

# CARNAUTO

---

L'hydrogène pour la mobilité, quelles opportunités pour les PME/ETI?

Nicolas des Courtils, Institut CARNOT IFPEN TRANSPORT

Direction Economie et Veille



Plus d'innovations pour la compétitivité des PME de l'automobile et de la mobilité

# CARNAUTO

---

Stockage et distribution d'hydrogène

Nicolas des Courtils, Institut CARNOT IFPEN TRANSPORT

Direction Economie et Veille



Plus d'innovations pour la compétitivité des PME de l'automobile et de la mobilité

# SOMMAIRE

- I. Présentation de CARNAUTO
- II. Pourquoi faut il s'intéresser à la filière hydrogène **maintenant** ?
- III. Quels sont les atouts de l'hydrogène ?
- IV. La série de webinars et la chaine de valeur de l'hydrogène
- V. Le stockage et la distribution de d'hydrogène
  - a. Acheminement par conduite
  - b. Acheminement par bateau
  - c. Acheminement par camion
  - d. Le stockage d'hydrogène
- VI. Conclusion
- VII. Sources d'informations et de documentations

# CARNAUTO?

Qui sommes nous ?

# Les instituts Carnot

---

## La recherche pour les entreprises

- Les instituts Carnot : **structures de recherche publiques** qui prennent des engagements forts pour développer la **recherche partenariale** au bénéfice de **l'innovation des entreprises** – de la PME au grand groupe – et des acteurs socio-économiques. Le réseau regroupe 39 instituts Carnot (labellisés par l'ANR). Plus d'info : <http://www.instituts-carnot.eu/fr>
- Carnauto : 9 instituts Carnot impliqués dans la filière automobile et mobilité. Objectif : **renforcer la compétitivité et l'attractivité** des ETI, PME et TPE en facilitant leur accès à l'innovation.

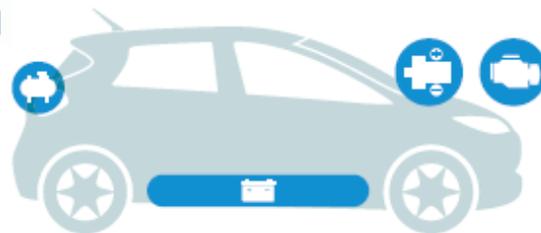
# L'action filière Carnauto

## 3 défis d'avenir pour la filière automobile et mobilité

1

### MOTORISATIONS ET VECTEURS ÉNERGÉTIQUES

- Thermique et hybride
- Électrique et systèmes de stockage associés
- Pile à combustible et systèmes de stockage associés



2

### MATÉRIAUX ET ARCHITECTURES

- Allègement
- Fonctionnalisation intelligente
- Sécurité



3

### TIC ET MOBILITÉ

- Aide à la conduite
- Gestion de la mobilité
- Architecture logicielle et système



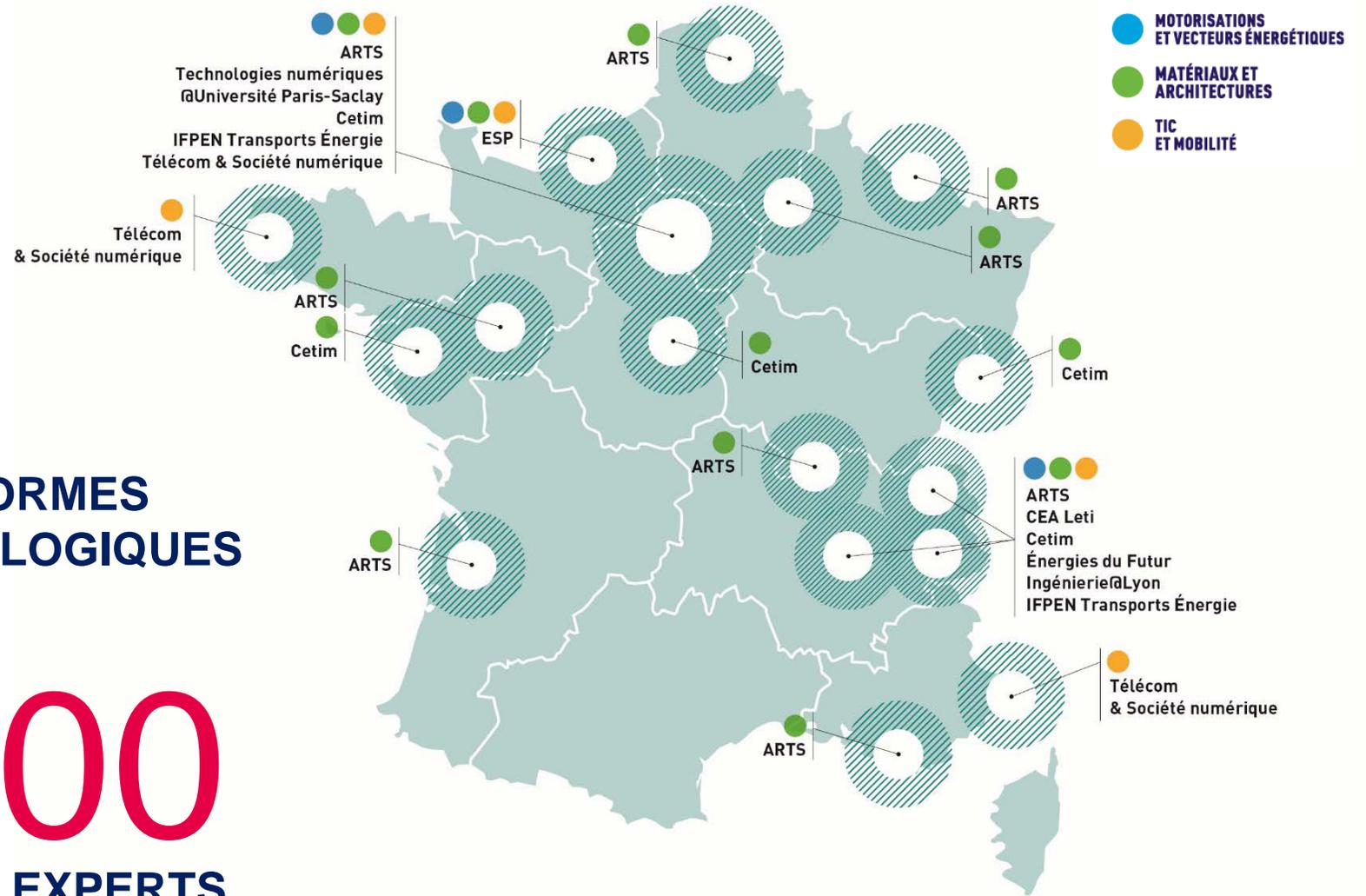
# L'action filière Carnauto

Un fort ancrage en région

**9** INSTITUTS  
CARNOT

**50** PLATEFORMES  
TECHNOLOGIQUES

**8000**  
EXPERTS



Nous suivre, nous contacter



[www.carnauto.fr](http://www.carnauto.fr)



[entreprises@carnauto.fr](mailto:entreprises@carnauto.fr)



Carnauto



[@FiliereCarnauto](https://twitter.com/FiliereCarnauto)

Pourquoi faut-il s'intéresser à la filière hydrogène maintenant ?

# Pourquoi faut il s'intéresser à la filière hydrogène maintenant ?

L'utilisation de l'hydrogène fait partie des actions possibles pour réduire les émissions de CO2

Le monde politique s'est emparé du sujet, **MAINTENANT**

- Juin 2020: lancement du plan hydrogène allemand doté de 9 Mrds €
- Septembre 2020 : lancement du plan hydrogène français, doté de 7 Mrds €

Des Appels A Projets (AAP) avec financement public sont lancés en permanence, mais ça ne durera pas.

- Juillet 2020: AAP Europe Horizon 2020 Green Deal
- Octobre 2020: AAP ADEME « Briques technologiques et démonstrateurs hydrogène »
- Octobre 2020 : AAP ADEME « Ecosystèmes territoriaux hydrogène »

## Usages en mobilité (suite) :

Des aides forfaitisées pour certains véhicules

	Aide maximale (Grande entreprise)	Aide maximale (Moyenne entreprise)	Aide maximale (Petite entreprise)
Fourgonnette (PTAC≤2,5t)	10 900 €	14 000 €	17 200 €
Fourgon (PTAC>2,5t)	23 800 €	30 600 €	37 400 €
Bus non articulé	140 000 €	180 000 €	220 000 €
Benne à ordures ménagères	133 000 €	171 000 €	209 000 €

Source ADEME: Financement possible pour l'AAP ADEME« Ecosystèmes territoriaux hydrogène »

# Pourquoi faut il s'intéresser à la filière hydrogène maintenant ?

---

## CARNAUTO et vous ?

- **CARNAUTO est l'un des premiers informés lorsque qu'un AAP est créé**
- **Les Instituts CARNOTS de CARNAUTO candidatent à la plupart des AAP et....ils ont souvent besoin de partenaires TPE,PME, ETI**
- **CARNAUTO peut "embarquer" un partenaire industriel PME TPE à bord des AAP auxquels ses membres répondent.**

Quels sont les atouts de l'hydrogène ?



# Quels sont les atouts de l'hydrogène ?

L'hydrogène est l'élément le plus répandu dans l'atmosphère, presque toujours groupé avec d'autres molécules.

Sa combustion ne dégage pas de CO2 mais de l'eau. L'hydrogène n'est ni toxique ni polluant.

## Propriétés physico-chimiques

Propriété	Hydrogène	Comparaison avec des produits classiques	
énergie par unité de masse (PCI) MJ/kg	120	environ 3 x plus que l'essence ou le gazole	
densité (gaz) kg/Nm3	0,09	8 x moins que le gaz naturel	13 x moins que l'air
énergie par unité de volume (PCI) MJ/m3	11	environ 3 x moins que l'essence ou le gazole	
taille (rayon) de la molécule $10^{-12}$ m	37	29 x plus petite que le gaz naturel	

## Les ombres au tableau

- **Il n'y a pas de mine d'hydrogène. Il faut toujours le détacher d'une molécule → la fabrication de l'hydrogène commence toujours par une consommation d'énergie.**
- **L'énergie par unité de volume de l'hydrogène est très faible → pour faire 100 km avec une petite citadine, il faut environ 4,5 litres d'essence ou 21 litres d'hydrogène à 700 bar.**
- **Compte tenu de sa petite taille, l'hydrogène "fuit" à travers les métaux.**

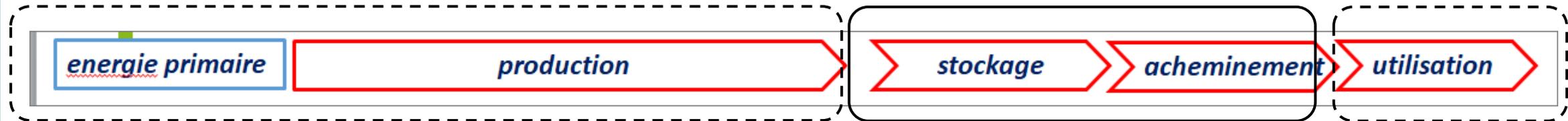
Le Cycle de Webinars  
CARNAUTO : l'hydrogène  
pour la mobilité, et la chaîne  
de valeur de l'hydrogène



# Le cycle de webinars et la chaine de valeur de l'hydrogène

## La chaine de valeur de l'hydrogène

- Une chaine de valeur est une succession d'opérations, généralement consécutives, qui part de la matière première et se termine par la vente du produit fini. Chaque maillon de la chaine augmente la valeur du maillon précédent.



- Le 21 janvier nous avons étudié la production d'hydrogène.
- Aujourd'hui nous étudions le stockage et l'acheminement de l'hydrogène.
- Jeudi 4 février , nous étudierons l'utilisation de l'hydrogène pour la mobilité.

## CARNAUTO et vous ?

- Les Instituts CARNOT sont présents sur tous les maillons de la chaîne de l'hydrogène, CARNAUTO est une porte d'entrée vers les Instituts CARNOT.
- Les verrous de la chaine de valeurs sont encore nombreux, beaucoup de savoir faire peuvent être mobilisés avec profit pour les résoudre.



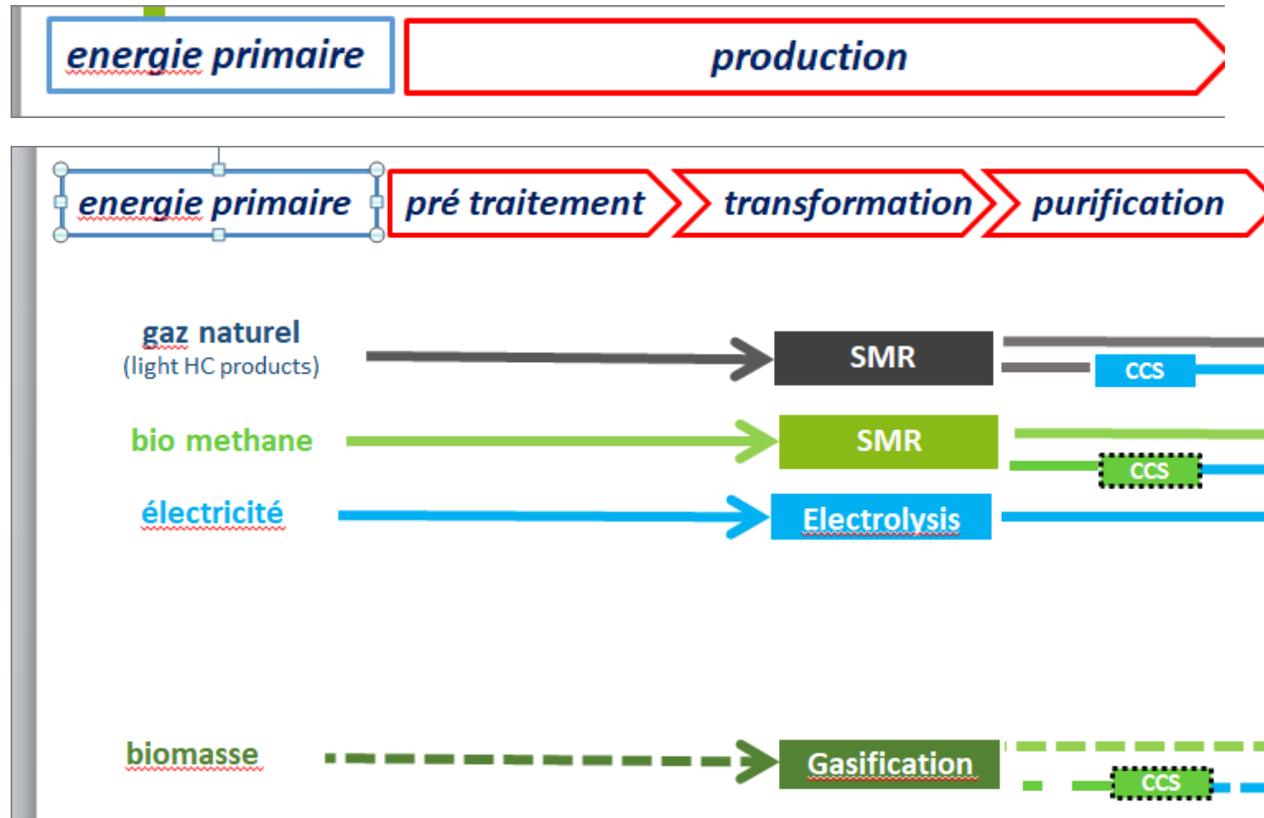
Source Carnots IFPEN: unité de gazéification de la biomasse (BioTfuel)

# L'acheminement et le stockage de d'hydrogène



# Rappel : Comment produit on de l'hydrogène ?

En séparant l'hydrogène des atomes avec lesquels il est lié



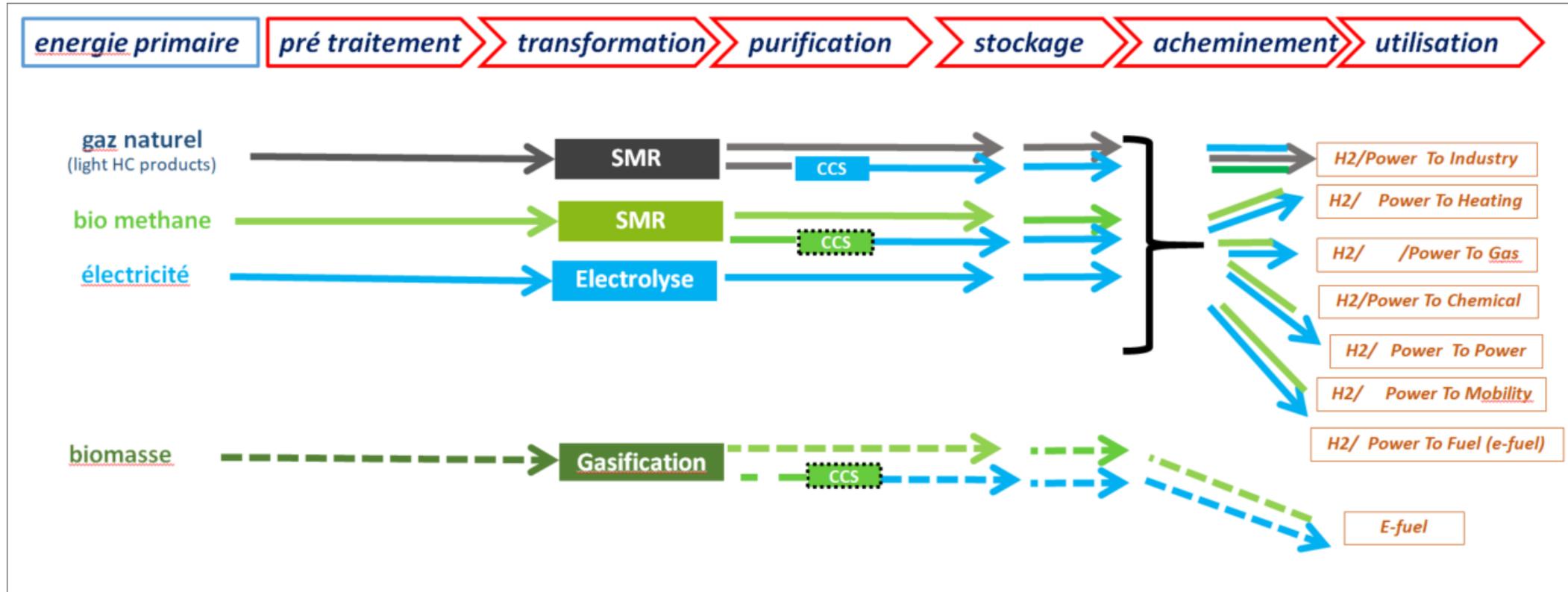
Deux grandes filières:

- Chimique: **vaporéformage**, Steam Methan Reforming (**SMR**) en anglais, **gazéification**
- Electrique/physico-chimique: **électrolyse**

- Filière chimique: **avantage prix, inconvénient CO2**
- Electrique/physico-chimique: **avantage CO2, inconvénient: consommation d'eau et prix**

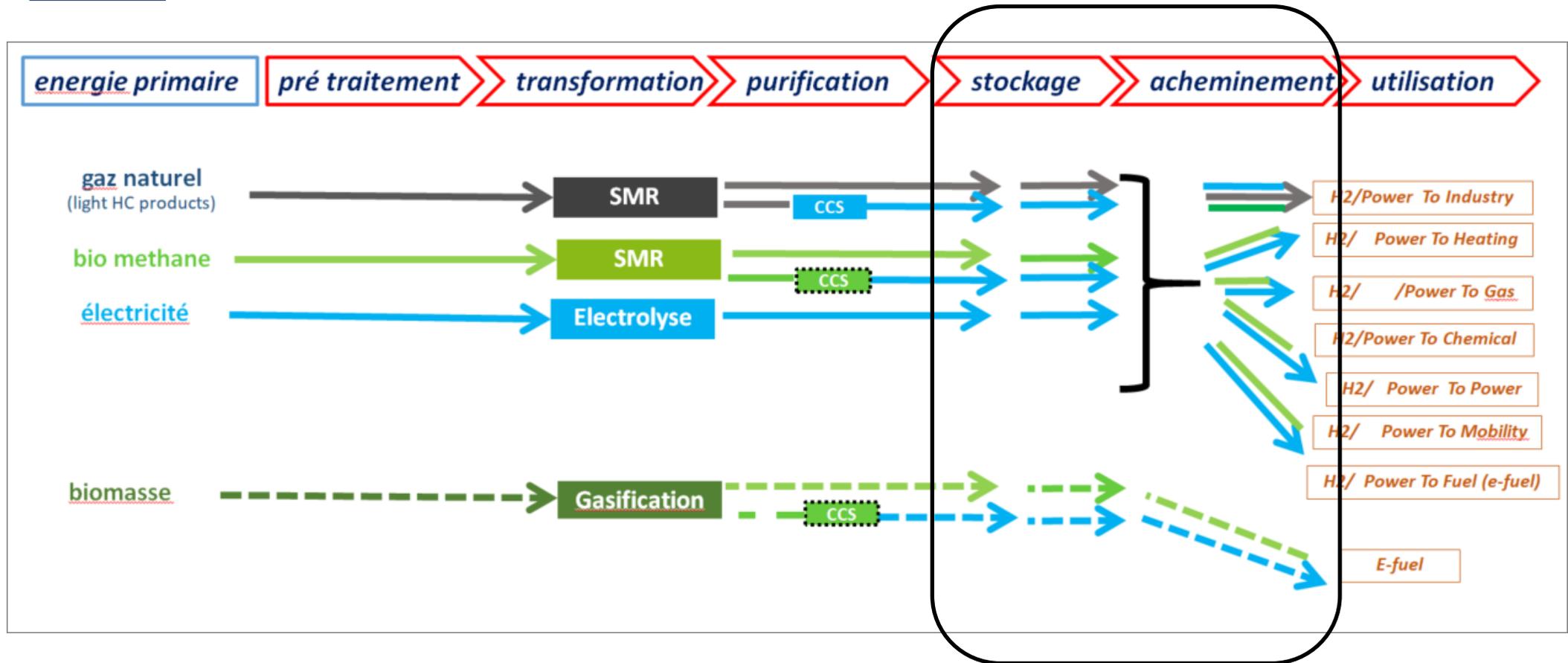
Copyright Carnot IFPEN TE 2020

# Le stockage et l'acheminement de l'hydrogène



Copyright Carnot IFPEN TE 2020

# Le stockage et l'acheminement de l'hydrogène

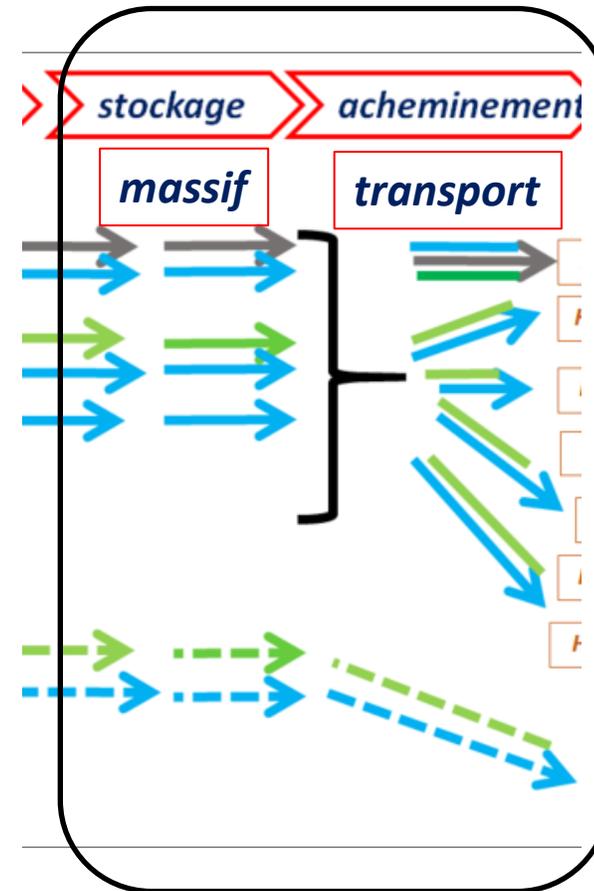


Copyright Carnot IFPEN TE 2020

# Le stockage et l'acheminement de l'hydrogène

## Première remarque

- Une fois que l'hydrogène est produit, c'est la même molécule, quelque soit le mode de production.
- Les mélanges d'hydrogène par mutualisation des moyens de transports sont fréquents aujourd'hui.
- **Les conditions de stockage et d'acheminement sont les mêmes quelque soit le mode de production de l'hydrogène**



# Le stockage et l'acheminement de l'hydrogène

## Le stockage

- Appelé également **stockage massif**
- Principalement dans des **cavités salines** ou des **aquifères** sous-terrains

## L'acheminement (ou transport) longue distance

- En général par **conduites** ou **pipes (pipe-lines)**
- Des projets d'acheminement par bateau existent

## L'acheminement courte distance

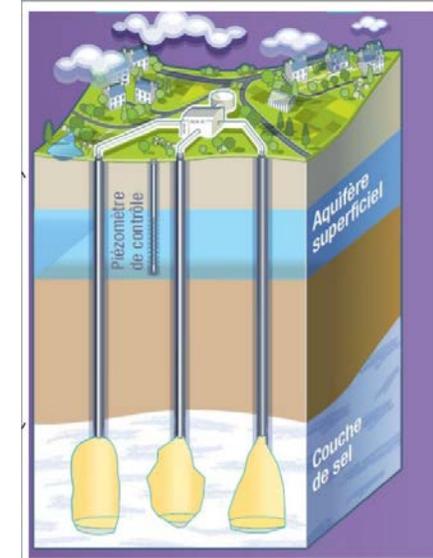
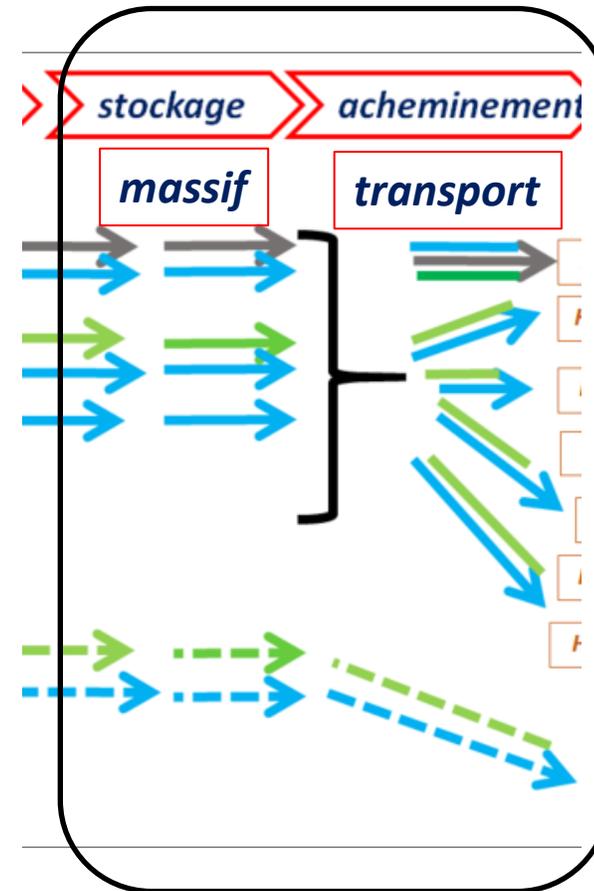
- Par camions avec remorques spéciales

Source : AIR LIQUIDE



## Le stockage "hors sol" ou "local"

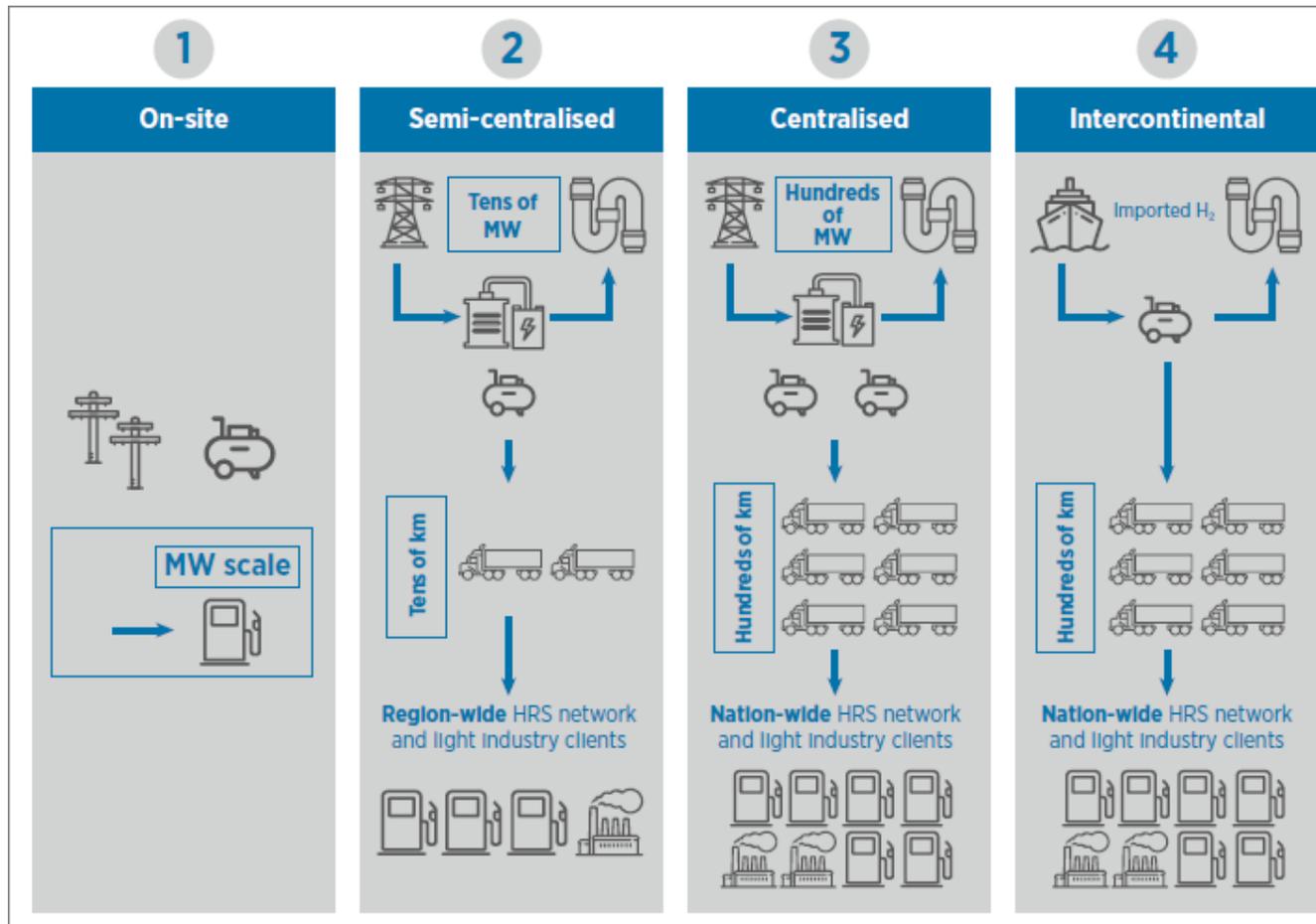
- Dans les stations services distribuant de l'hydrogène
- (dans les réservoirs des véhicules, çà n'est pas l'objet de ce webinar)
- Nous n'aborderons pas non plus la "distribution d'hydrogène" (les stations services)



Source : INERIS



# La chaîne d'approvisionnement en hydrogène (hydrogen supply chain) en fonction du développement de la demande -scénarios possibles



## Distribution locale (décentralisée)

- Un électrolyseur raccordé à une station service suffit . Stockage local hors sol (1 MW soit env. 200 kg H2/j)

## Distribution semi-centralisée

- Une demande "diffuse" régionale d'environ 10 MW, env. 2 tonnes H2/j
- Un terminal gazier fixe (électrolyse ou conduite), à distance du lieu de consommation.
- Il faut: camions, éventuellement conduite

## Distribution centralisée

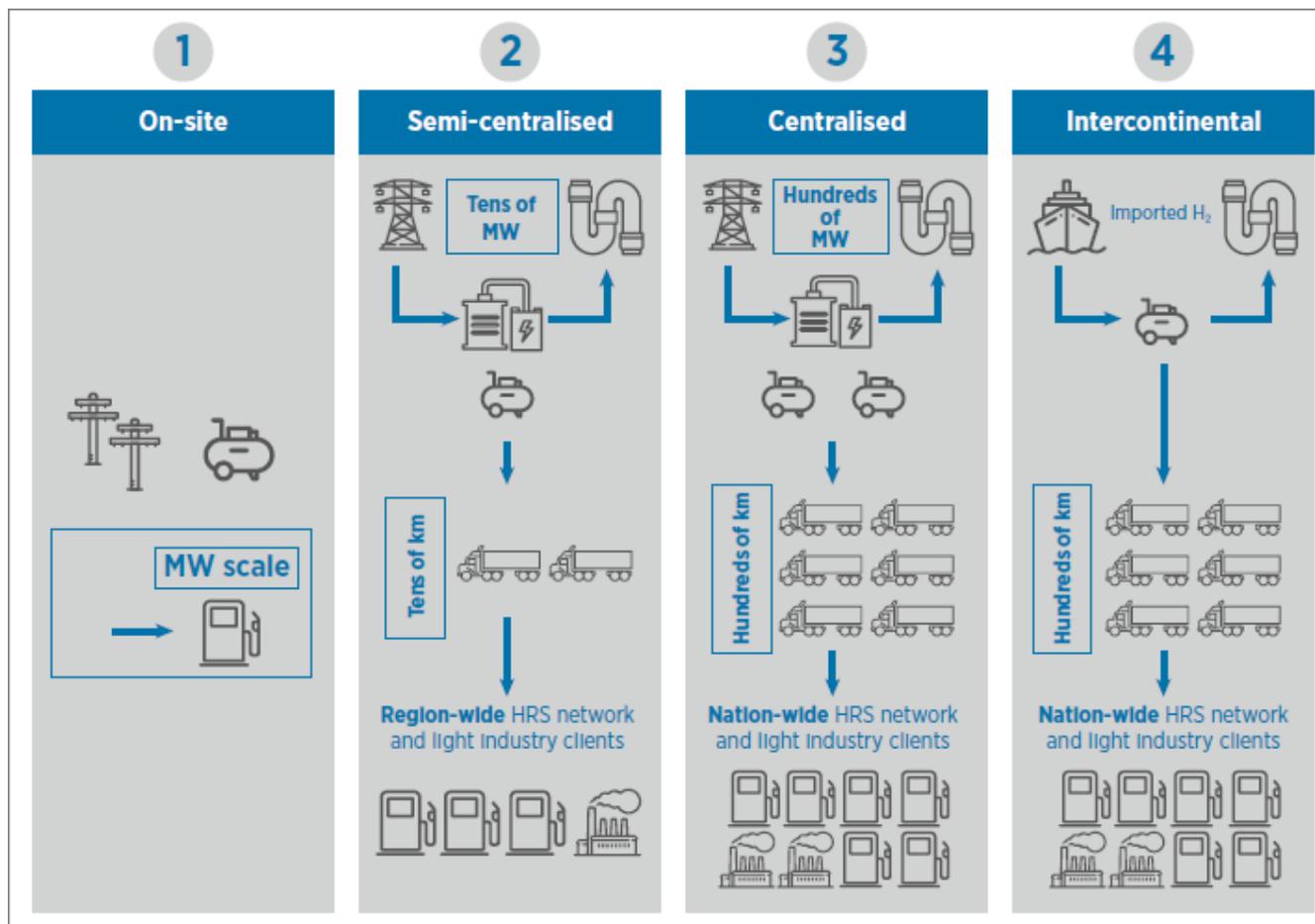
- Demande > 100 MW env. 20 t H2/j
- Il faut un terminal gazier avec électrolyseur et probablement conduite
- Noria de camions

## Distribution massive

- Demande > 1 GW env. 200 t H2/j
- Import de l'étranger probable
- Mise en œuvre de bateaux et de stockage massif

Source : IRENA 2018

# La chaîne d'approvisionnement en hydrogène (hydrogen supply chain) en fonction du développement de la demande -scénarios possibles



## Distribution locale (décentralisée)\*

- Un électrolyseur raccordé à une station service suffit . Stockage local hors sol (1 MW soit env. 200 kg H<sub>2</sub>/j)

## Distribution semi-centralisée\*

- Une demande "diffuse" régionale d'environ 10 MW, env. 2 tonnes H<sub>2</sub>/j
- Un terminal gazier fixe (électrolyse ou conduite), à distance du lieu de consommation.
- Il faut: camions, éventuellement conduite

## Distribution centralisée

- Demande > 100 MW env. 20 t H<sub>2</sub>/j
- Il faut un terminal gazier avec électrolyseur et probablement conduite
- Noria de camions

## Distribution massive

- Demande > 1 GW env. 200 t H<sub>2</sub>/j
- Import de l'étranger probable
- Mise en œuvre de bateaux et de stockage massif

Source : IRENA 2018

\*En place en France à date

# L'acheminement gazeux par conduites ou *pipes* (pipe line)

## Les caractéristiques

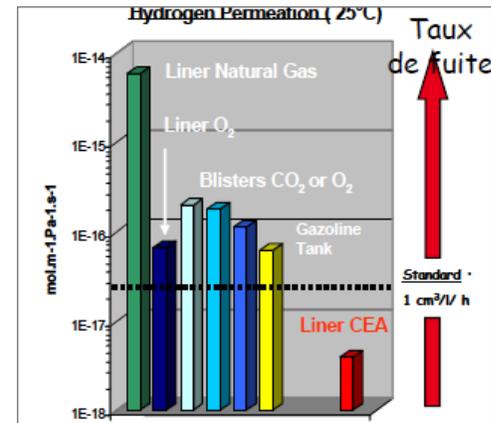
- On vise à transporter la même quantité d'énergie que dans les conduites gaz d'ou:
  - diamètres plus gros (env. 300 mm)
  - Pression plus forte (jusqu'à 100 bar )

## Les verrous majeurs → les opportunités

- La compatibilité des matériaux du pipe avec l'hydrogène (fuites et fragilisation) :
  - pour les métaux : fragilisation de la métallurgie, fuites
  - pour les matières plastiques: fuites (perméation)
- Énergie et coût de compression important. Les compresseurs souffrent.

## Les avantages

- Sécurité par rapport au transport par camion
- surcoût faible ( env. 1 \$/kg pour 1500 km)
- Un réseau opérationnel développé en Europe (1 600km) et aux Etats-Unis (1 300 km)
- Un réseau de conduites méthane et CO2 éventuellement utilisables



Résultat perméation : Carnots CEA



Machine stress corrosion: Carnots IFPEN



Figure 1 - Réseaux de pipelines hydrogène d'Air Liquide du Nord de l'Europe

Source : France HYDROGENE

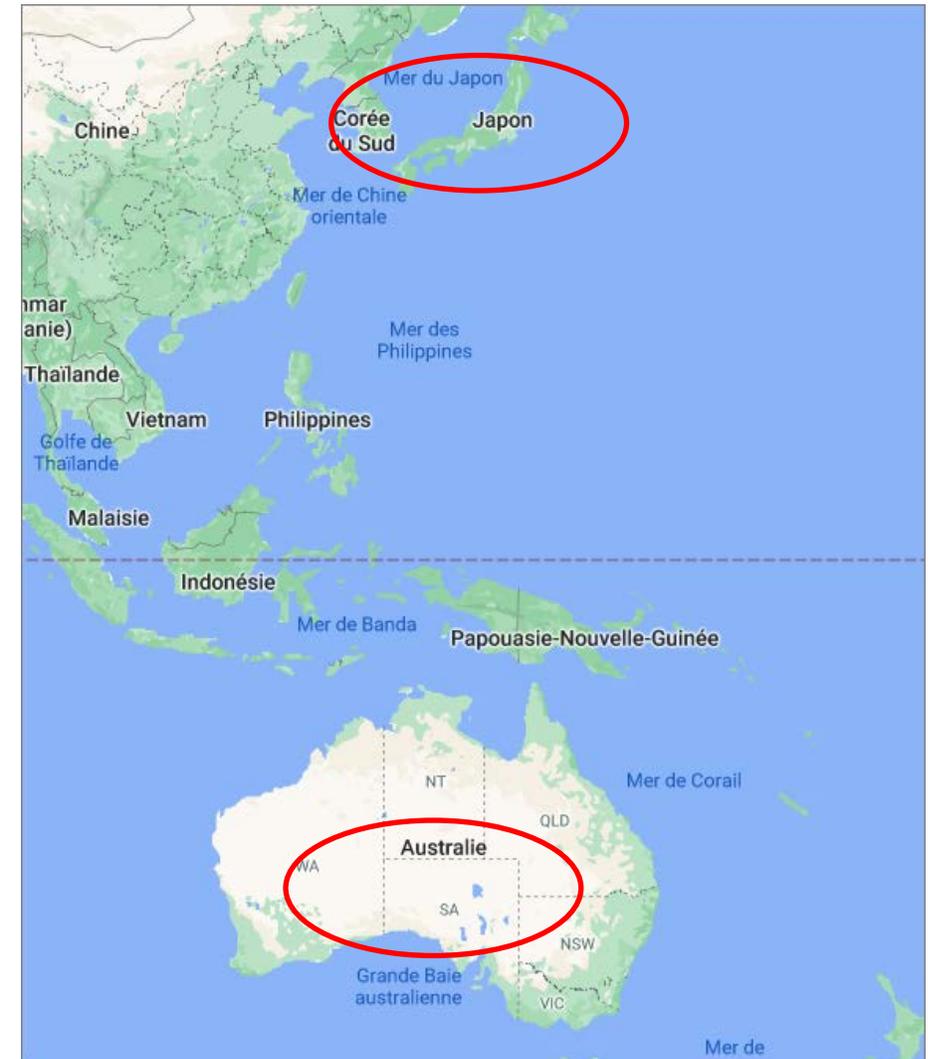
# L'acheminement liquide par bateau encore au stade prototype

## Le transport intercontinental d'hydrogène

- Certains pays anticipent un besoin d'importer de l'hydrogène d'autres continents :
  - Le Japon, par manque de place pour produire. Pays producteur envisagé : Australie.
  - L'Allemagne, suite à des calculs de prix de revient. Pays producteur envisagé: Maroc, Maghreb

## Le transport par bateau

- C'est la seule solution envisageable
- Technologie H2 liquide, proche de celle du transport de GNL
- Projet le plus connu: HYSTRA, piloté par Kawasaki Heavy Industries
- Un coût de transport estimé à env. 1,5 \$ / kg H2 pour 3 000 km



Source : HYSTRA

# Bateau ou conduites ?

C'est le coût plus que la technique qui guide:

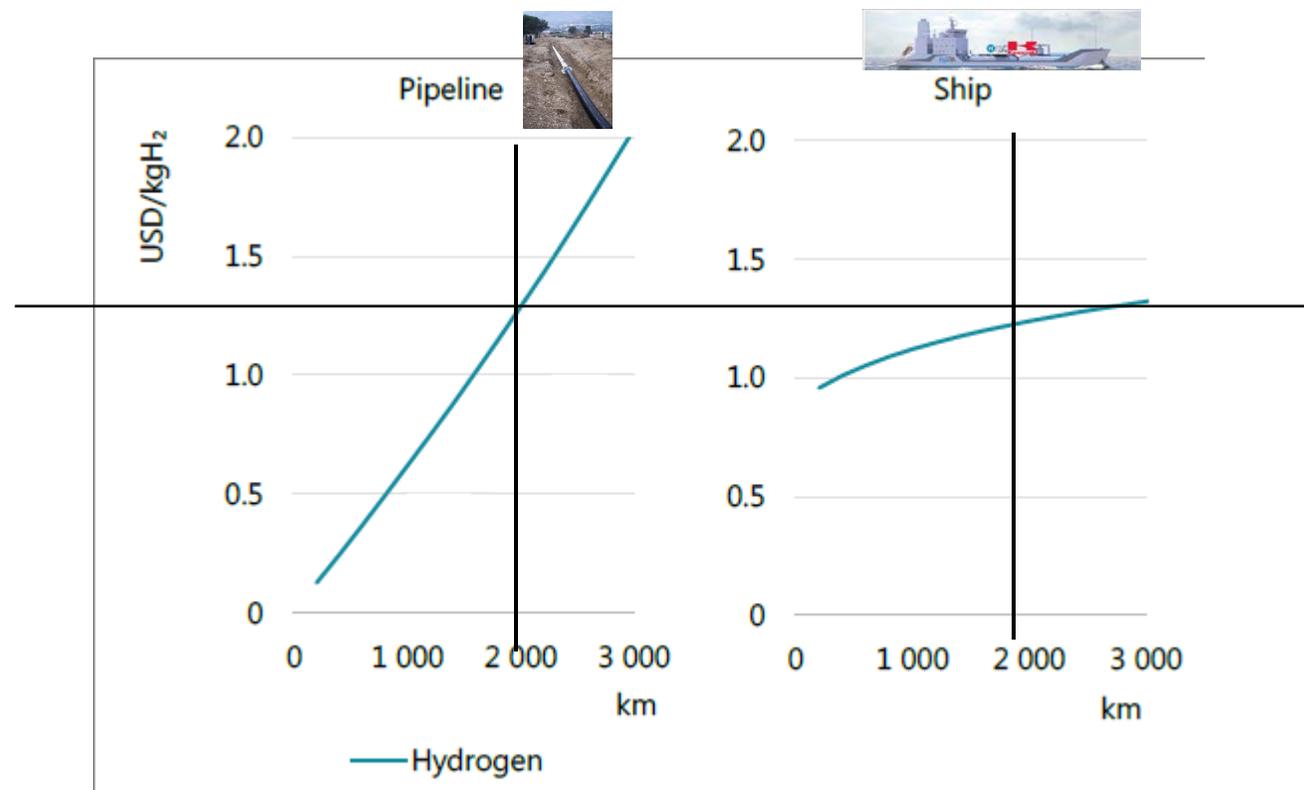
- Jusqu'à 2 000 km env. : conduites
- Au-delà de 2 000 km env; : bateau

## Autres paramètres à considérer

- Une fois la conduite construite, la capacité de transport est fixe
- Le bateau est plus flexible
- La problématique conduite /bateau est connue en Europe du Nord pour le transport de CO2 (**CCS ou CCUS**)

Une technologie à l'étude pour le transport par bateau → **opportunité** :

- Le transport d'hydrogène transformé en **LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carrier)**



## CARNAUTO et vous:

Source : AIE: The Future of Hydrogen -2019

- Ces 2 filières ont besoin :
  - de matériaux innovants
  - de savoir faire en mesures et monitoring
  - CARNAUTO vous aide à proposer vos technologies

# L'acheminement gazeux par camion

## Les remorques "tube trailer" gaz comprimé

- Semi-remorque composée de bouteilles verticales ou horizontales
- Charge utile 400 à 1000 kg H<sub>2</sub>
- La remorque "reste attachée" à la station service, comme réservoir

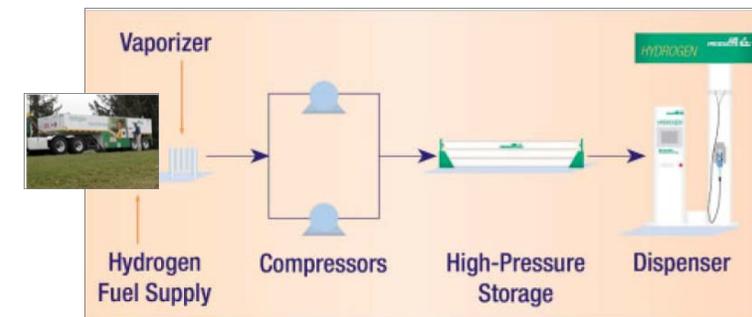
## Les questions posées → les opportunités

- Masse de la remorque: 30 tonnes environ
- Masse de carburant transporté: 1 tonne maximum, soit au mieux 3 % de la masse totale transportée → passer à l'hydrogène liquide (3000 kg/trajet)
- Que penser d'un camion qui approvisionne un client en hydrogène vert, tout en consommant env. 25 litres de gazole aux 100 km?



Figure 7 – Camion de livraison Air Products – Hydrogène sous 500 bars

Source : France HYDROGENE



Source : Air Products

## CARNAUTO et vous:

- Des outils permettent de répondre aux questions posées. CARNAUTO les mets à disposition
  - Calculs ACV
  - Dimensionnement adapté à la mission

# Camions ou conduites ?

---

## C'est la question pratique qui guide (s'il n'y a pas d'électrolyseur sur place):

- Un camion a une capacité de 400 à 1 000 kg d'hydrogène comprimé (350 ou 700 bar)
  - Lorsque la station consomme plus de 400 kg/jour, le camion va devoir faire des allers retour
  - A partir de 400 kg/ jour env. , un approvisionnement par conduite est intéressant
  - Au-delà de 1000 kg /jour env., il sera privilégié

## Une option qui se développe: transport liquide par camion :

- Avantage : gain en charge utile par rapport au gaz (3000 kg au lieu de 1000)
- Inconvénient: coût de liquéfaction (env. 1,5\$/kg pour 100 tonnes/jour), rendement de la chaîne.

# Le stockage de l'hydrogène

## Le stockage "massif"

- Encore peu répandu, pour l'hydrogène, le stockage massif vise à répondre à un besoin de stockage temporaire "massif" (plus de 5 000 tonnes) de l'ordre de quelques mois.
- AIR LIQUIDE exploite un puits d'hydrogène au Texas (diamètre : environ 70 m , profondeur: 1500 m, capacité : 10 à 20 000 tonnes H2)

## Les avantages

- Procédé connu : les compagnies gazières , STORENGIE, par exemple , stockent le gaz naturel de cette façon.
- Selon l'AIE, le coût est < 0,6 \$/kg H2

## Le stockage à bord des véhicules → Opportunités

- Composites + acier + liner, encore lourd: environ 20 kg/kg H2\*. Par exemple pour une voiture type Mirai avec 5 kg H2, le réservoir pèse 100 kg et coûte environ 2000 \$.

\*Source: ADEME- rapport ACV HYDOGENE - 2020



Réservoir TOYOTA MIRAI, source CARADISIAC



Fabrication réservoir H2 proto: Carnots CEA

# A retenir, conclusion

---

- **Quelque soit le procédé de production de l'hydrogène, les conditions d'acheminement et de stockage sont identiques**
- **Acheminement longues distances → > 500 km :**
  - conduites : jusqu'à 2000 km, opérationnel (coût env. 1 \$/kg pour 1500 km)
  - bateaux : > 2 000 km ou import intercontinental, à l'échelle prototype (estimation env. 1,5 \$/kg pour 3000 km)
- **Acheminement courtes distances → < 300 km :**
  - camions : jusqu'à 400 kg/jour et jusqu'à 150 km du terminal ( env. 1 \$/kg pour 200 km)
  - conduites: si > 400 kg/jour et > 120 km du terminal (< 0,5 \$/kg pour 200 km)
- **Stockage massif d'hydrogène:**
  - En prévision de besoin de stockage temporaire de plusieurs mois, quelques installations opérationnelles (< 0,6 \$/kg)
- **Stockage réservoirs véhicules :**
  - 3 à 10 kg dans des réservoirs composites 350 ou 700 bar. Compter env. 20 kg/ par kg H2 et env. 2000 € pour une voiture hydrogène (5 kg H2)

# A retenir, opportunités

---

## L'acheminement et le stockage d'hydrogène: un maillon en fort développement ET en déploiement:

- Des “grands projets”
- Des financements publics possibles
  
- Des besoins en nouvelles technologies
  - composants matériaux
  - transport d'hydrogène liquide, LOHC
  
- Des besoins terrains
  - appareils de mesure et de monitoring
  - camions de transports dédiés hydrogène plus performants (empreinte CO2, capacité d'emport)

# Sources d'informations et de documentation

---

## Génériques hydrogène :

- [CARNAUTO revue de presse](#)
- [CARNAUTO actualités](#)
- [Association FRANCE HYDROGENE](#)
- [The Future of Hydrogen - AIE \(Agence Internationale de l'Energie\) - 2019](#)

## Appels à projets H2

- [AAP ADEME générique](#)
- [AAP ADEME hydrogene et autres AAP décarbonation](#)

## Quels sont les atouts de l'hydrogène ?

- Hydrogène -J6368 V2 - Karine SURLA- Techniques de l'Ingénieur 2019

## Le transport de l'hydrogène

- Hydrogène -J6368 V2 - Karine SURLA- Techniques de l'Ingénieur 2019 pp 19 et suiv.
- [SRIA HYDROGEN EUROPE july 2020 pp 48 et suiv.](#)
- The Future of Hydrogen - AIE - 2019- pp 67 à 87
- Les matériaux : [plateforme CARNAUTO](#)

Nous suivre, nous contacter



[www.carnauto.fr](http://www.carnauto.fr)



[entreprises@carnauto.fr](mailto:entreprises@carnauto.fr)



Carnauto



[@FiliereCarnauto](https://twitter.com/FiliereCarnauto)