

Wébinaire — Mercredi 9 Novembre 2022



Hydrogène bas-carbone : quels usages pertinents à moyen terme dans un monde décarboné ?



Alexandre Joly

Manager
Leader de la Pratique Énergie



Stéphane Amant

Manager
Leader de la Pratique Mobilité



Zeina Chaar

Consultante



Baptiste Rouault

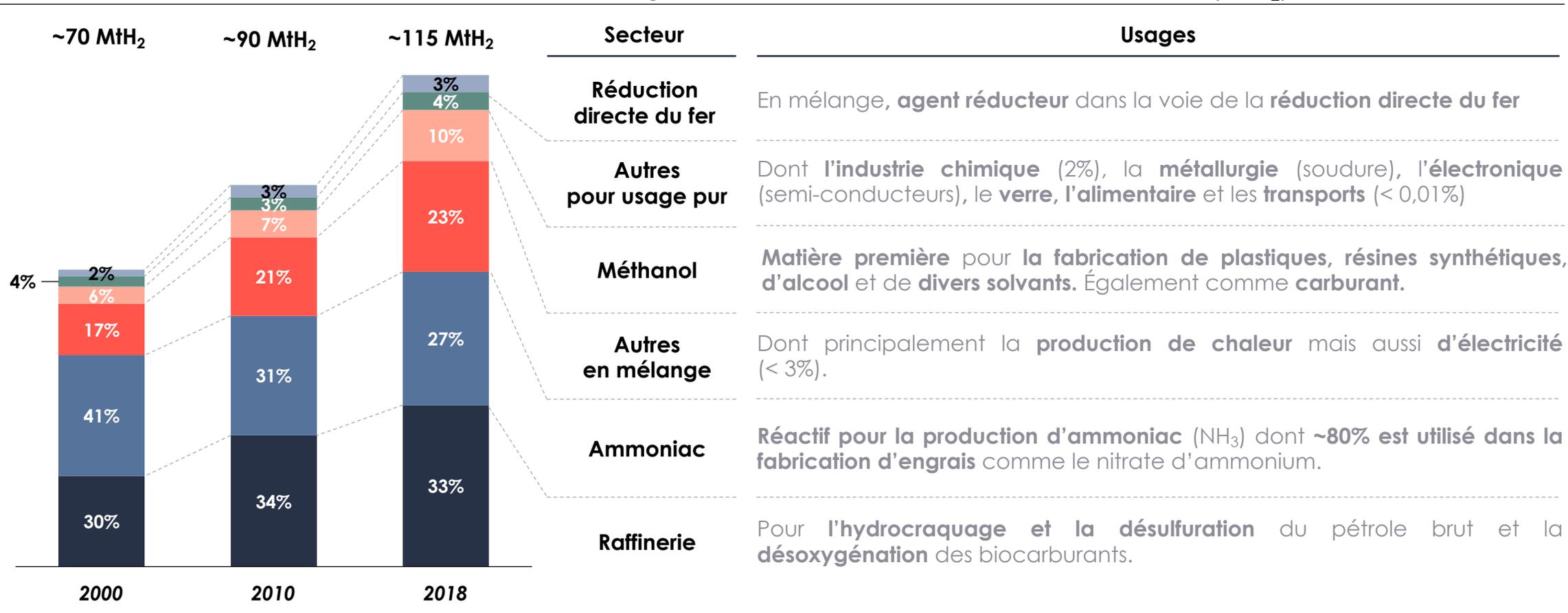
Consultant

Panorama d'H₂

- Usages
- Modes de production
- Empreinte carbone
- Paradigme de l'étude

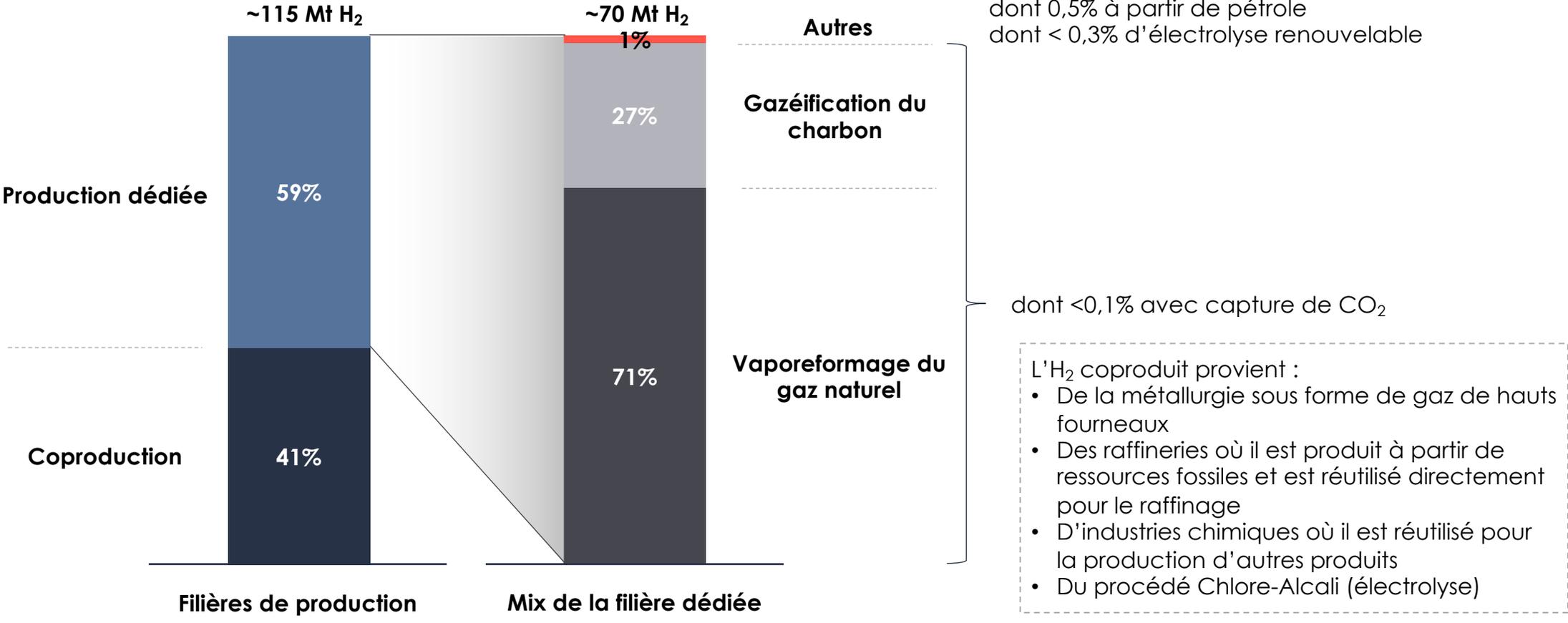
Au niveau mondial, l'hydrogène est utilisé exclusivement dans l'industrie, majoritairement comme réactif

Évolution de la demande d'Hydrogène dans le monde depuis 2000 par secteur (MtH₂)



La grande majorité de la production dédiée d'hydrogène est issue de gaz naturel et charbon

Production d'Hydrogène dans le monde en 2018 par filière (MtH₂) et mix de production de la filière dédiée

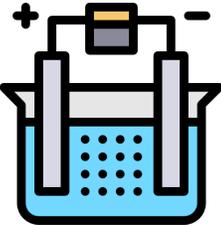
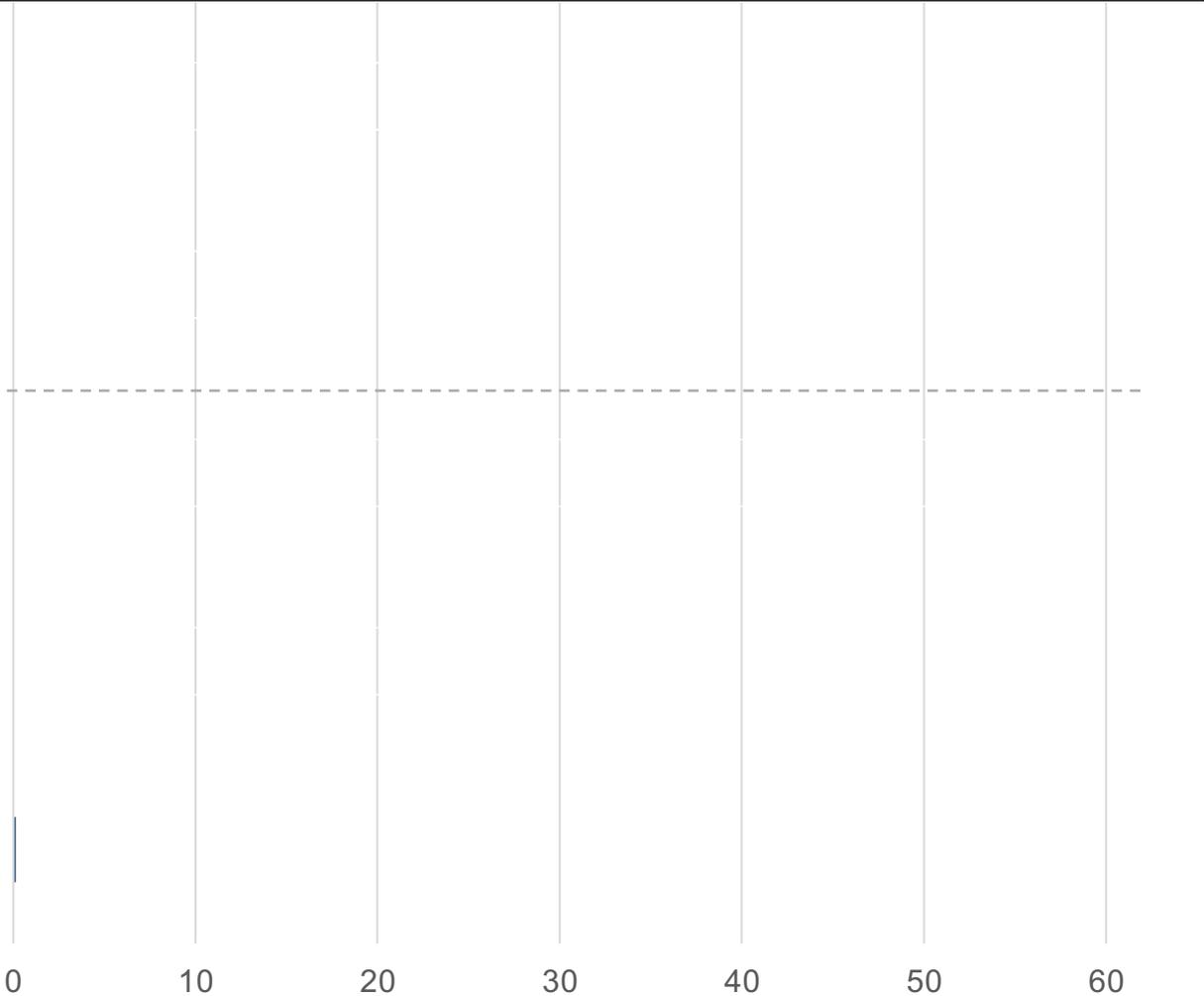
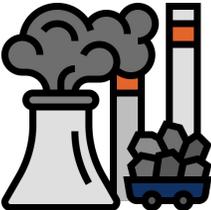


Source : The Future of Hydrogen, AIE 2019

Des empreintes carbone très disparates selon le moyen de production

Empreinte carbone de l'hydrogène selon son mode de production
(kgCO₂e / kgH₂)

Directement à partir d'énergie fossile



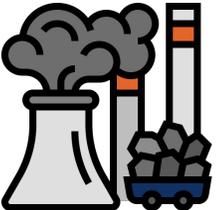
Par électrolyse...

*Bas-carbone : éolien, solaire PV, hydraulique, nucléaire français.

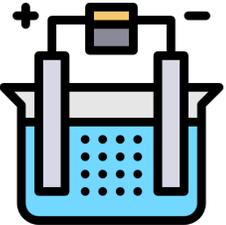
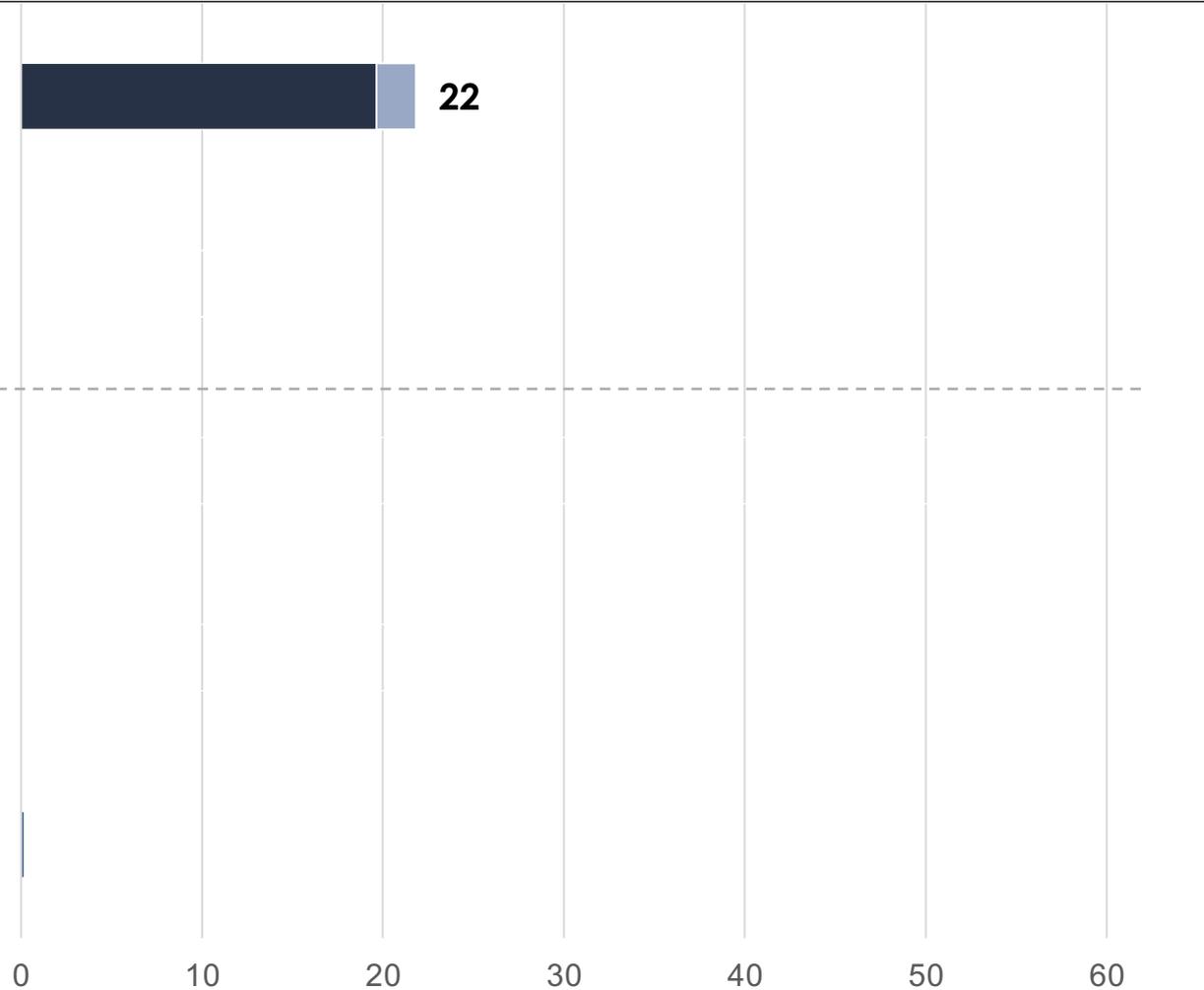
Des empreintes carbone très disparates selon le moyen de production

Empreinte carbone de l'hydrogène selon son mode de production
(kgCO₂e / kgH₂)

Directement à partir d'énergie fossile



Gazéification du charbon



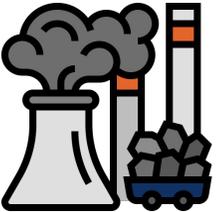
Par électrolyse...

*Bas-carbone : éolien, solaire PV, hydraulique, nucléaire français.

Des empreintes carbonées très disparates selon le moyen de production

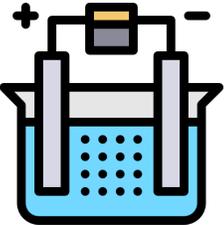
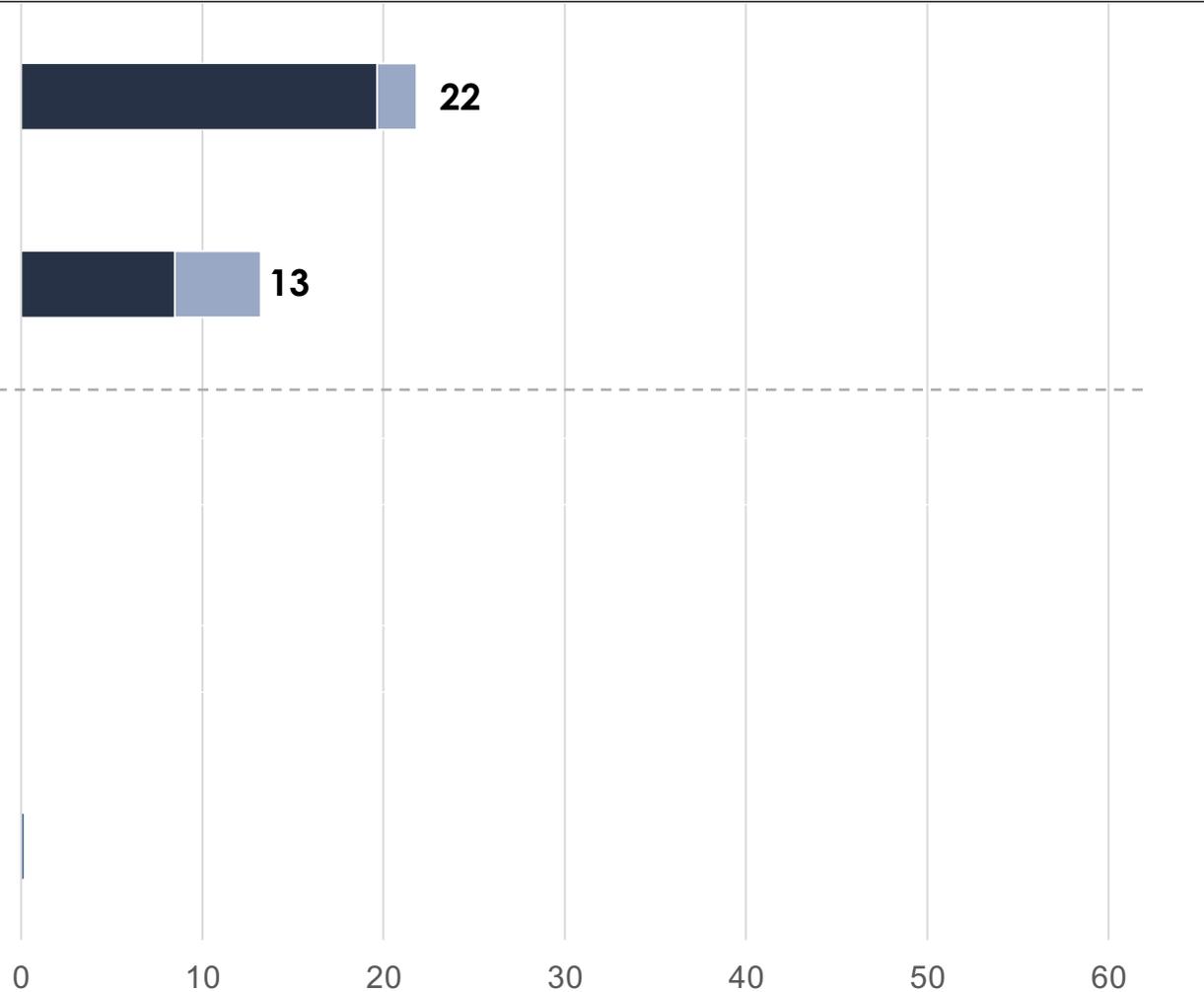
Empreinte carbone de l'hydrogène selon son mode de production
(kgCO₂e / kgH₂)

Directement à partir d'énergie fossile



Gazéification du charbon

Vaporeformage du gaz naturel



Par électrolyse...

*Bas-carbone : éolien, solaire PV, hydraulique, nucléaire français.

Des empreintes carbonées très disparates selon le moyen de production

Empreinte carbone de l'hydrogène selon son mode de production
(kgCO₂e / kgH₂)

Directement à partir d'énergie fossile



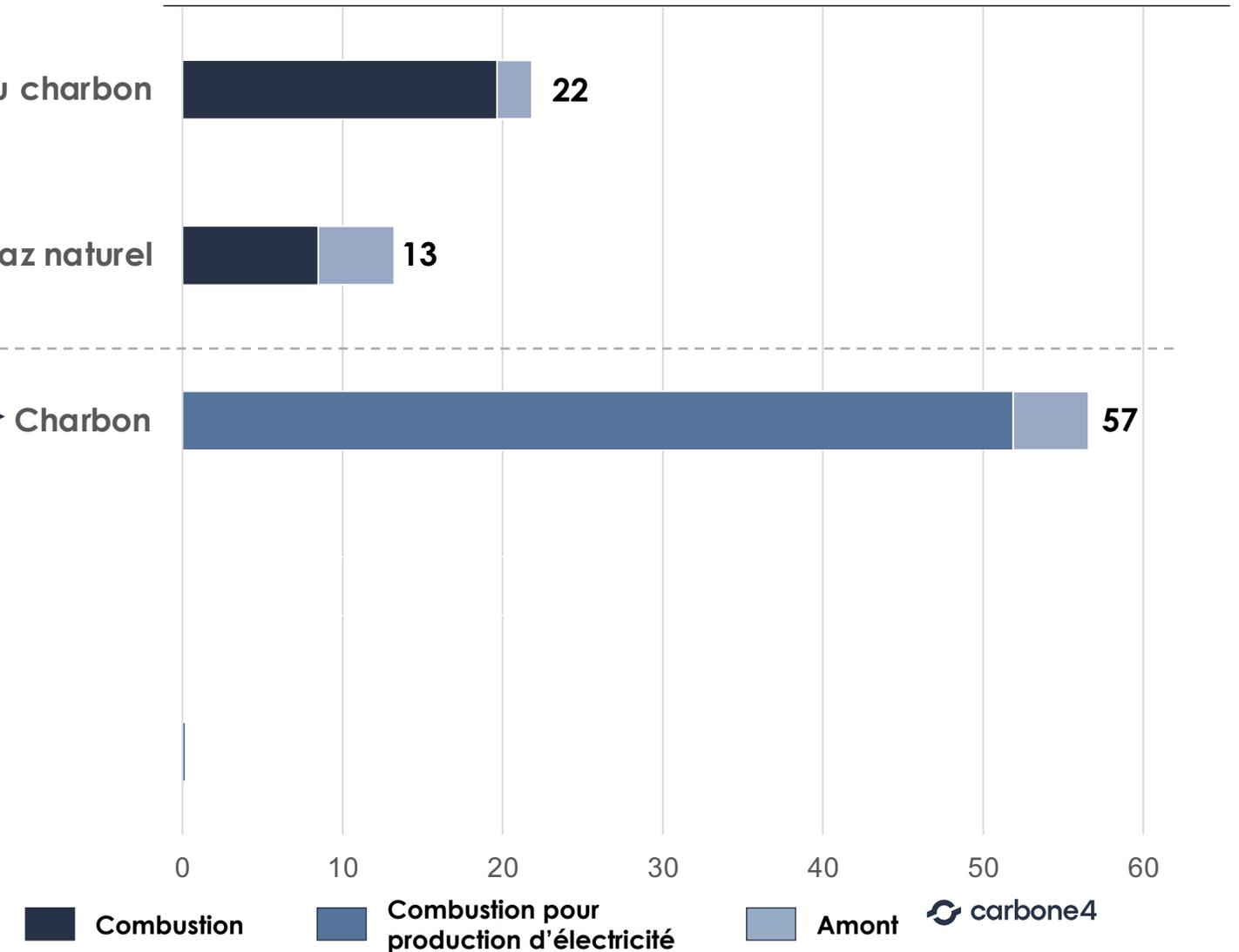
Gazéification du charbon

Vaporeformage du gaz naturel



avec de l'électricité d'origine

Par électrolyse...

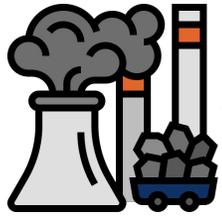


*Bas-carbone : éolien, solaire PV, hydraulique, nucléaire français.

Des empreintes carbonées très disparates selon le moyen de production

Empreinte carbone de l'hydrogène selon son mode de production
(kgCO₂e / kgH₂)

Directement à partir d'énergie fossile



Gazéification du charbon

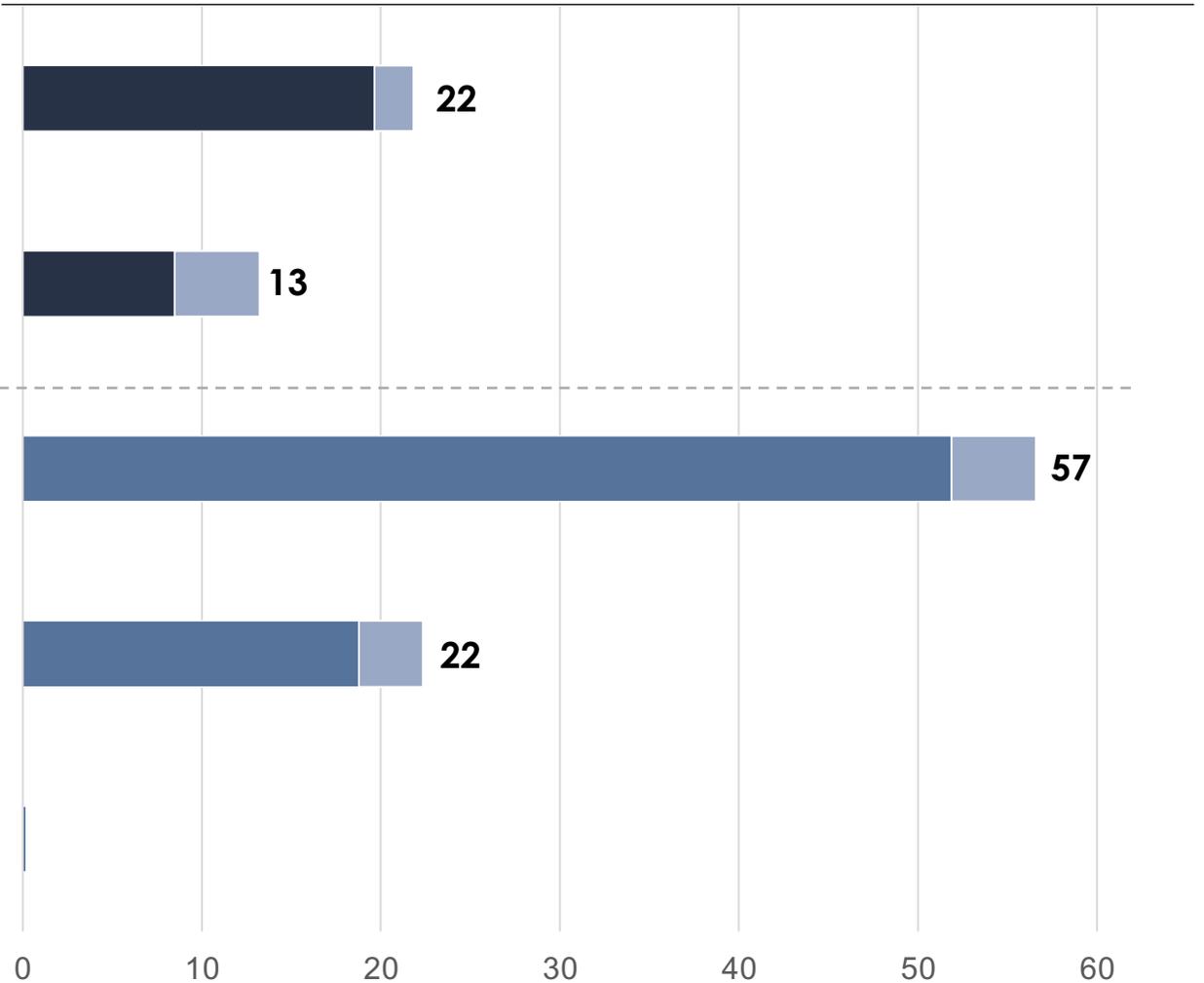
Vaporeformage du gaz naturel



avec de l'électricité d'origine

Charbon

Gaz



*Bas-carbone : éolien, solaire PV, hydraulique, nucléaire français.

■ Combustion

■ Combustion pour production d'électricité

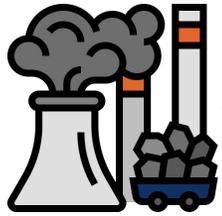
■ Amont



Des empreintes carbone très disparates selon le moyen de production

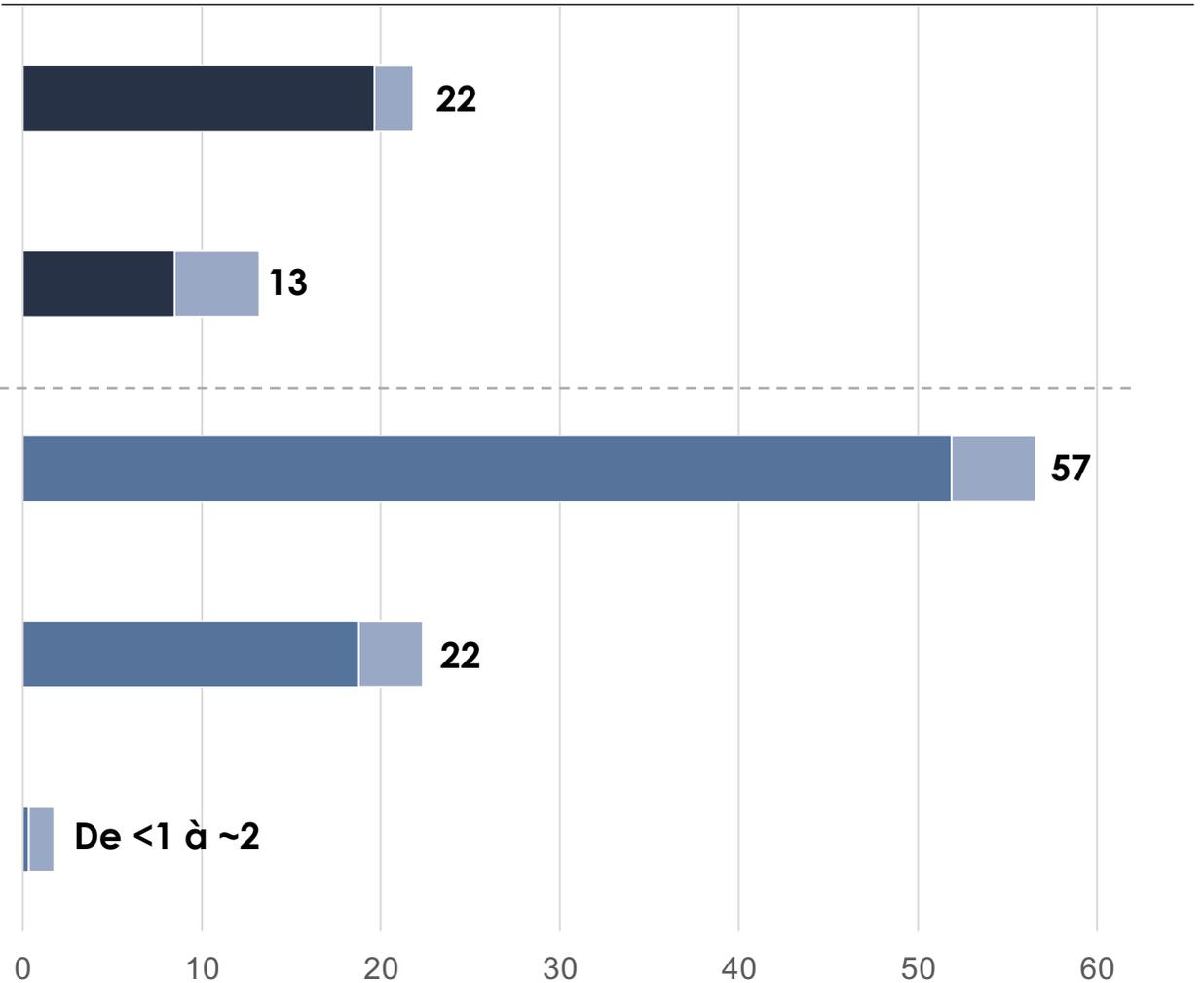
Empreinte carbone de l'hydrogène selon son mode de production
(kgCO₂e / kgH₂)

Directement à partir d'énergie fossile



Gazéification du charbon

Vaporeformage du gaz naturel



avec de l'électricité d'origine

Charbon

Gaz

Bas-carbone*

Par électrolyse...

*Bas-carbone : éolien, solaire PV, hydraulique, nucléaire français.

■ Combustion

■ Combustion pour production d'électricité

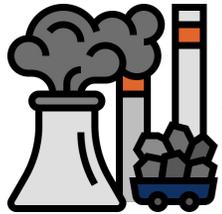
■ Amont



Des empreintes carbone très disparates selon le moyen de production

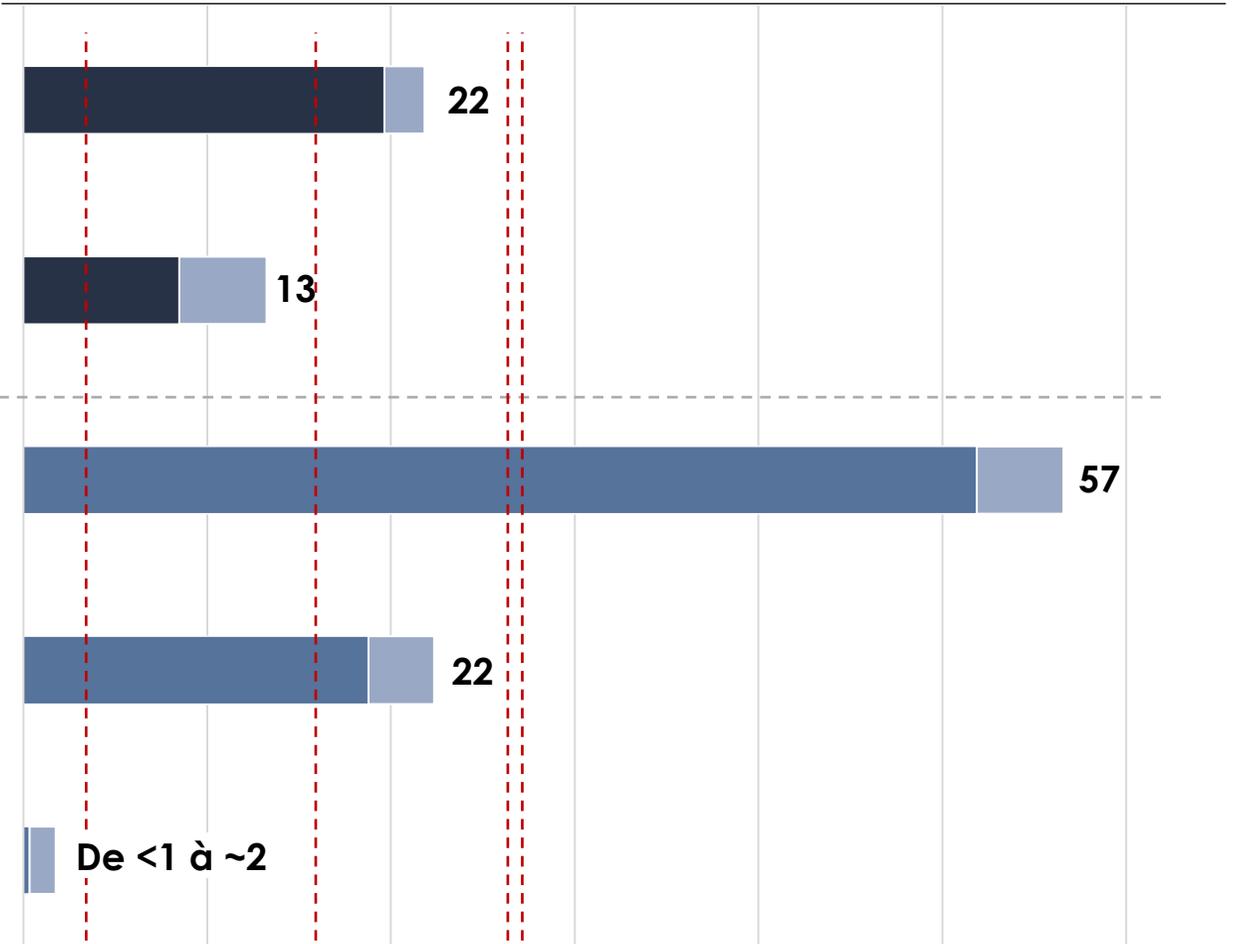
Empreinte carbone de l'hydrogène selon son mode de production
(kgCO₂e / kgH₂)

Directement à partir d'énergie fossile



Gazéification du charbon

Vaporeformage du gaz naturel



avec de l'électricité d'origine

Charbon

Gaz

Bas-carbone*

Par électrolyse...

Et avec nos mix électriques actuels ?

*Bas-carbone : éolien, solaire PV, hydraulique, nucléaire français.

Combustion

Combustion pour production d'électricité

Amont



Des empreintes carbone très disparates selon le moyen de production

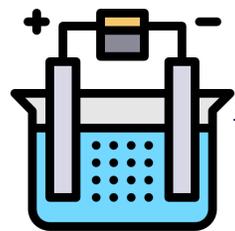
Empreinte carbone de l'hydrogène selon son mode de production
(kgCO₂e / kgH₂)

Directement à partir d'énergie fossile



Gazéification du charbon

Vaporeformage du gaz naturel



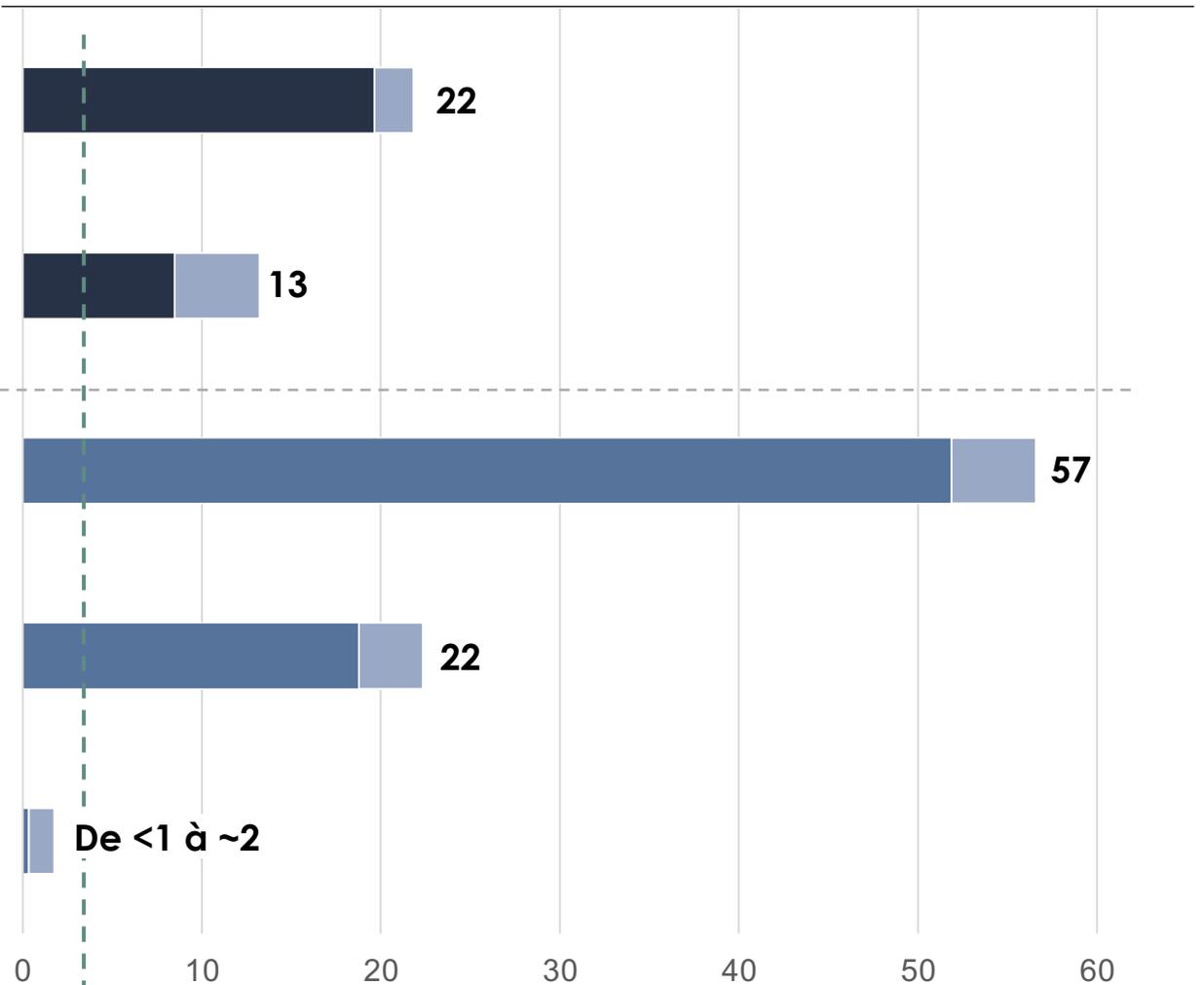
avec de l'électricité d'origine

Par électrolyse...

Charbon

Gaz

Bas-carbone*



Dans notre étude, nous retenons un H₂ à 3 kgCO₂e / kgH₂
Il correspond au seuil bas-carbone de la Taxonomie européenne

*Bas-carbone : éolien, solaire PV, hydraulique, nucléaire français.

■ Combustion

■ Combustion pour production d'électricité

■ Amont

🔄 carbone4

Présentation du cadre général de la modélisation

1 **Ambition climatique**

2 **Pertinence de l'H₂ vs
d'autres solutions
décarbonantes**

3 **Scénario sur la part d'H₂
dans le segment**

4 **Mise en perspective
intersectorielle**

Présentation du cadre général de la modélisation

1 Ambition climatique

- On se fonde sur des **trajectoires de décarbonation qui respectent l'Accord de Paris** (moins de 2°C de réchauffement), et même **un peu mieux sans être pour autant 1,5°C, à horizon 2030.**

Exemples : Well Below 2°C Scenario de l'AIE¹ (famille de scénarios ETP²), Sustainable Development Scenario (famille de scénarios WEO³), Engagements sectoriels des acteurs ou réglementations.

2 Pertinence de l'H₂ vs d'autres solutions décarbonantes

3 Scénario sur la part d'H₂ dans le segment

4 Mise en perspective intersectorielle

Présentation du cadre général de la modélisation

1 Ambition climatique

- On se fonde sur des **trajectoires de décarbonation qui respectent l'Accord de Paris** (moins de 2°C de réchauffement), et même **un peu mieux sans être pour autant 1,5°C, à horizon 2030**.

Exemples : Well Below 2°C Scenario de l'AIE¹ (famille de scénarios ETP²), Sustainable Development Scenario (famille de scénarios WEO³), Engagements sectoriels des acteurs ou réglementations.

2 Pertinence de l'H₂ vs d'autres solutions décarbonantes

- L'hydrogène est évalué quantitativement à l'aune de sa **décarbonation unitaire**
Exemples : -x% de CO₂ par tonne d'acier produit, ou -y% de CO₂ par km en camion
- L'examen des autres options décarbonantes sur ce critère permet de **déterminer l'ordre de mérite** de l'H₂ dans la décarbonation du segment. Une analyse de coût a été réalisée lorsque le critère carbone n'était pas discriminant.

3 Scénario sur la part d'H₂ dans le segment

4 Mise en perspective intersectorielle

Présentation du cadre général de la modélisation

1 Ambition climatique

- On se fonde sur des **trajectoires de décarbonation qui respectent l'Accord de Paris** (moins de 2°C de réchauffement), et même **un peu mieux sans être pour autant 1,5°C, à horizon 2030**.

Exemples : Well Below 2°C Scenario de l'AIE¹ (famille de scénarios ETP²), Sustainable Development Scenario (famille de scénarios WEO³), Engagements sectoriels des acteurs ou réglementations.

2 Pertinence de l'H₂ vs d'autres solutions décarbonantes

- L'hydrogène est évalué quantitativement à l'aune de sa **décarbonation unitaire**
Exemples : -x% de CO₂ par tonne d'acier produit, ou -y% de CO₂ par km en camion
- L'examen des autres options décarbonantes sur ce critère permet de **déterminer l'ordre de mérite** de l'H₂ dans la décarbonation du segment. Une analyse de coût a été réalisée lorsque le critère carbone n'était pas discriminant.

3 Scénario sur la part d'H₂ dans le segment

Pour les segments où l'hydrogène paraît pertinent, des **scénarios de pénétration de l'hydrogène** dans les secteurs ont été formulés en tenant compte, selon les cas :

- Des **volumes d'activités attendus** pour le secteur
- De la **maturité** de la solution hydrogène **et des effets d'inertie** pour le secteur
- D'autres appréciations qualitatives sur l'H₂ et sur les autres options décarbonantes
Exemples : Toxicité de l'ammoniac, disponibilité limitée de la biomasse
- Du **budget carbone** du secteur

4 Mise en perspective intersectorielle

Présentation du cadre général de la modélisation

1 Ambition climatique

- On se fonde sur des **trajectoires de décarbonation qui respectent l'Accord de Paris** (moins de 2°C de réchauffement), et même **un peu mieux sans être pour autant 1,5°C, à horizon 2030**.

Exemples : Well Below 2°C Scenario de l'AIE¹ (famille de scénarios ETP²), Sustainable Development Scenario (famille de scénarios WEO³), Engagements sectoriels des acteurs ou réglementations.

2 Pertinence de l'H₂ vs d'autres solutions décarbonantes

- L'hydrogène est évalué quantitativement à l'aune de sa **décarbonation unitaire**
Exemples : -x% de CO₂ par tonne d'acier produit, ou -y% de CO₂ par km en camion
- L'examen des autres options décarbonantes sur ce critère permet de **déterminer l'ordre de mérite** de l'H₂ dans la décarbonation du segment. Une analyse de coût a été réalisée lorsque le critère carbone n'était pas discriminant.

3 Scénario sur la part d'H₂ dans le segment

Pour les segments où l'hydrogène paraît pertinent, des **scénarios de pénétration de l'hydrogène** dans les secteurs ont été formulés en tenant compte, selon les cas :

- Des **volumes d'activités attendus** pour le secteur
- De la **maturité** de la solution hydrogène **et des effets d'inertie** pour le secteur
- D'autres appréciations qualitatives sur l'H₂ et sur les autres options décarbonantes
Exemples : Toxicité de l'ammoniac, disponibilité limitée de la biomasse
- Du **budget carbone** du secteur

4 Mise en perspective intersectorielle

En considérant une probable contrainte sur la disponibilité en hydrogène bas-carbone à horizon 2030, une priorisation des secteurs dans l'accès à celui-ci a été réalisée à partir :

- De **l'ordre de mérite** (vis-à-vis des autres solutions du secteur) de l'étape 2
- Du **besoin en hydrogène** identifié dans l'étape 3
- De **l'intensité décarbonante** de chaque tonne d'hydrogène mobilisée par le secteur
Exemple : X tCO₂e évitée / tH₂ dans la sidérurgie vs. Y tCO₂e évitée / tH₂ dans le transport maritime

11 usages répartis au sein de 3 segments ont été étudiés

Industrie	Transports	Énergie
Production d'ammoniac	Maritime	Consommation en mélange dans les réseaux de gaz
Production de méthanol	Aérien	Stockage pour le système électrique
Production d'acier	Routier : camions	Raffinage
Usage chaleur	Ferroviaire	



Conclusions de l'étude

- Analyse intra-sectorielle
- Analyse inter-sectorielle

Quels enseignements tirer de l'analyse intra-sectorielle ?

Les usages analysés sont classés en trois typologies :

Voies sans regrets

L'hydrogène est incontournable à moyen et long terme.

Cela peut venir du fait qu'au sein du secteur c'est la le seul levier existant de réduction des émissions, ou encore que les autres leviers ne suffiront pas à eux seuls.

Voies potentiellement pertinentes

La nécessité de la solution hydrogène est incertaine et plutôt avec un rôle de 2nd plan pour diverses raisons :

- Son développement repose sur un pari technologique fort
- Il induit une plus faible réduction d'émissions et dépend donc du développement des solutions concurrentes

Voies sans issues

L'hydrogène n'est pas pertinent pour le secteur en tant que solution décarbonante

Analyse intra-sectorielle : Industrie

L'intérêt de l'H₂ bas-carbone est évalué selon le potentiel de décarbonation, l'horizon temporel pertinent et la présence ou non de solutions concurrentes plus performantes pour décarboner.

Segment		Pertinence de l'H ₂ bas-carbone	Pouvoir unitaire de décarbonation ¹	Horizon temporel ²	Alternatives décarbonantes, complémentaires ou concurrentes
Industrie	Production d'ammoniac	✓	~73%	⌚	<ul style="list-style-type: none"> CCS sur le site de production
	Production de méthanol	✓	~70%	⌚	
	Acier : DRI à l'H ₂	✓	~76%	⌚ ⌚	<ul style="list-style-type: none"> CCS sur le site de production recyclage de la ferraille par four électrique
	Acier : injection dans BF-BOF	✗	~14%	⌚	<ul style="list-style-type: none"> réduction directe « gas based »

Légende :	⌚	⌚ ⌚	⌚ ⌚ ⌚
Solution déployable à ...	court terme	moyen terme	long terme

(1) Le pouvoir unitaire de décarbonation est calculé par rapport à une situation de référence qui est majoritaire au sein du segment analysé.

(2) L'horizon temporel pertinent est défini en fonction de la maturité technologique de la solution associée à l'utilisation d'H₂ mais également au contexte (ex : avec le temps, l'activité des raffineries va fortement diminuer donc le besoin en H₂ bas-carbone est défini comme transitoire).

Analyse intra-sectorielle : Mobilité

Légende :

Solution déployable à ...



court terme



moyen terme



long terme

L'intérêt de l'H₂ bas-carbone est évalué selon le potentiel de décarbonation, l'horizon temporel pertinent et la présence ou non de solutions concurrentes plus performantes pour décarboner.

Segment	Pertinence de l'H ₂ bas-carbone	Pouvoir unitaire de décarbonation ¹	Horizon temporel ²	Alternatives décarbonantes, complémentaires ou concurrentes	
Mobilité	Ferroviaire	✓ / ~	~78%	🕒 🕒	• Electrification : directe des voies ou batteries
	Camions	~ / ✗	~70%	🕒 🕒	• Batteries • Bioénergies : bioGNV, biocarburants 2G
	Maritime : LH ₂	✗	~66%	🕒 🕒 🕒	
	Maritime : e-ammoniac	~	~39%	🕒 🕒	
	Maritime : e-méthanol	✓	~50%	🕒	• Bioénergies : biocarburants liquides 2G et BioGNL 2G
	Maritime : e-GNL	✓	~53%	🕒	
	Aérien court à moyen courrier : usage direct	✗	~66%	🕒 🕒 🕒	
	Aérien : synfuels	✓	~62%	🕒 🕒	• Batteries • Biocarburants 2G

(1) Le pouvoir unitaire de décarbonation est calculé par rapport à une situation de référence qui est majoritaire au sein du segment analysé.

(2) L'horizon temporel pertinent est défini en fonction de la maturité technologique de la solution associée à l'utilisation d'H₂ mais également au contexte (ex : avec le temps, l'activité des raffineries va fortement diminuer donc le besoin en H₂ bas-carbone est défini comme transitoire).

Analyse intra-sectorielle : Énergie

L'intérêt de l'H₂ bas-carbone est évalué selon le potentiel de décarbonation, l'horizon temporel pertinent et la présence ou non de solutions concurrentes plus performantes pour décarboner.

	Segment	Pertinence de l'H ₂ bas-carbone	Pouvoir unitaire de décarbonation ¹	Horizon temporel ²	Alternatives décarbonantes, complémentaires ou concurrentes
Énergie	Raffinage	~	~15%	 Transitoire	<ul style="list-style-type: none"> • CCS sur le site de production
	En mélange dans les réseaux de gaz	x	~4%		<ul style="list-style-type: none"> • Bio-méthane et e-méthane
	Stockage pour le système électrique	Nécessaire si bcp d'EnRv ³	n.a.		<ul style="list-style-type: none"> • Réservoirs hydrauliques

Légende :



Solution déployable à ... court terme



moyen terme



long terme

(1) Le pouvoir unitaire de décarbonation est calculé par rapport à une situation de référence qui est majoritaire au sein du segment analysé.

(2) L'horizon temporel pertinent est défini en fonction de la maturité technologique de la solution associée à l'utilisation d'H₂ mais également au contexte (ex : avec le temps, l'activité des raffineries va fortement diminuer donc le besoin en H₂ bas-carbone est défini comme transitoire).

(3) Énergies renouvelables variables.

Quels enseignements tirer de l'analyse intra-sectorielle ?

Les usages analysés sont classés en trois typologies :

Voies sans regrets

Voies potentiellement pertinentes

Voies sans issues

Au sein de ces typologies, comment établir un ordre de mérite des usages vers qui orienter en priorité les volumes disponibles ?

Intensité décarbonante de l'H₂ (tCO₂e réduit / tH₂) :

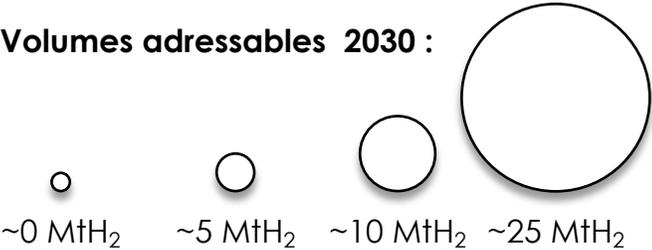


Comparaison inter-sectorielle finale

Pertinence, intensité décarbonante et potentiel volume en 2030 de l'hydrogène bas-carbone selon le secteur d'usage
(tCO₂e évitée / tH₂)



Volumes adressables 2030 :

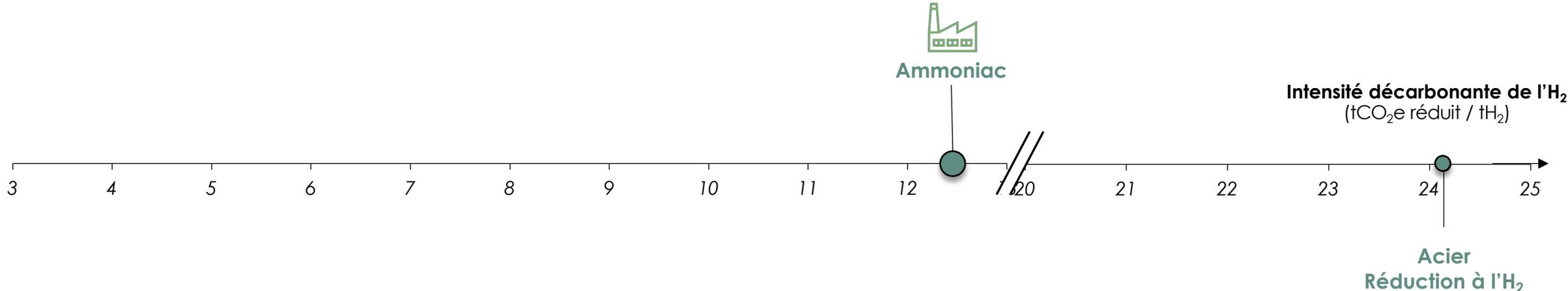


Pertinence au sein de l'usage :

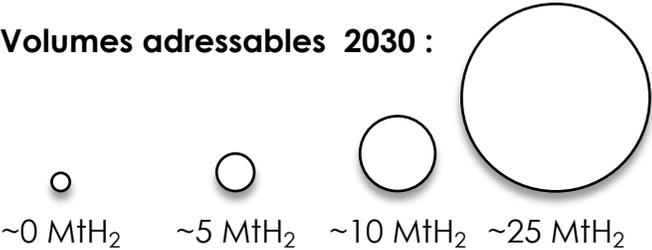


Comparaison inter-sectorielle finale

Pertinence, intensité décarbonante et potentiel volume en 2030 de l'hydrogène bas-carbone selon le secteur d'usage
(tCO₂e évitée / tH₂)



Volumes adressables 2030 :

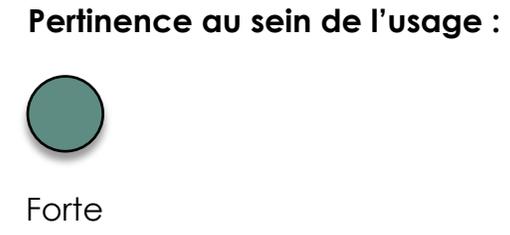
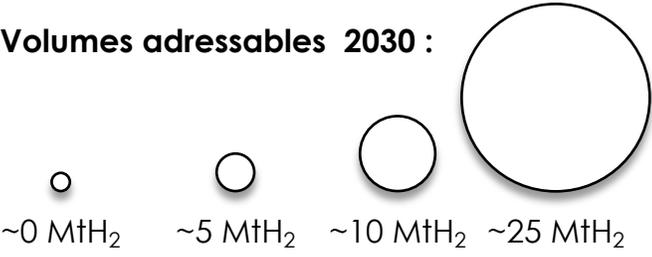
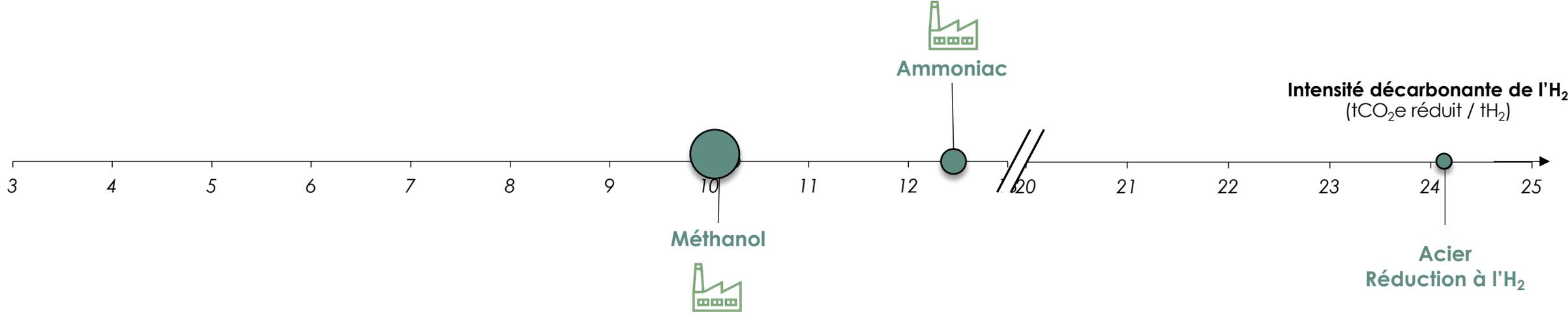


Pertinence au sein de l'usage :



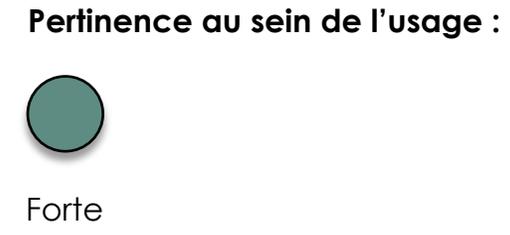
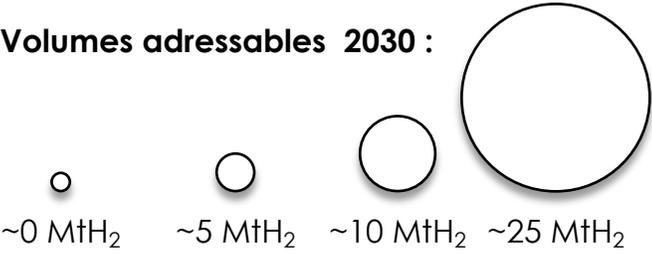
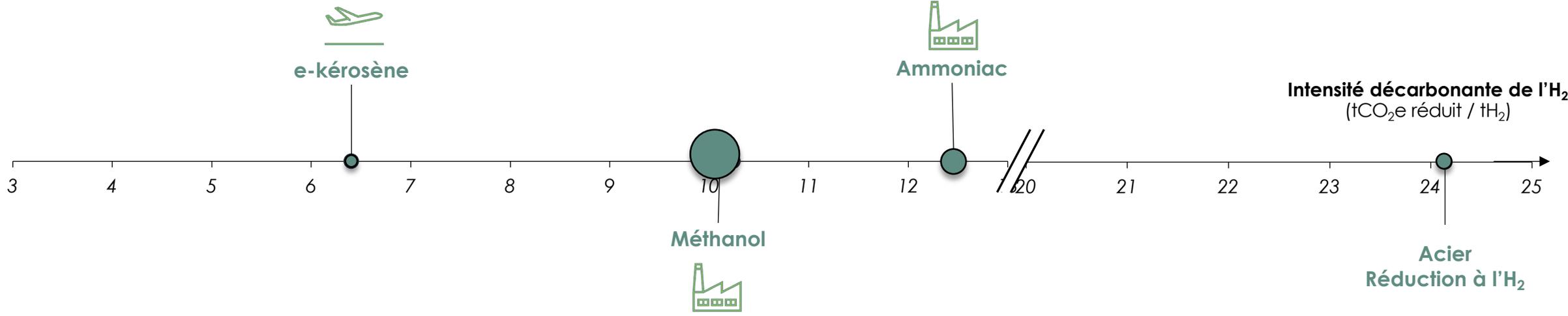
Comparaison inter-sectorielle finale

Pertinence, intensité décarbonante et potentiel volume en 2030 de l'hydrogène bas-carbone selon le secteur d'usage
(tCO₂e évitée / tH₂)



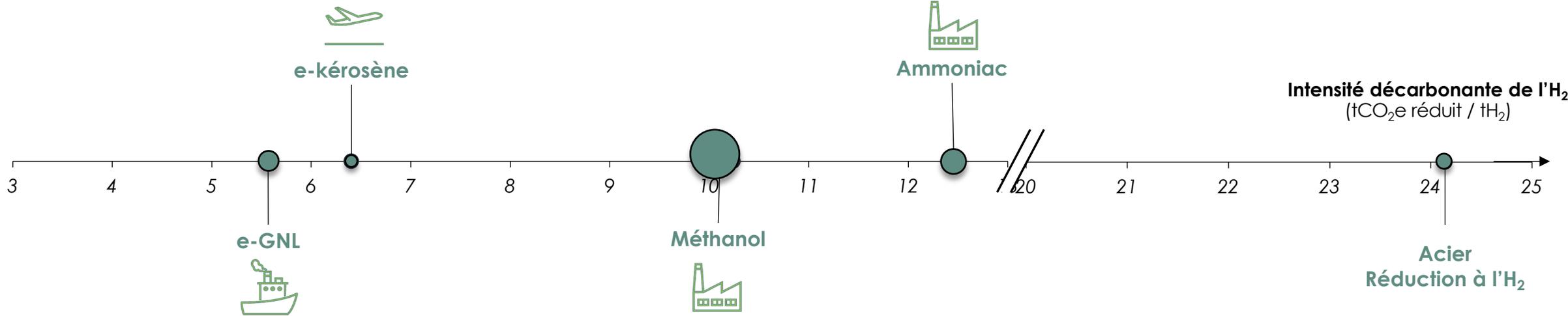
Comparaison inter-sectorielle finale

Pertinence, intensité décarbonante et potentiel volume en 2030 de l'hydrogène bas-carbone selon le secteur d'usage
(tCO₂e évitée / tH₂)

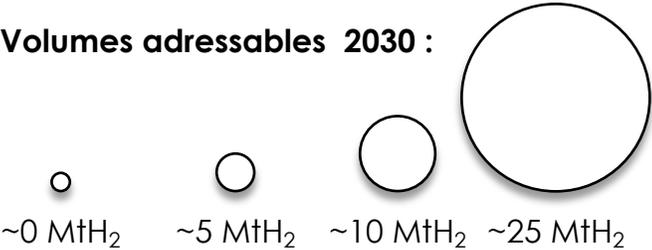


Comparaison inter-sectorielle finale

Pertinence, intensité décarbonante et potentiel volume en 2030 de l'hydrogène bas-carbone selon le secteur d'usage
(tCO₂e évitée / tH₂)



Volumes adressables 2030 :

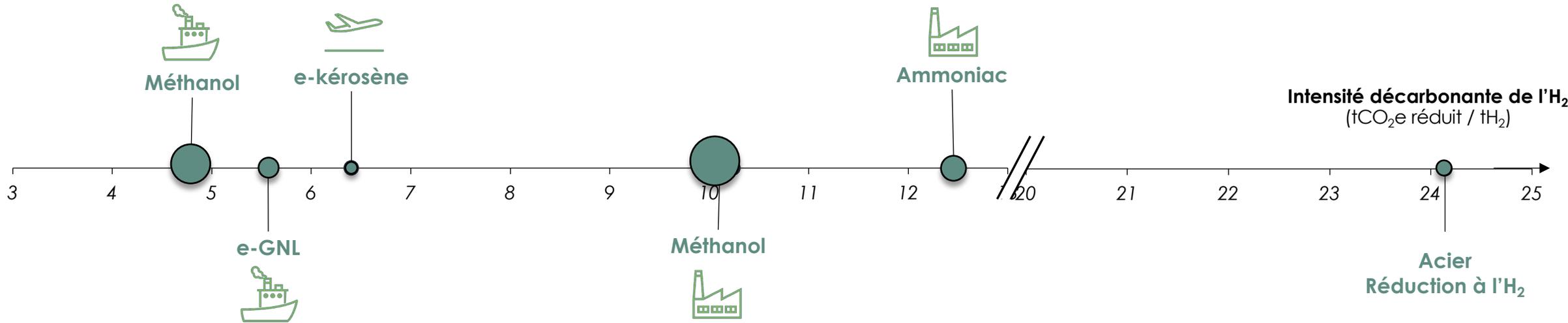


Pertinence au sein de l'usage :

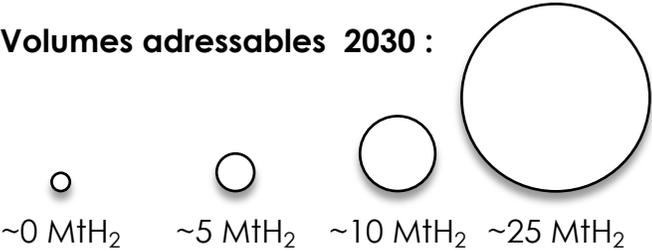


Comparaison inter-sectorielle finale

Pertinence, intensité décarbonante et potentiel volume en 2030 de l'hydrogène bas-carbone selon le secteur d'usage
(tCO₂e évitée / tH₂)



Volumes adressables 2030 :

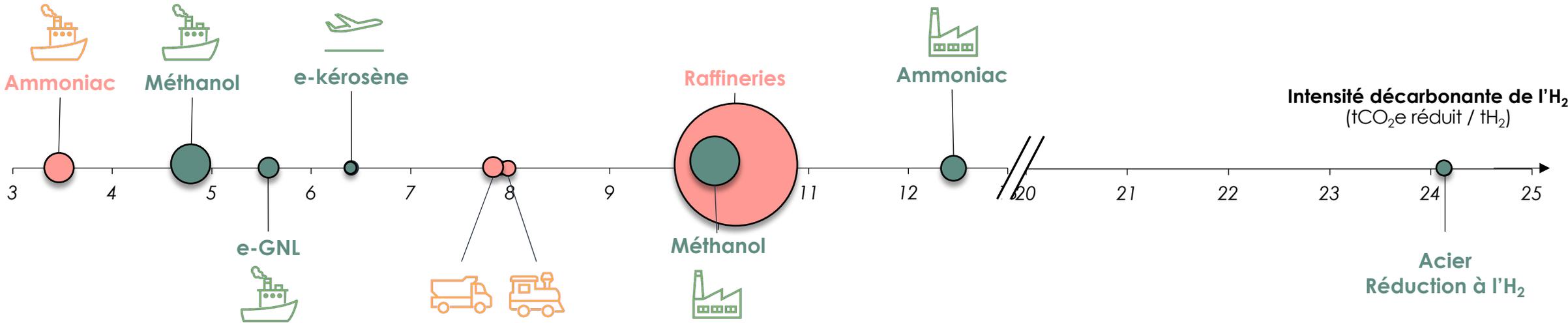


Pertinence au sein de l'usage :

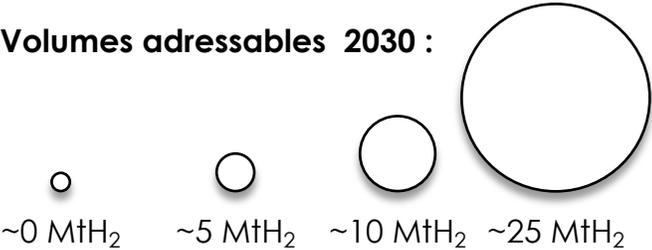


Comparaison inter-sectorielle finale

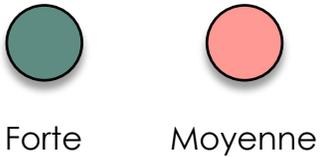
Pertinence, intensité décarbonante et potentiel volume en 2030 de l'hydrogène bas-carbone selon le secteur d'usage
(tCO₂e évitée / tH₂)



Volumes adressables 2030 :

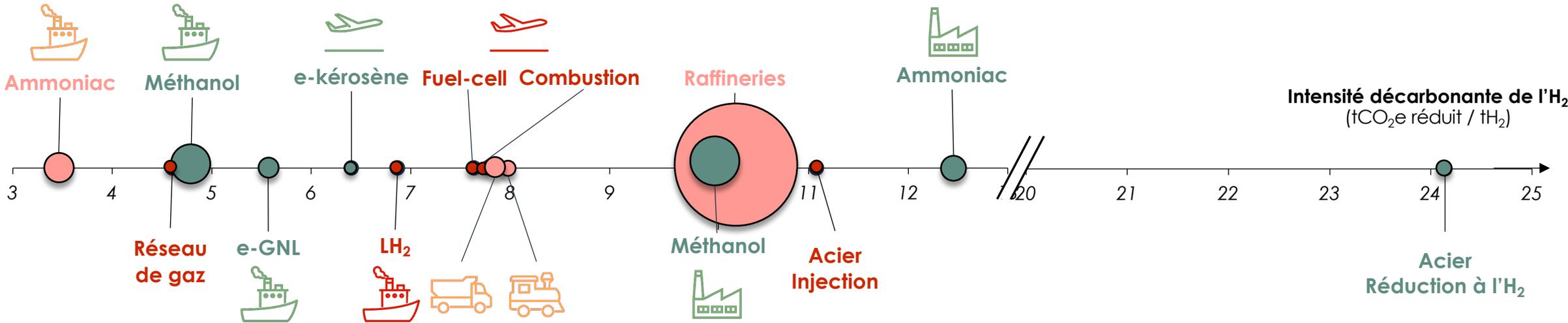


Pertinence au sein de l'usage :

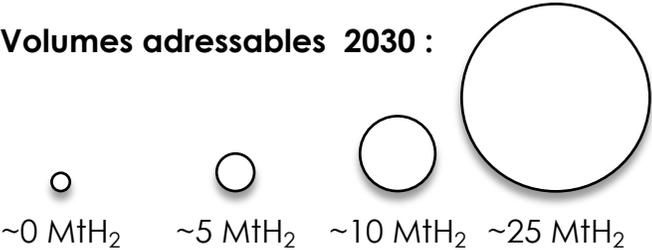


Comparaison inter-sectorielle finale

Pertinence, intensité décarbonante et potentiel volume en 2030 de l'hydrogène bas-carbone selon le secteur d'usage
(tCO₂e évitée / tH₂)



Volumes adressables 2030 :



Pertinence au sein de l'usage :



Merci pour votre écoute !



Paris
Lyon
Toulouse
Rennes

www.carbone4.com