



Illustrations de quelques défis technologiques de la chaîne CCUS

(Carbon Capture, Utilisation and Storage)

Lucie Prost, VP R&D Europe & AMEI (America, Africa, Middle East & India)



Air Liquide en bref

Notre territoire scientifique :

Les petites molécules essentielles

Oxygène, azote et hydrogène sont des petites molécules essentielles.
Elles incarnent le territoire scientifique d'Air Liquide et sont au cœur du métier du Groupe.

Séparer les **composants de l'air**
pour utiliser leurs propriétés



OXYGÈNE



AZOTE



ARGON
ET GAZ RARES

Maîtriser des molécules à partir
des **ressources naturelles** de la planète



HYDROGÈNE



HÉLIUM

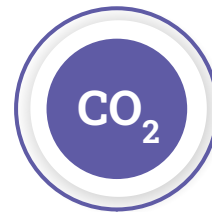


SILANE



MONOXYDE DE
CARBONE

Gérer des
molécules clés



DIOXYDE DE
CARBONE

Innovation & Technologie chez Air Liquide

Chiffres clés



+ 300 M€

Dépenses pour l'innovation



+ 6 500

employés



366

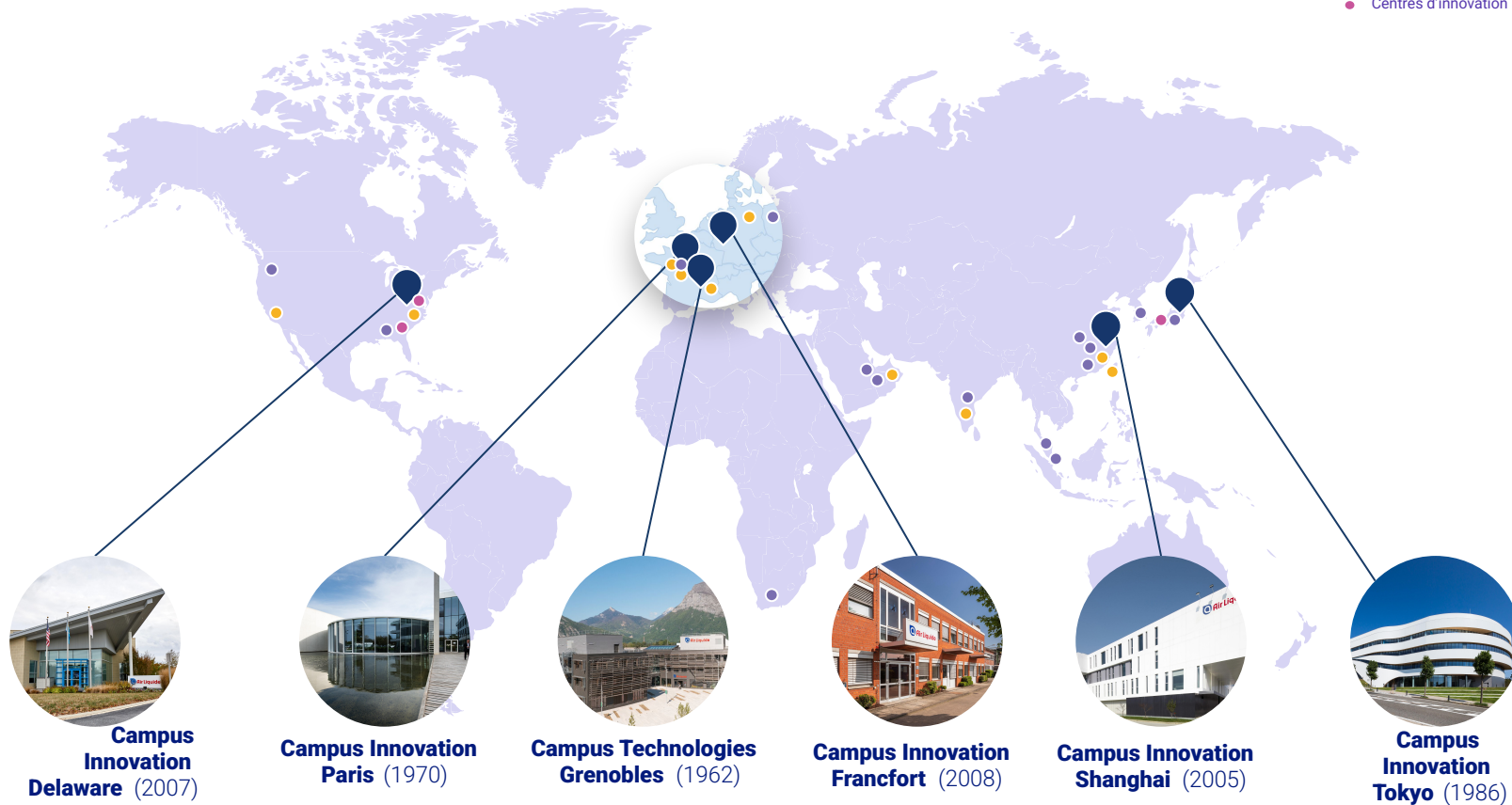
Nouveaux brevets (2024)



Accélérer l'innovation

L'adoption d'une approche en écosystème

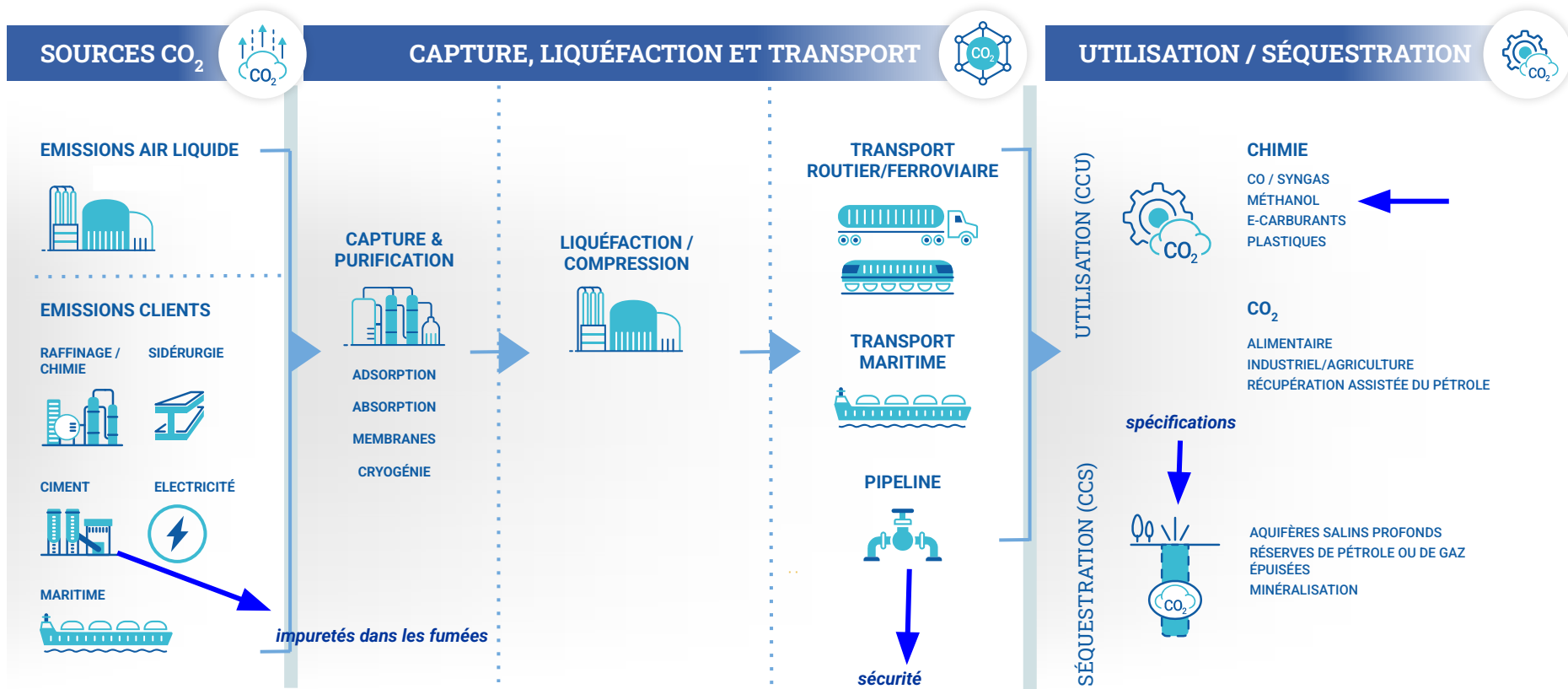
- Centres de fabrication
- Centres d'innovation matériaux avancés



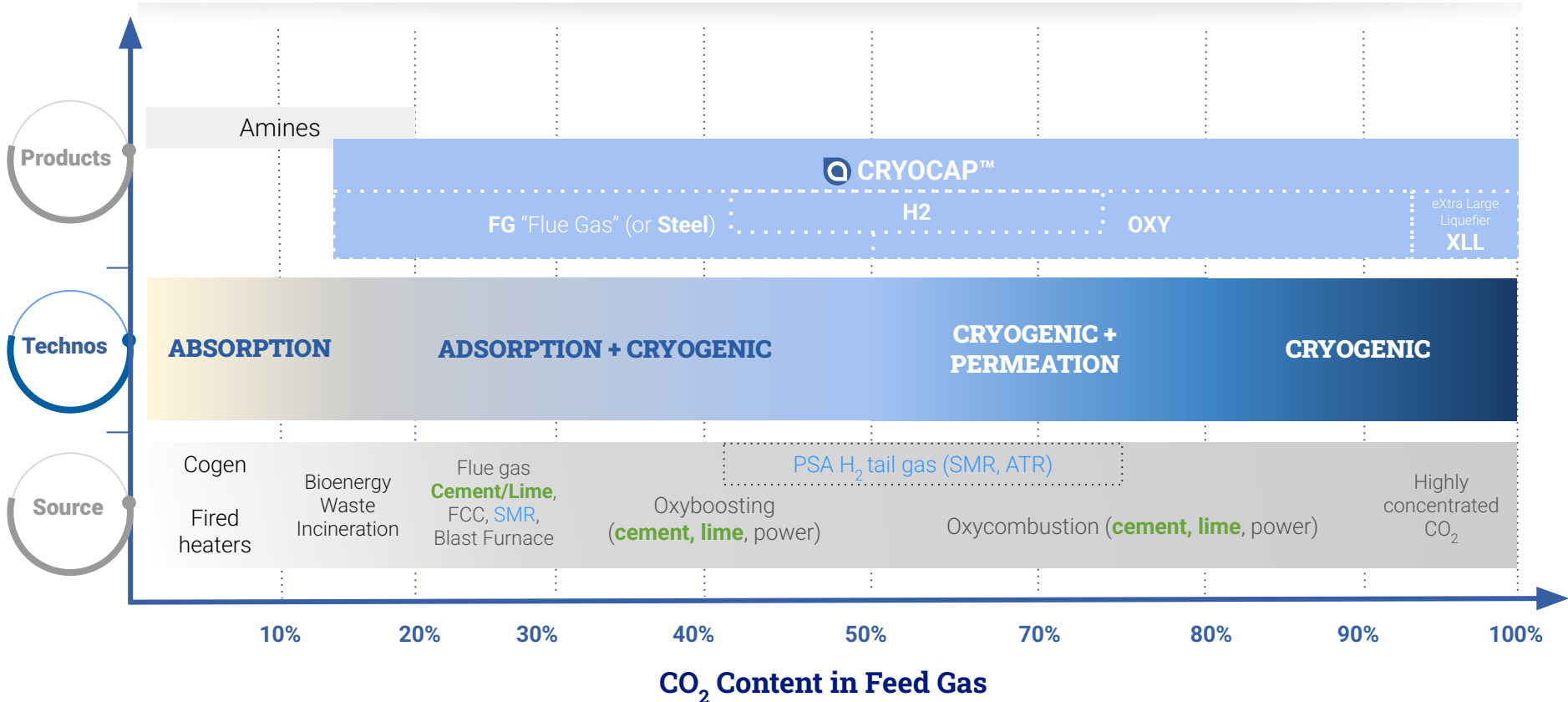


Technologies & défis du captage du CO₂

Chaîne de valeur du CO₂, CCU et CCS



Air Liquide technology mapping for CO₂ capture on low pressure streams



Du laboratoire à l'usine: innover aujourd'hui pour relever les défis de demain

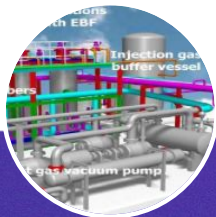
CO₂

Capter le carbone des industries les plus difficiles à décarboner

Projets financés par le FIE et le CEF



Futurs projets pour décarboner les industries de la chaux et du ciment en France et en Europe



2006

Premières études conceptuelles de **Cryocap™** et essais technologiques individuels.



2008-12

Trois essais pilotes complets (~70, 75 et 200 tonnes de CO₂ par jour).



2015

Première usine de capture de carbone au monde pour produire de l'hydrogène bas carbone à Port-Jérôme, France.



2021

"Kairos@C", la plus grande chaîne de valeur CCS transfrontalière du monde, développée avec BASF.



2024

Près de Rotterdam, dans le cadre du projet **Porthos**, le plus grand programme de réduction des émissions de CO₂ des Pays-Bas, Air Liquide décarbonera son propre site de production d'hydrogène

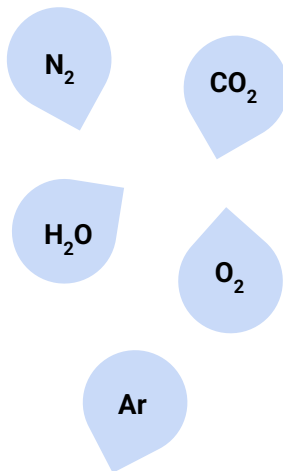
Impuretés dans les fumées

Principaux défis

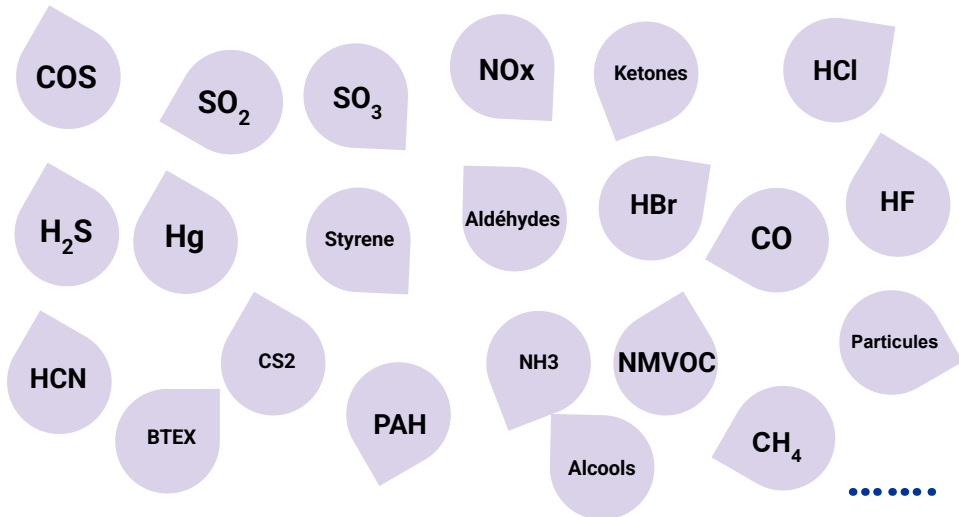
- Compatibilité matériaux
- CO2 specifications
- Solidification pour les procédés cryogéniques
- Dégradation de catalyseurs en CCU

.....

Composants principaux



Impuretés



CO2 quality requirements



CCS-ARAMIS Project

Specification for CO2 supplied to Aramis via:

Class	Component	Constraint	unit	Ships	Pipeline infrastructure
Inerts	CO2	larger than	mol%	balance	95
	H2O	less than	ppmmol	30	70 ⁽¹⁾
	N2	less than	mol%	-	2.4
	O2	less than	ppmmol	10	40
	H2	less than	ppmmol	500	7500
	Ar	less than	mol%	-	0.4
	CH4	less than	mol%	-	1
sulphur	CO	less than	ppmmol	1200	750
	O2+N2+H2+Ar+CH4+CO	sum less than	ppmmol	2000	40000
	NOx	sum less than	ppmmol	1.5	2.5 ⁽⁴⁾
	SOx	sum less than	ppmmol	10	-
	H2S	less than	ppmmol	5	5
	CarbonylSulphide	less than	ppmmol	-	-(1)
	DimethylSulphide	less than	ppmmol	-	-(1)
Volatile organic components	H2S + COS + SOx + DMS	sum less than	ppmmol	-	20
	Amine	less than	ppmmol	10	1
	Formaldehyde	less than	ppmmol	20	-
	Acetaldehyde	less than	ppmmol	20	-(1)
	Aldehydes	sum less than	ppmmol	-	10
	carboxylic acids & amides	sum less than	ppmmol	-	1
	phosphorus-containing compounds	sum less than	ppmmol	-	1
	NH3	less than	ppmmol	10	3
	Ethylene (C2H4)	sum less than	ppmmol	-	-(1)
	H-Cyanide (HCN)	less than	ppmmol	-	2
Heavies	Total volatile organic compounds (excl. MeOH, EtOH, aldehydes)	sum less than	ppmmol	10	10
	Methanol	less than	ppmmol	40	620
	Ethanol	less than	ppmmol	20	20
	glycols (TEG)	sum less than	-	-	Follow dew-point specification
	C2+ (aliphatic hydrocarbons)	sum less than	ppmmol	-	1200
	Aromatic Hydrocarbons	sum less than	ppmmol	-	0.1
	Hg	less than	ppbml	30	-
Metals	Cadmium + Thallium	sum less than	ppbml	30	-
Dew-point	Dew point (any liquid phase)	sum less than	°C (@ 20 bar)	-	-10 ⁽²⁾
Solids	Full removal cut-off diameter	Less than	micron	1 ⁽³⁾	1 ⁽³⁾

CO2 specifications

Component	Mole Base
CO2	≥ 95%
H2O	≤ 70 ppm
Sum [H2+N2+Ar+CH4+CO+O2]	≤ 40%
H2	≤ 0.75%
N2	≤ 2.4%
Ar	≤ 0.4%
CH4	≤ 1%
CO	≤ 750 ppm
O2	≤ 40 ppm
Total sulfur-contained compounds (COS, DMS, H2S, SOx, Mercaptan)	≤ 20 ppm Of which H2S ≤ 5 ppm
Total NOx	≤ 5 ppm
Total aliphatic hydrocarbons (C2 to C10) ^y	≤ 1200 ppm
Total aromatic hydrocarbons (C6 to C10, incl. BTEX) ^y	≤ 0.1 ppm
Total volatile organic compounds ^z (excl. methane, total aliphatic HC (C2 to C10), methanol, ethanol, and aldehydes)	≤ 10 ppm
Total aldehyde compounds	≤ 10 ppm
Ethanol	≤ 20 ppm
Methanol	≤ 620 ppm
Hydrogen cyanide (HCN)	≤ 2 ppm
Total amine compounds	≤ 1 ppm
Total glycol compounds	Follow dew point specification
Ammonia (NH3)	≤ 3 ppm
Total carboxylic acid and amide compounds	≤ 1 ppm
Total phosphorus-contained compounds	≤ 1 ppm
Toxic compounds ^{ll}	
Dew point limit value measurement (for all liquids, i.e. for complete CO2 composition)	< -10 °C (at 20 bara)

Note I: Specification values are molecular based
Note II: VOC definition according to Dutch policy
Note III: Toxic compounds: although CO2 and other gases like i.e. H2 and N2 can form a risk of asphyxiation, Porthos would like to know other components within the stream which impose a risk on personal safety to be taken into account in Porthos HSE policy



Liquid CO2 (LCO2) Quality Specifications		
Component	Unit	Limits for CO2 Cargo within Reference Conditions ¹
Carbon Dioxide (CO2)	mol-%	Balance (Minimum 99.8%)
Water (H2O)	ppm-mol	≤ 30
Oxygen (O2)	ppm-mol	≤ 10
Sulphur Oxides (SOx)	ppm-mol	≤ 10
Nitrogen Oxides (NOx)	ppm-mol	≤ 15
Hydrogen Sulfide (H2S)	ppm-mol	≤ 9
Amine	ppm-mol	≤ 10
Ammonia (NH3)	ppm-mol	≤ 10
Formaldehyde (CH2O)	ppm-mol	≤ 20
Acetaldehyde (CH3CHO)	ppm-mol	≤ 20
Mercury (Hg)	ppm-mol	≤ 0.0008
Carbon Monoxide (CO)	ppm-mol	≤ 100
Hydrogen (H2)	ppm-mol	≤ 50
Cadmium (Cd), Thallium (Tl)	ppm-mol	Sum ≤ 0.03
Methane (CH4)	ppm-mol	≤ 100
Nitrogen (N2)	ppm-mol	≤ 50
Argon (Ar)	ppm-mol	≤ 100
Methanol (CH3OH)	ppm-mol	≤ 30
Ethanol (C2H5OH)	ppm-mol	≤ 1
Total Volatile Organic Compounds (VOC) ²	ppm-mol	≤ 10
Mono-Ethylene Glycol (MEG)	ppm-mol	≤ 0.005
Tri-Ethylene Glycol (TEG)	ppm-mol	Not allowed
BTEX ³	ppm-mol	≤ 0.5
Ethylene (C2H4)	ppm-mol	≤ 0.5
Hydrogen Cyanide (HCN)	ppm-mol	≤ 100
Aliphatic Hydrocarbons (C2+) ⁴	ppm-mol	≤ 1,100
Ethane (C2H6)	ppm-mol	≤ 75
Solids, particles, dust	Micro-meter (µm)	≤ 1



Updated component

Updated component

Moved to solids

New component

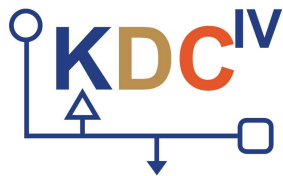
<https://www.aramis-ccs.com/files/13032025-ARM-CPT-BB8-PRO-MEM-0033-rev-6.2-public-version-NEW.pdf>

<https://www.porthosco2.nl/wp-content/uploads/2021/09/CO2-specifications.pdf>

https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2024/03/Northern-Lights-GS-co2-2024_03.pdf

Different consortiums / Joint Industry Projects, examples

- Lack of data on solutions to mitigate impurities impacts
- Current recommendations impurities limits very low (ppm)
- Uncertainty regarding corrosive and solid-forming during storage and transport
- Lack of official european standards → CEN/TC 474 in progress



IFE (KDC-IV) Dense
phase CO₂
corrosion



European project :
HORIZON-CL5-2025
-D3-25

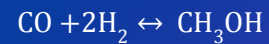
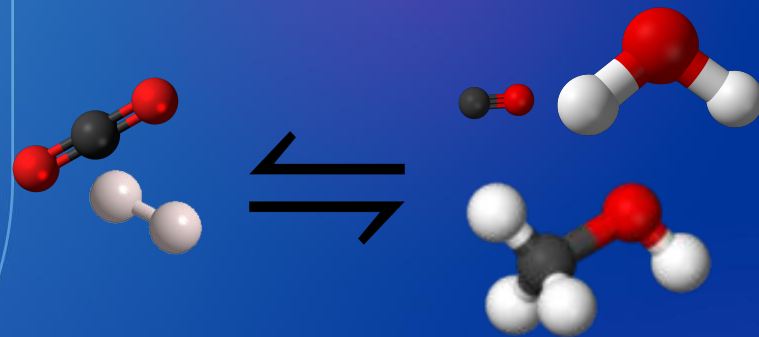
Safety standards in CO₂ pipelines operations



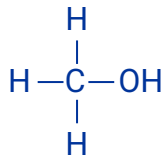
- Working group
GESIP CO₂
- JIP Skylark
- EPRG



Exemple de CCU CO₂ to Methanol



Methanol can Play a Key Role in Decreasing GHG Emissions in Global Shipping



Methanol poses **lower environmental risks** compared to conventional fuels

Up to

80%

Of **CO₂ emission savings** are possible by **switching** from conventional fossil-based maritime fuels **to methanol**

246

Container vessels operated or on-order capable of **running on methanol**¹



¹ Source: [DNV](#) (as of 15 October 2024)



Renewable H₂



Bio
CO₂

Mapping bio-CO₂
feedstocks for its
conversion into
Maritime Methanol



CO₂ to MeOH
Synthesis

Demonstrating
production of Maritime
Methanol from CO₂



GEN2 CO₂
to MeOH

Development of a new
reactor concept (GEN2)
for methanol synthesis



Simplified
Purification

Development of a
simplified process for
production of Maritime
Methanol



Engine Tests

Validation of the
new Maritime
Methanol in marine
engines



Roadmap

Value chain analysis and
scale-up roadmap for the
production of
Maritime Methanol

CCUs : la valorisation du CO₂

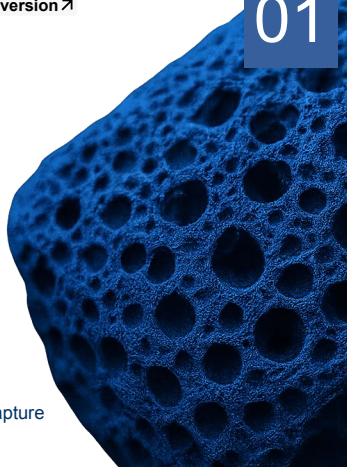
Accompagnement par Accelair de la startup Aerleum

Introduction de l'utilisation directe du carbone: DCU®.

Aerleum a inventé un procédé novateur (DCU®) permettant la conversion directe du CO₂ en méthanol grâce à une combinaison propriétaire d'architecture de réacteur, de matériaux bifonctionnels et de gestion thermique à haute efficacité.

Adsorption ↗ Conversion ↗

01



Un matériau permettant la capture et la conversion in-situ.

CAPEX ↘

02



Un processus intégré, un système deux étapes.

Speed ↗

03



Un système électrifié avec chauffage rapide et haute efficacité.

Aerleum®

Développement des technologies pour le captage et la conversion du CO₂ en e-carburants et produits chimiques

ACCEL[^]AIR
by Air Liquide

Conclusions

Défis

Spécifications CCS vs impuretés dans les fumées

Renchérissement des technologies avec des spécifications de plus en plus exigeantes

Méthodes d'échantillonnage et d'analyse

Comités de normalisation en même temps que des projets industriels !



Perspectives

Un travail commun de tous les acteurs de la chaîne de valeur

Des innovations pour diminuer le coût total d'exploitation

Des aides nationales et de l'Europe pour travailler sur ces sujets



Merci !
