



# Evaluation des impacts environnementaux de la production d'hydrogène par Analyse de Cycle de Vie



Joanna SCHLESINGER (she/her)

Centre Observation, Impacts, Energie

19 Janvier 2023

# LE VÉHICULE HYDROGENE : ZÉRO ÉMISSIONS ?

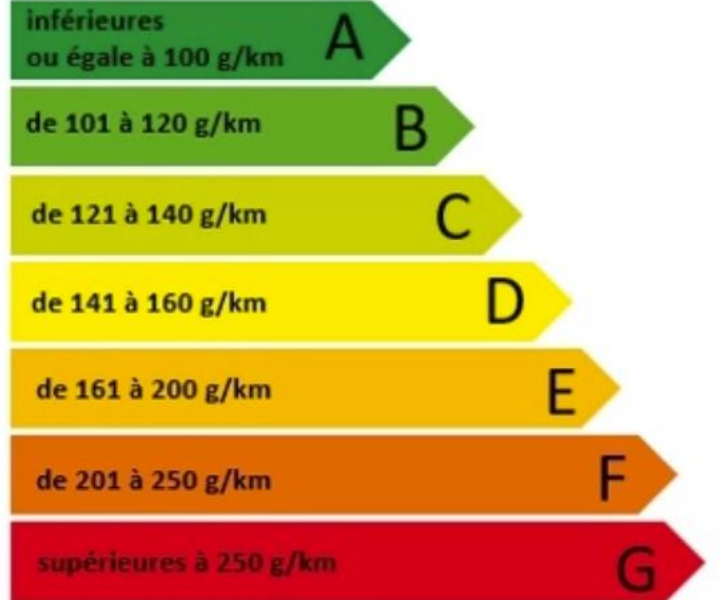
Mirai

L'HYDROGÈNE ET LA PILE À  
COMBUSTIBLE. 0%  
ÉMISSIONS

A 0g CO<sub>2</sub>/km → 0 gCO<sub>2</sub>/km



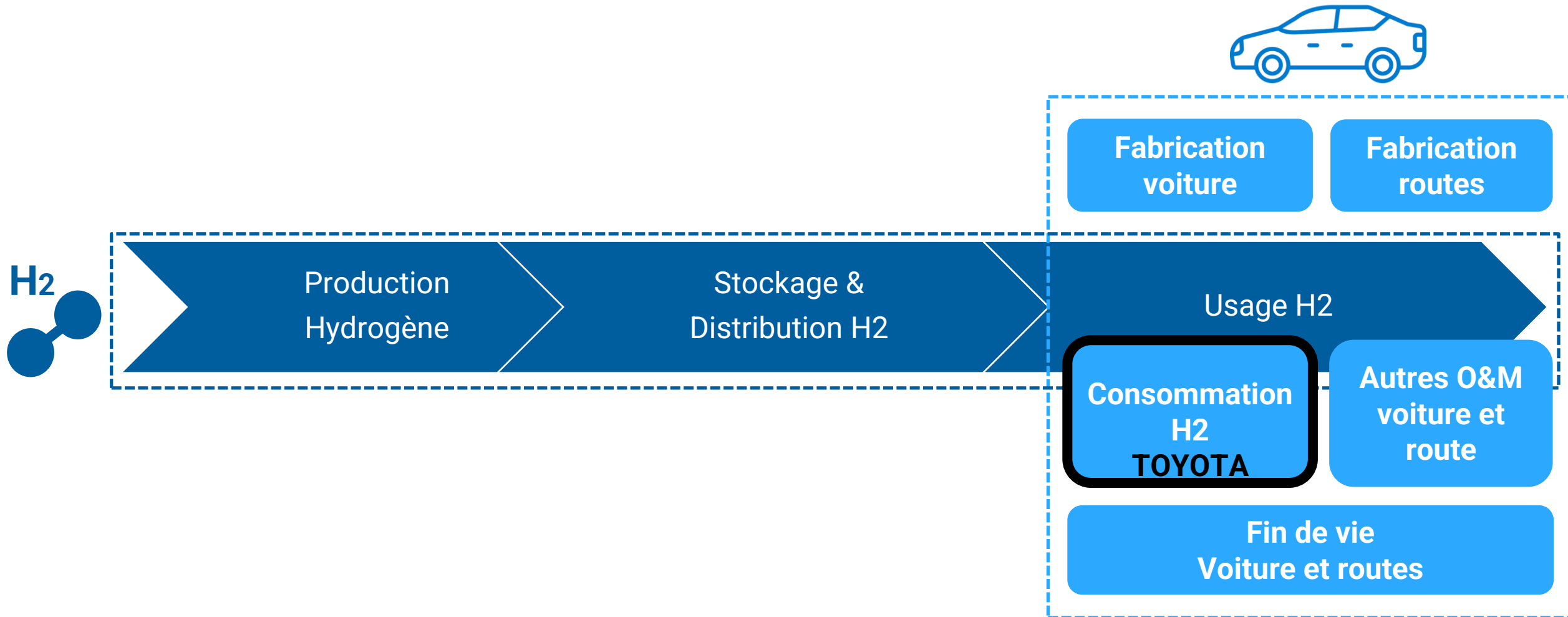
## Emissions de CO<sub>2</sub> faibles



## Emissions de CO<sub>2</sub> élevées

Source: Site Toyota, 2022

# LE VÉHICULE HYDROGENE : ZÉRO ÉMISSIONS ?



# LE VÉHICULE HYDROGENE : ZÉRO ÉMISSIONS ?

Mirai

L'HYDROGÈNE ET LA PILE À  
COMBUSTIBLE. 0%  
ÉMISSIONS

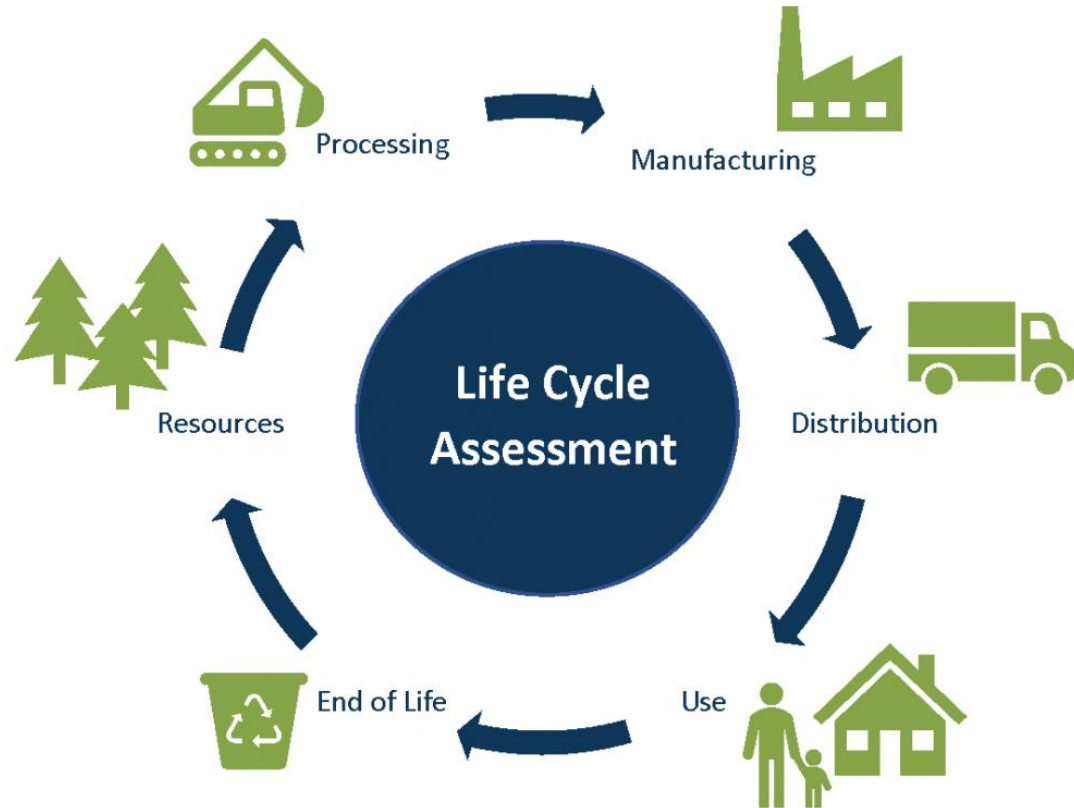
A 0g CO<sub>2</sub>/km 0 gCO<sub>2</sub>/km



- **Périmètre ?**  
Phase de roulage de la voiture
- **Unité fonctionnelle ?**  
km parcouru
- **Catégorie(s) d'impact ?**  
Changement climatique

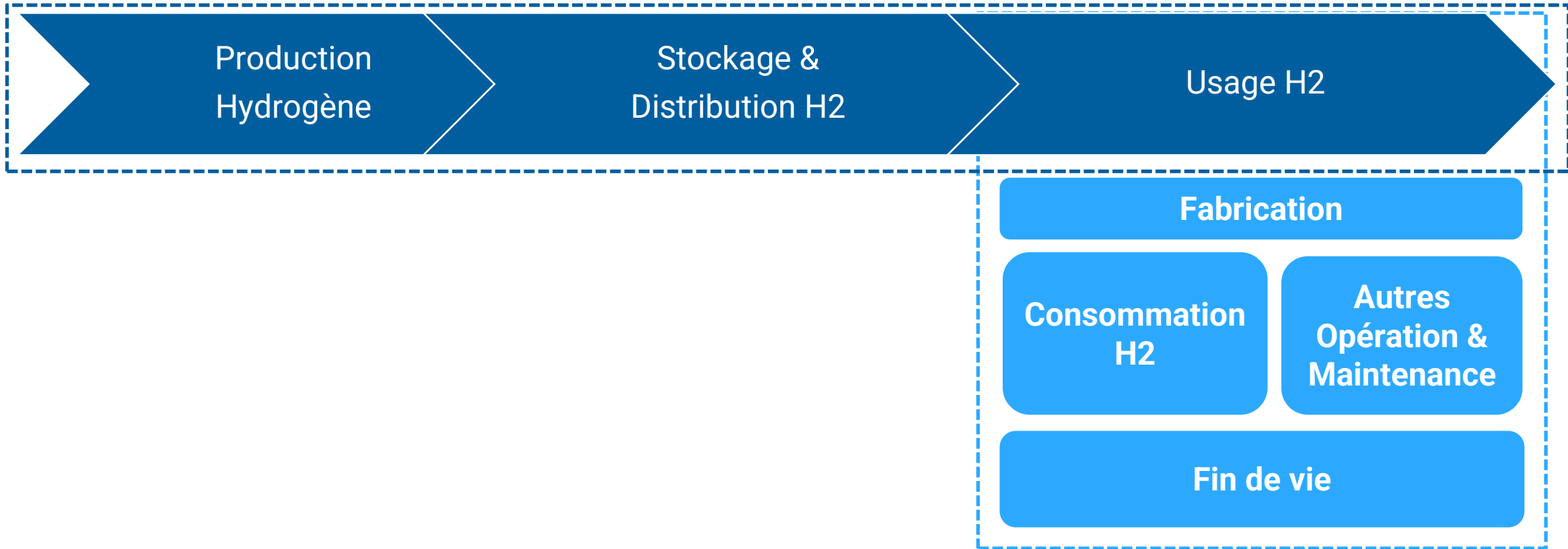
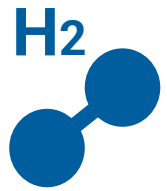
Source: Site Toyota, 2022

# ANALYSE DE CYCLE DE VIE (ACV) LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA)



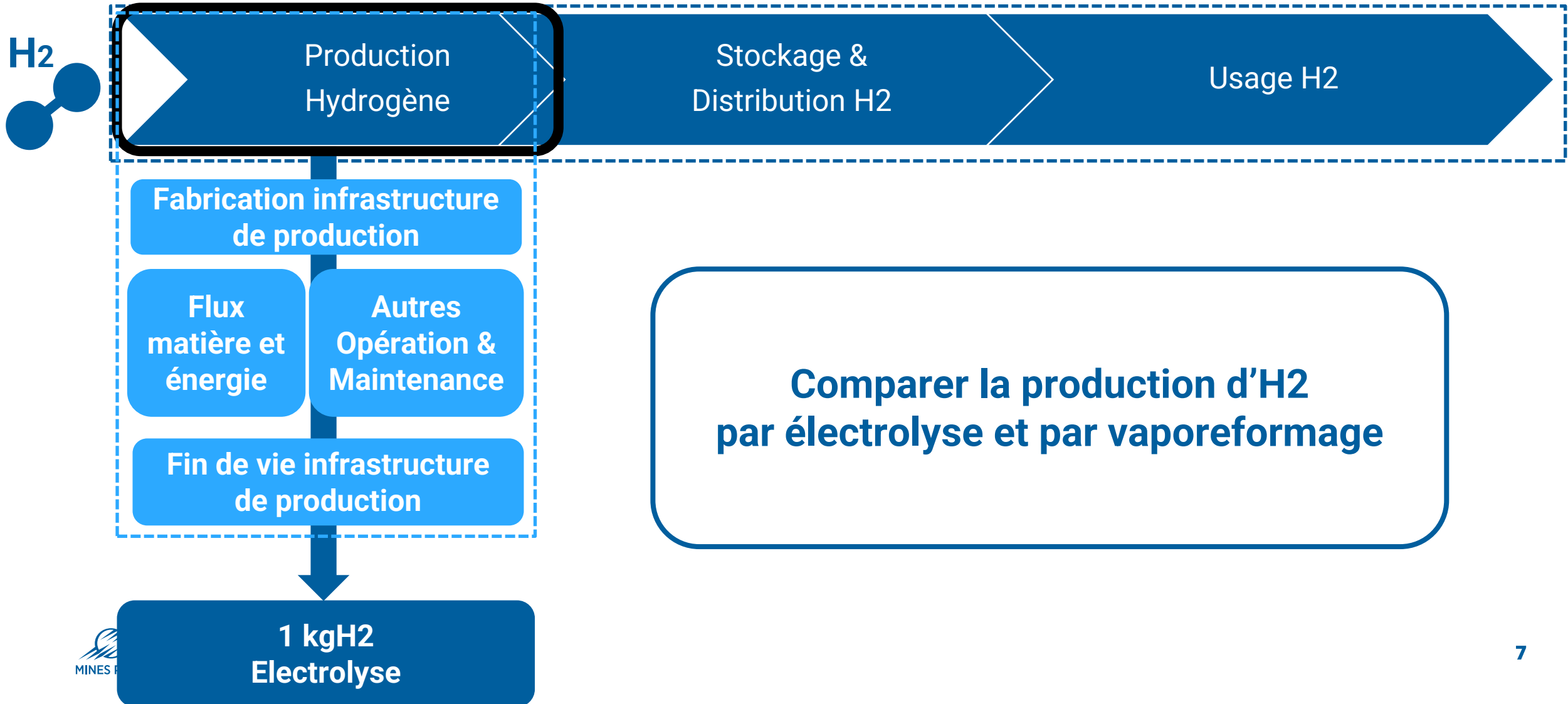
- **Outil / méthode**
- **Multicritère**
- **Quantitative**
- **Produit ou service**
- **Cycle de vie**
- **Normée (ISO 14040 et 14044)**

# PÉRIMÈTRE : PRODUCTION D'HYDROGÈNE



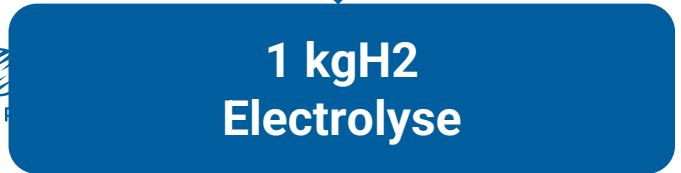
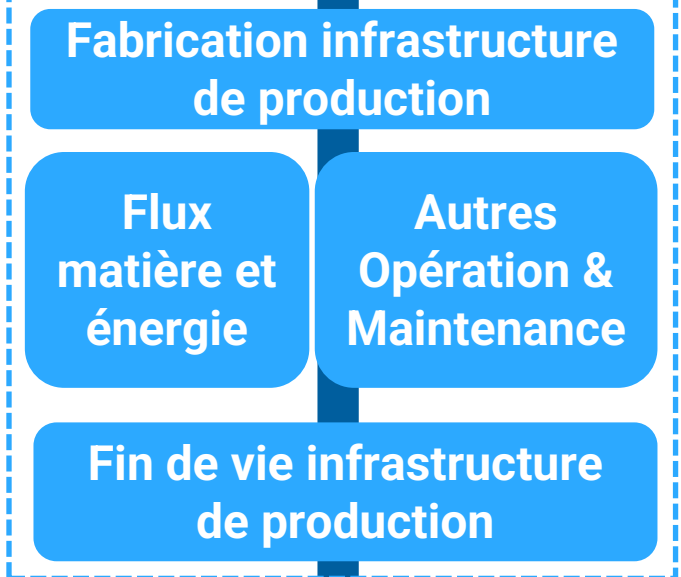


# PÉRIMÈTRE : PRODUCTION D'HYDROGÈNE

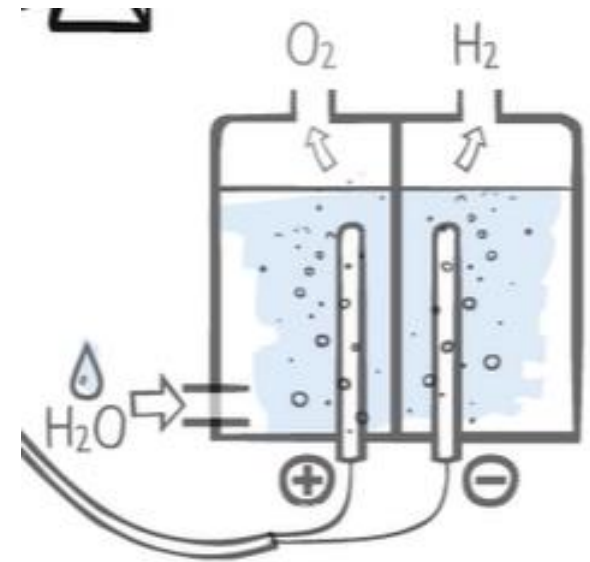
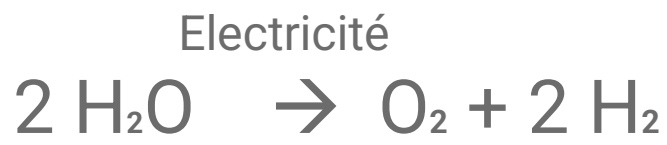


# PRODUCTION D'HYDROGÈNE PAR ELECTROLYSE

H<sub>2</sub>



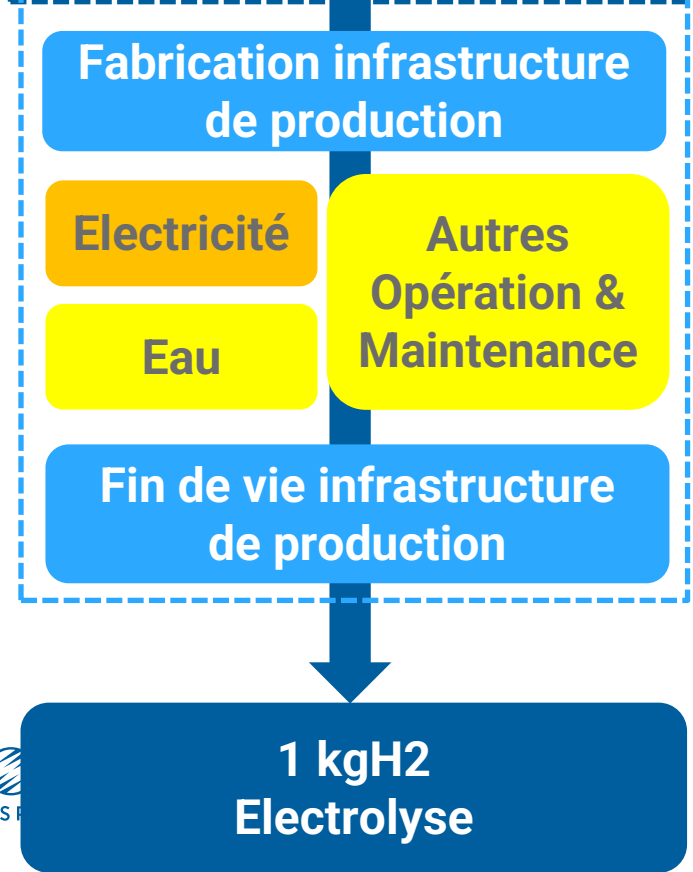
## Electrolyse



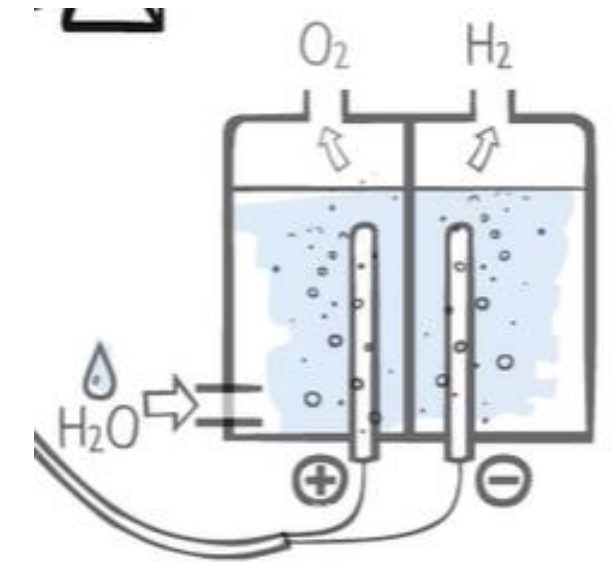
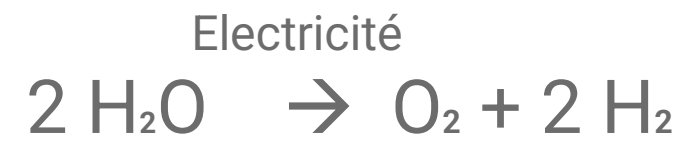


# PRODUCTION D'HYDROGÈNE PAR ELECTROLYSE

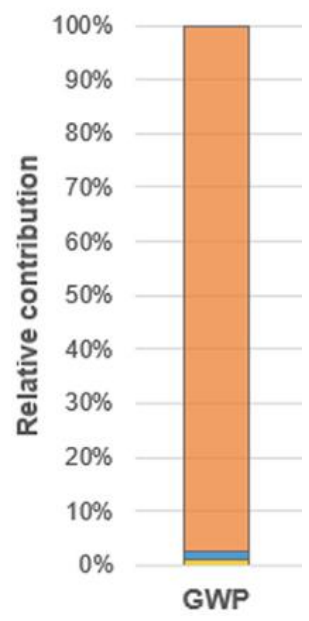
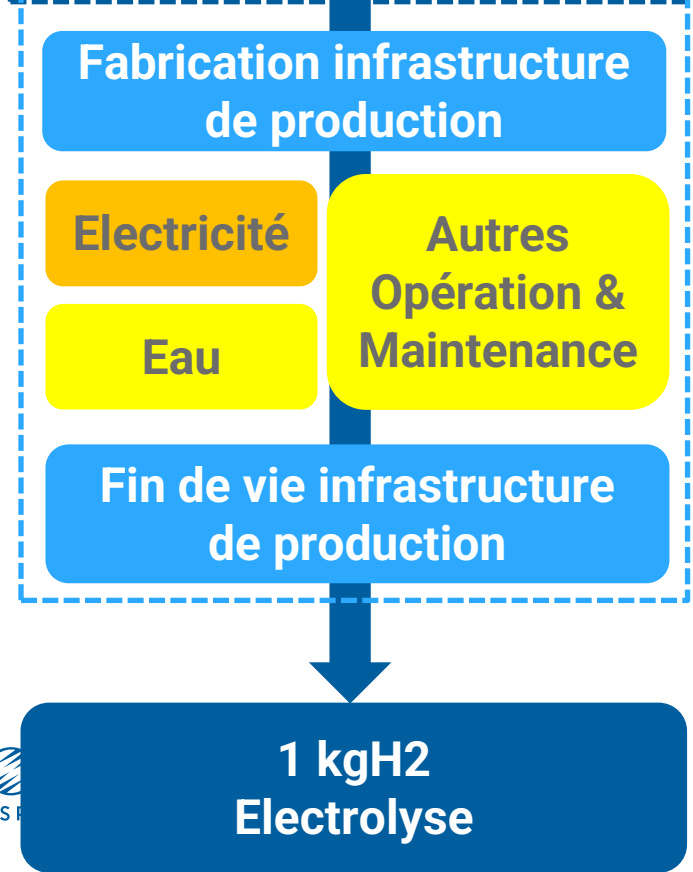
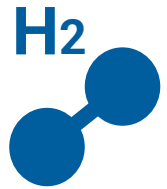
H<sub>2</sub>



## Electrolyse



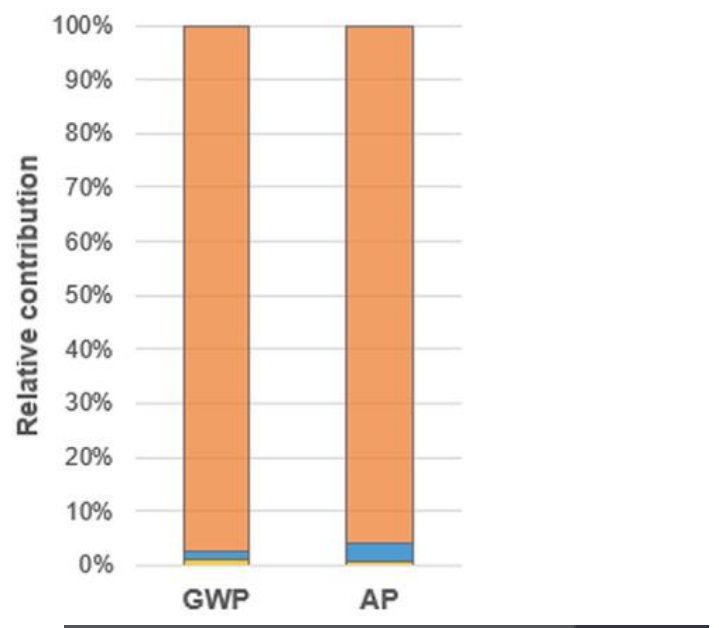
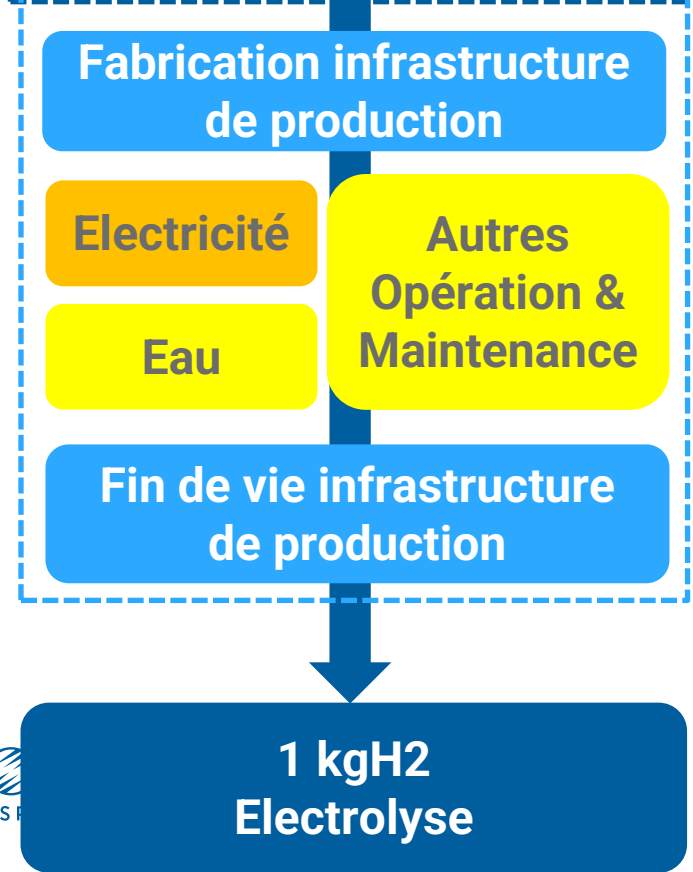
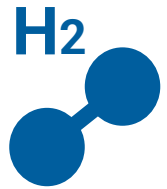
# PRODUCTION D'HYDROGÈNE PAR ELECTROLYSE



global warming (GWP)

UF : 1 kg of H<sub>2</sub> with 99.9% (vol.) purity at 200 bar and 25 °C, Electrolyse alcalyne à partir d'électricité éolienne

# PRODUCTION D'HYDROGÈNE PAR ELECTROLYSE



global warming (GWP)  
acidification (AP)

UF : 1 kg of H<sub>2</sub> with 99.9% (vol.) purity at 200 bar and 25 °C, Electrolyse alcalyne à partir d'électricité éolienne

# PRODUCTION D'HYDROGÈNE PAR ELECTROLYSE



## PRODUCTION H<sub>2</sub> par électrolyse

les impacts environnementaux proviennent majoritairement de la **production d'électricité**

1 kgH<sub>2</sub>  
Electrolyse

GWP AP  
global warming (GWP)  
acidification (AP)

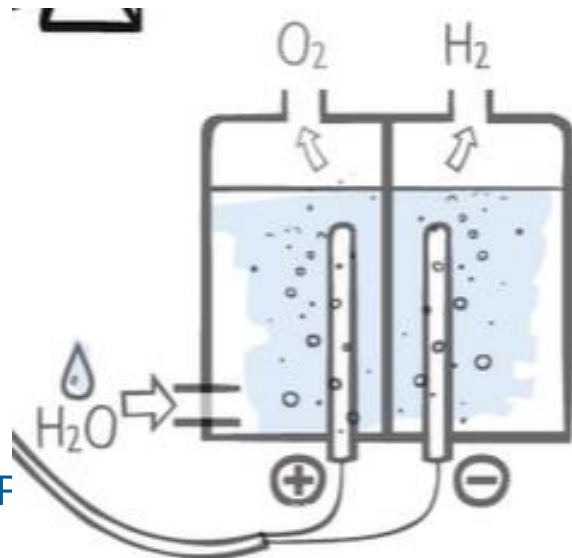
# PRODUCTION H<sub>2</sub> PAR ELECTROLYSE ET VAPOREFORMAGE

H<sub>2</sub>

## Electrolyse

Avec électricité bas carbone

Electricité



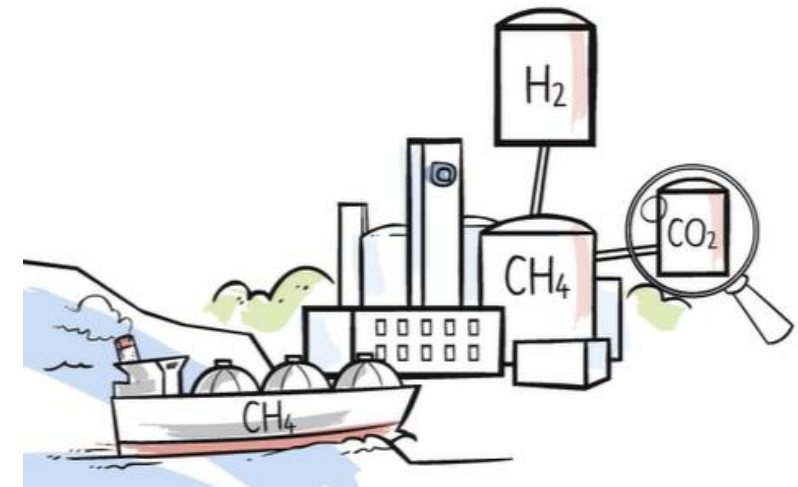
H<sub>2</sub>

## Vaporeformage

Vapeur d'eau



Remarque : Réaction simplifiée !



# PRODUCTION D'HYDROGÈNE PAR VAPOREFORMAGE (SMR)

Grey H<sub>2</sub>  
Steam Methane reforming (SMR)

Blue H<sub>2</sub>  
SMR avec Carbon Capture and Storage (CCS)



- Climate change [kg CO<sub>2</sub>-eq/kg H<sub>2</sub>]
- Acidification [mol H<sup>+</sup> eq/kg H<sub>2</sub>]
- HH non-cancer [CTUh/kg H<sub>2</sub>]
- HH cancer [CTUh/kg H<sub>2</sub>]
- Ionising radiation [kg Bq U235 Eq/kg H<sub>2</sub>]
- Minerals and Metals Depletion [kg Sb eq/kg H<sub>2</sub>]

• ADEME 2020  
<https://www.ademe.fr/analyse-cycle-vie-relative-a-lhydrogene>

# PRODUCTION D'HYDROGÈNE PAR VAPOREFORMAGE (SMR)

Grey H<sub>2</sub>

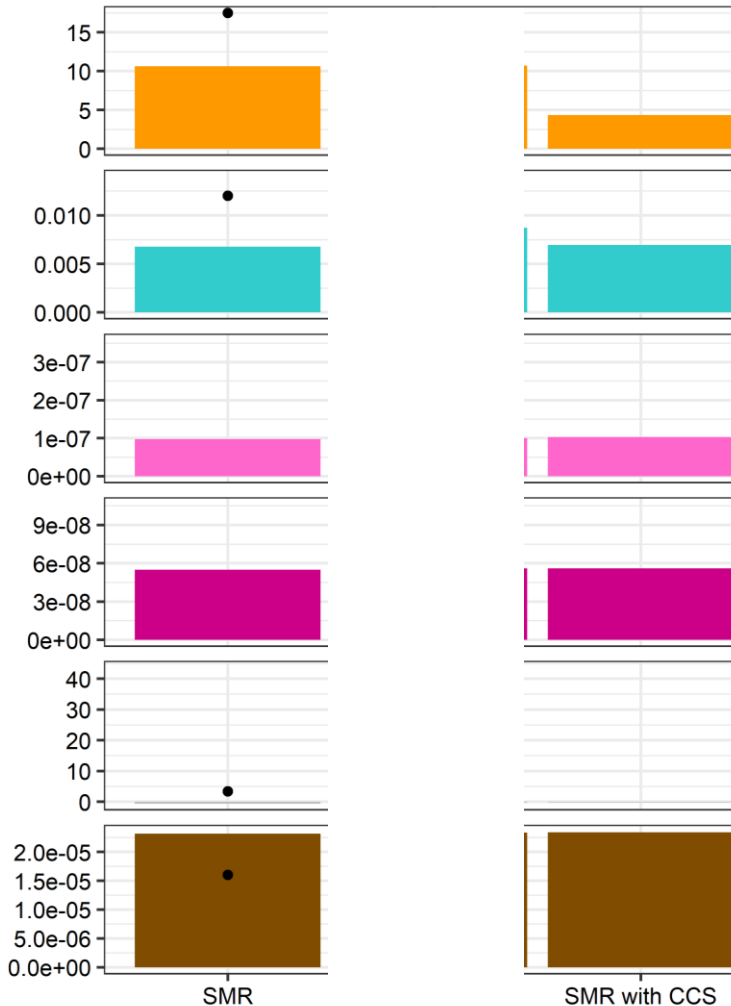
Blue H<sub>2</sub>

Grey H<sub>2</sub>

Steam Methane reforming (SMR)

Blue H<sub>2</sub>

SMR avec Carbon Capture and Storage (CCS)

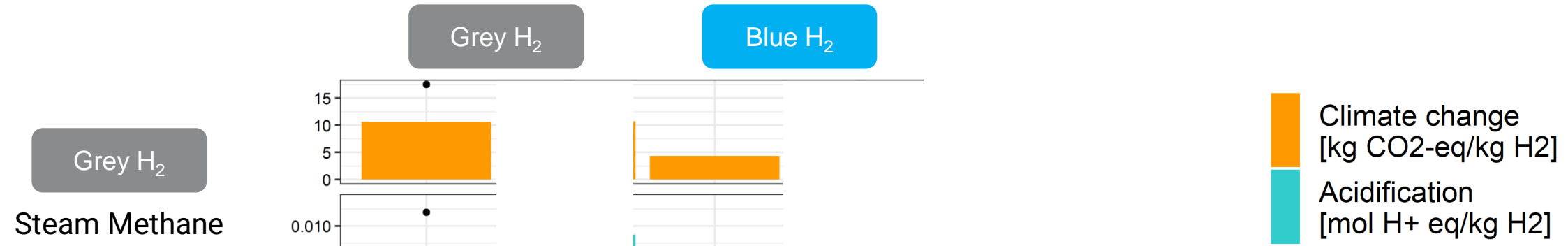


- Climate change [kg CO<sub>2</sub>-eq/kg H<sub>2</sub>]
- Acidification [mol H<sup>+</sup> eq/kg H<sub>2</sub>]
- HH non-cancer [CTUh/kg H<sub>2</sub>]
- HH cancer [CTUh/kg H<sub>2</sub>]
- Ionising radiation [kg Bq U235 Eq/kg H<sub>2</sub>]
- Minerals and Metals Depletion [kg Sb eq/kg H<sub>2</sub>]

● ADEME 2020  
<https://www.ademe.fr/analyse-cycle-vie-relative-a-lhydrogene>



# PRODUCTION D'HYDROGÈNE PAR VAPOREFORMAGE (SMR)



Steam Methane  
ref

**PRODUCTION H<sub>2</sub> par vaporeformage**  
 Pour l'impact changement climatique,  
 préciser avec ou sans Carbon Capture and Storage



● ADEME 2020  
<https://www.ademe.fr/analyse-cycle-vie-relative-a-lhydrogene>

# PRODUCTION D'H2 : ELECTROLYSE VS VAPOREFORMAGE

Grey H<sub>2</sub>

Blue H<sub>2</sub>

Electrolyse  
Green H<sub>2</sub>

Grey H<sub>2</sub>

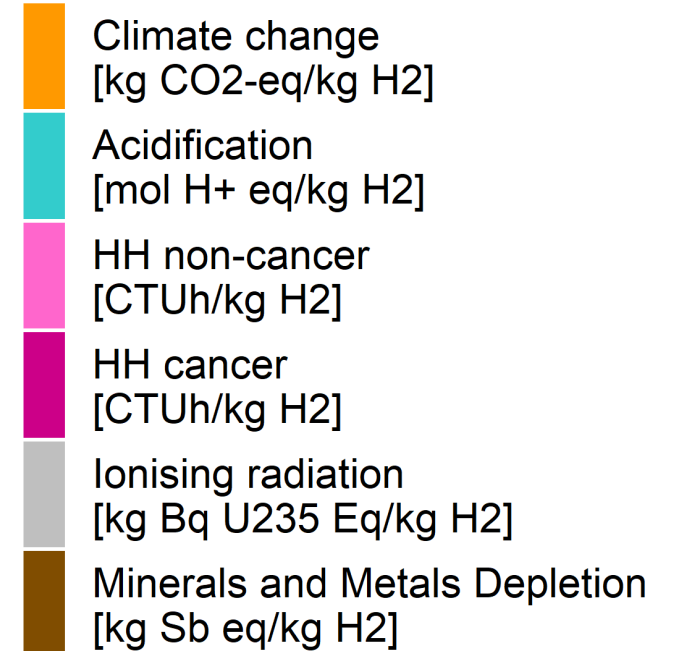
Steam Methane  
reforming (SMR)

Blue H<sub>2</sub>

SMR avec Carbon  
Capture and  
Storage (CCS)

Electrolyse  
H<sub>2</sub>

Mix électrique  
français 2020  
(bas carbone)



- ADEME 2020  
<https://www.ademe.fr/analyse-cycle-vie-relative-a-lhydrogene>

# PRODUCTION D'H2 : ELECTROLYSE VS VAPOREFORMAGE

Grey H<sub>2</sub>  
Steam Methane reforming (SMR)

Blue H<sub>2</sub>

SMR avec Carbon Capture and Storage (CCS)

Electrolyse H<sub>2</sub>

Mix électrique français 2020 (bas carbone)



- Climate change [kg CO2-eq/kg H2]
- Acidification [mol H+ eq/kg H2]
- HH non-cancer [CTUh/kg H2]
- HH cancer [CTUh/kg H2]
- Ionising radiation [kg Bq U235 Eq/kg H2]
- Minerals and Metals Depletion [kg Sb eq/kg H2]

• ADEME 2020  
<https://www.ademe.fr/analyse-cycle-vie-relative-a-lhydrogene>

# PRODUCTION D'H2 : ELECTROLYSE VS VAPOREFORMAGE

Grey H<sub>2</sub>

Blue H<sub>2</sub>

Electrolyse  
Green H<sub>2</sub>

Grey H<sub>2</sub>

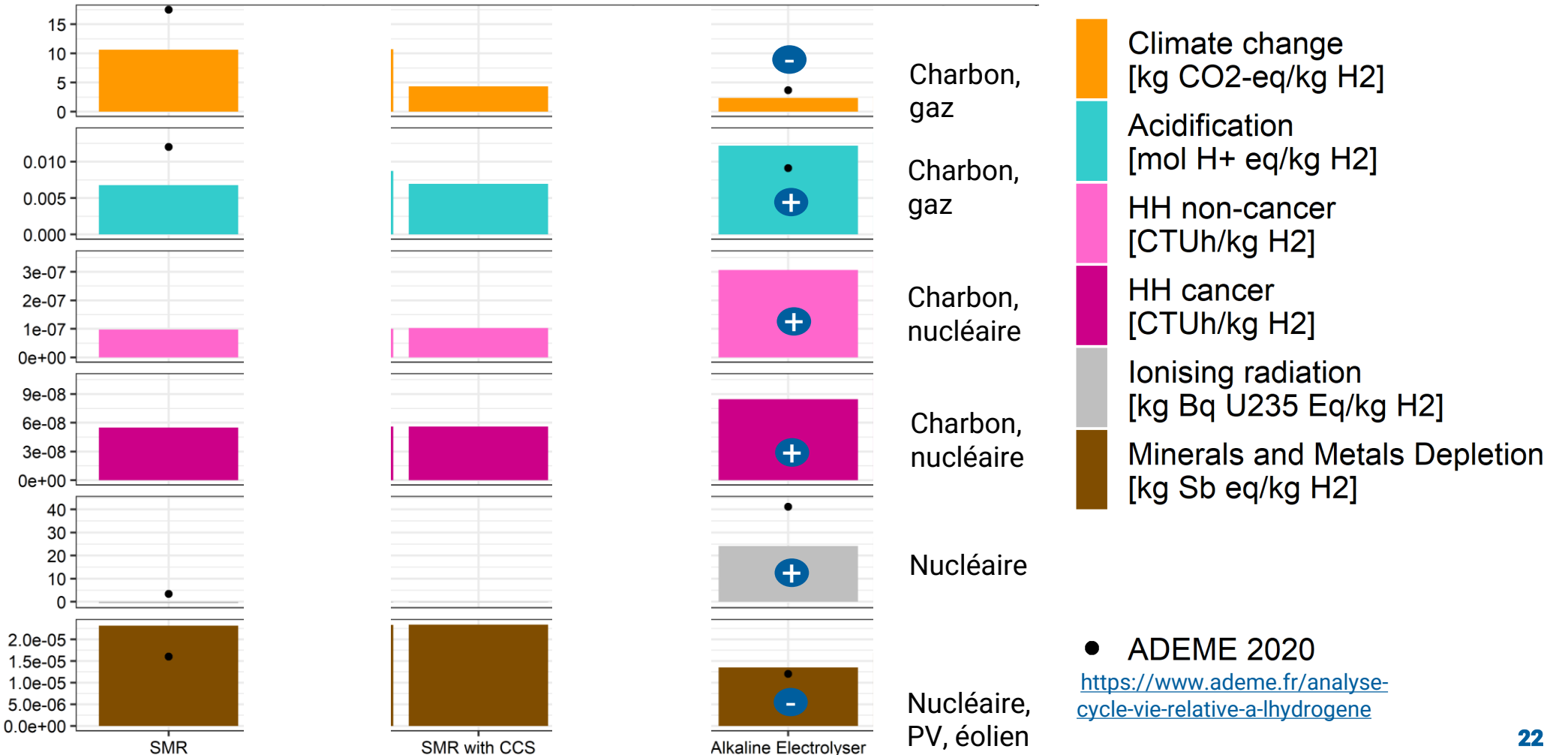
Steam Methane  
reforming (SMR)

Blue H<sub>2</sub>

SMR avec Carbon  
Capture and  
Storage (CCS)

Electrolyse  
H<sub>2</sub>

Mix électrique  
français 2020  
(bas carbone)



# PRODUCTION D'H2 : ELECTROLYSE VS VAPOREFORMAGE

Electrolyse

- **Impact changement climatique**

La production par électrolyse est favorable sous réserve d'avoir une électricité bas carbone en entrée.

« Hydrogène bas carbone » (taxonomie européenne) : 3 kg CO2 eq/kg H2

- **Autres impacts :**

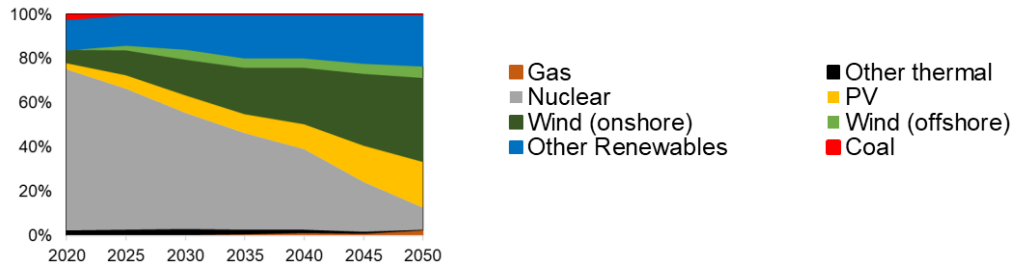
Dépendent du mix électrique en entrée

Warning pour l'électricité bas carbone :

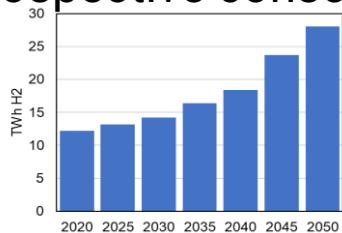
- Sur « raréfaction des ressources minérales » (PV, éolien)
- Sur « radiations ionisantes » (nucléaire)

# IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX PROSPECTIFS DE LA FILIERE HYDROGENE (AVEC ISIGE)

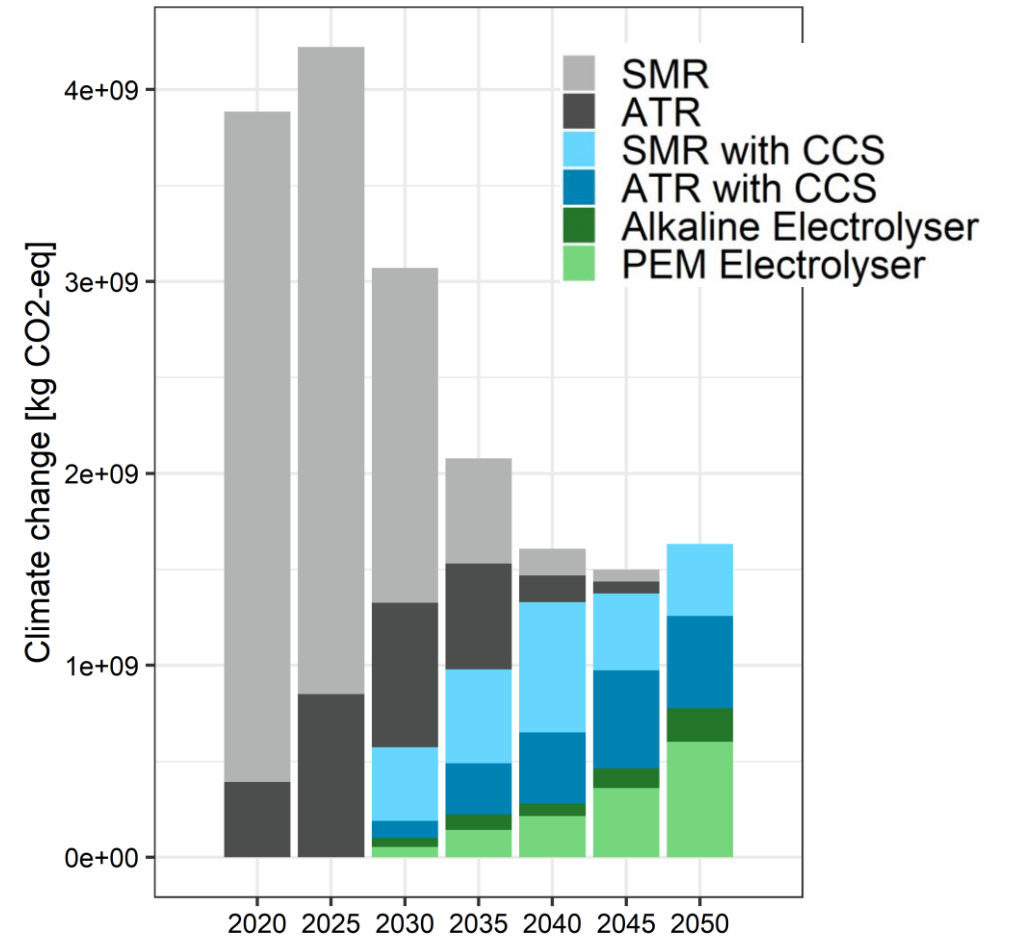
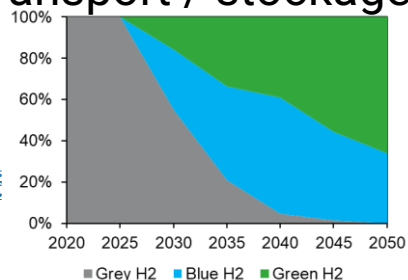
- Prospective mix électrique



- Prospective consommation H2



- Prospective mode production H2 (+ transport / stockage)

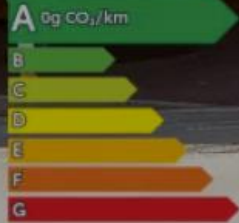


# IMPORTANT POUR COMPRENDRE LES RESULTATS D'ACV: SAVOIR DE QUOI ON PARLE

Mirai

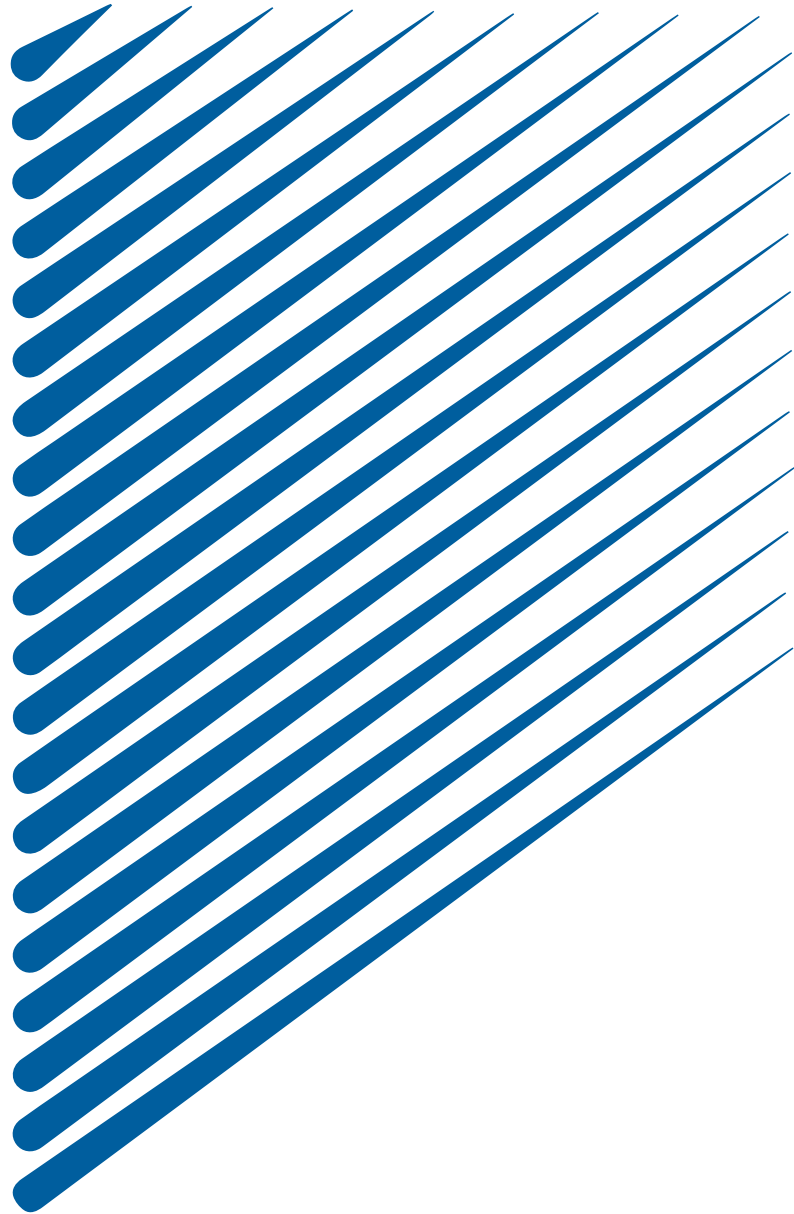
L'HYDROGÈNE ET LA PILE À  
COMBUSTIBLE. 0%  
ÉMISSIONS

0 gCO<sub>2</sub>/km



- **De quoi mesure-t-on les impacts ?**
  - Périmètre
  - Unité fonctionnelle
- **Quels impacts sont étudiés ?**
  - Pas uniquement le changement climatique





**Merci !**

[joanna.schlesinger@minesparis.psl.eu](mailto:joanna.schlesinger@minesparis.psl.eu)

# COMPLEMENTS

- Impacts des étapes de stockage et distribution de l'H2 ?



- Comment prendre en compte l'évolution des technologies de production d'H2 mais aussi d'électricité, gaz...?
- Est-ce que les fuites d'H2 dans l'atmosphère contribuent au changement climatique ?
- Approche conséquentielle : comparer l'usage de l'hydrogène aux solutions alternatives pour chaque usage

# QUELQUES RESSOURCES SUR L'ACV DES SYSTÈMES ÉNERGÉTIQUES ET HYDROGÈNE

- RTE, 2021, Futurs énergétiques 2050 :
  - + Chapitre 12, [Analyse environnementale](#) (lire intro page 1 à 4)
  - + Chapitre 9, [Hydrogène](#)
- ADEME, 2020, [Analyse de Cycle de Vie relative à l'hydrogène](#)
- Carbone 4, 2022, [Filière hydrogène et décarbonation \(webinaire\)](#) > attention seulement impact carbone considéré

# QUELQUES RESSOURCES SUR LES RECHERCHES MENÉES PAR O.I.E. SU L'ACV

- Bibliothèques de calcul Python open source: [Brightway2](#) et [lca\\_algebraic](#)
- Douziech et al. 2021, [Publication sur les modèles simplifiés d'ACV](#) et outil en ligne d'ACV simplifiée pour Géothermie ([GEO-ENVI](#))
- Outil en ligne d'ACV pour électricité éolienne au Danemark ([LCA WIND DK](#)) et publication associée ([Besseau et al., 2019](#))
- [Thèse Romain Besseau](#), 2019 : Analyse de cycle de vie de scénarios énergétiques intégrant la contrainte d'adéquation temporelle production-consommation