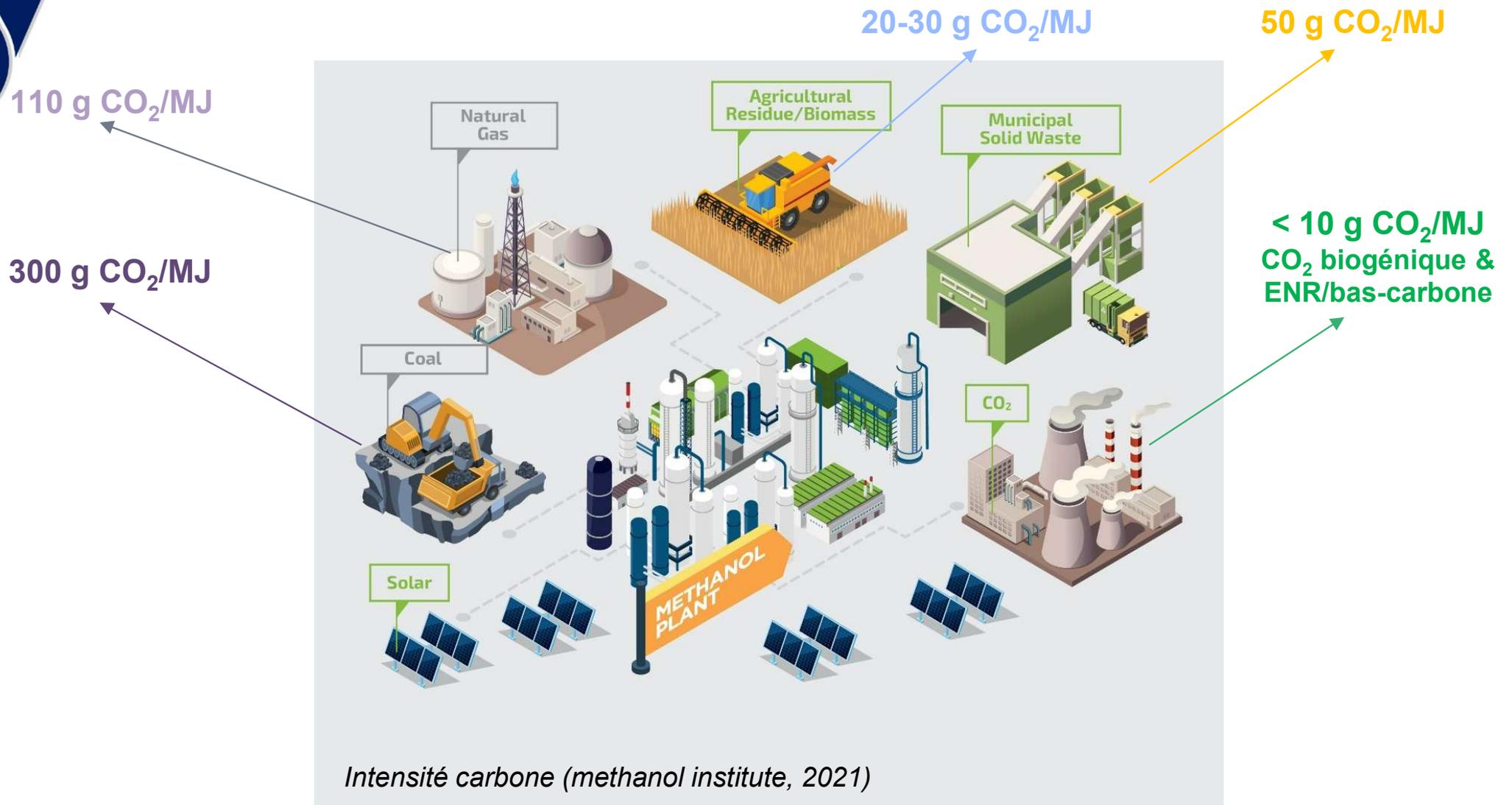
② Boucle de Synthèse

Le mélange réactionnel est chauffé et alimenté à un réacteur contenant un catalyseur dont l'action permet la transformation du CO₂ et de l'H₂ en méthanol:



La chaleur nécessaire à chauffer le mélange réactionnel est apportée par la réaction de synthèse du méthanol. Cette chaleur est récupérée au sein du réacteur catalytique et sur ses produits (**réaction exothermique**). Afin de valoriser la globalité du CO₂ et de l'H₂ alimentés à l'unité, les composés n'ayant pas réagis en sortie du réacteur catalytique sont recyclés en entrée du système

Intensité carbone de la production du méthanol





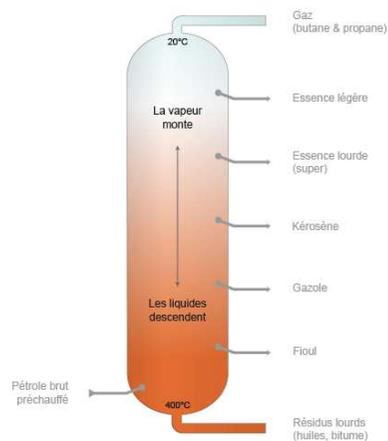
**Synthèse du e-SAF
& logistique**

05

Qu'est ce que le carburant d'avion ?

- Appelé aussi kérosène (souvent aussi Jet A1), c'est une chaîne carbonée avec 8 à 16 atomes de carbones (alkane C_nH_{2n+2})
- **Liquide** et **stable** à température ambiante & pression atmosphérique
- Embarqué dans les réservoirs des avions commerciaux, fret, militaire... répondant à des normes internationales (ASTM D1655...)

Intrant matière



Obtenu par **raffinage** et **distillation** du pétrole

Contenu énergétique

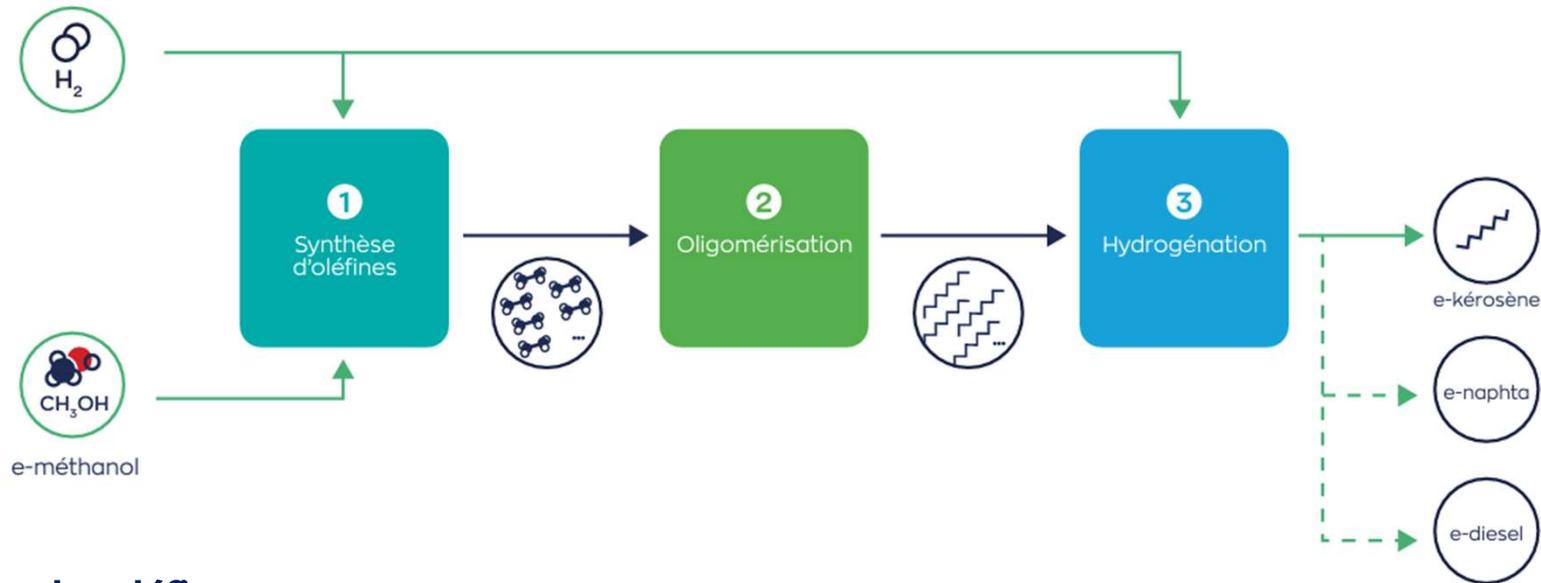
Une densité énergétique très importante de **43,15 MJ/kg**



Grande autonomie et adaptabilité aux conditions de vol et d'aéroports

- Peut aussi être synthétisé à partir d'huiles végétales & produits agricoles (SAF) ou d'**e-méthanol**

Synthèse de e-SAF : MTJ = Methanol to Jet



① Synthèse des oléfines

Le e-méthanol est vaporisé puis décomposé à haute température en eau et en oléfines en présence d'un catalyseur.

② Oligomérisation

Le procédé consiste à faire réagir au cours de plusieurs étapes successives les oléfines légères en présence d'un catalyseur pour créer des chaînes carbonées de poids moléculaire plus important, similaire au kérosène conventionnel.

③ Hydrogénation

Etape finale du procédé visant à saturer par hydrogénation des chaînes carbonées avec de l'hydrogène produisant du e-kérosène (e-SAF) et des sous produits.

La synthèse de e-fuel, ça existe ?

Projet Haru-Oni



- Chili
- Procédé Methanol to Gasoline (MTG)
- Mise en service en 2022
- 130 000 litres par an

Méthanol to oléfines



- Chine
- Procédé Methanol-to-oleifin
- 6 unités actuellement en service depuis 2013
- Jusqu'à 800 000 tonnes d'oléfine par an

Les réseaux pouvant transporter le e-SAF



- Mélange de e-SAF avec du kérosène dans des dépôts pétroliers existants (*blending*)
- Des réseaux existants desservent les aéroports en carburant (canalisation Le Havre-Paris, réseau OTAN européen)

— LHP Le Havre - Paris

— PMR - Pipeline Méditerranée/Rhône

— CEPS Central European Pipeline System ou OCD Oléoducs de Défense Commune de l'OTAN (en français)

La logistique ferroviaire pour se connecter aux réseaux existants



- 153 kt/an de e-SAF transporté, soit 100% du volume prévisionnel
- 3-5 rames de 15 wagons par semaine



- Impacts économiques et environnementaux réduits en remplaçant le transport routier par le transport ferroviaire



Conclusion

- Un carburant d'**intérêt, directement utilisable par l'aviation** offrant une solution pour un secteur difficile à décarboner
- Un procédé de production à **échelle industrielle utilisant des technologies matures**
- Une **chaîne logistique maîtrisée**, s'appuyant sur des infrastructures existantes



Echange



MERCI

Retrouvez-nous sur : <https://verso.energy/>



49 bis avenue Franklin D. Roosevelt
75008 PARIS

