

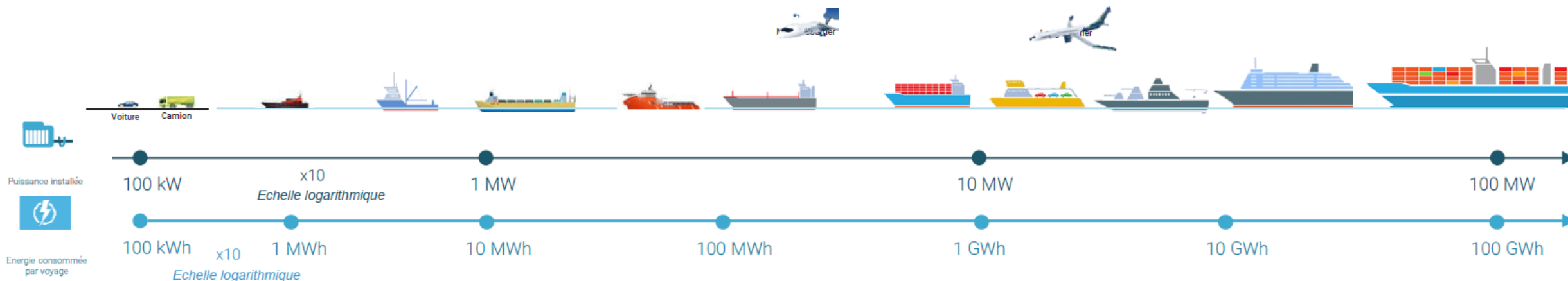
Etudes de cas traitées dans le cadre du projet

Lénaïg MELLAZA

Cheffe de projet architecture de
production éolien offshore



L'hydrogène comme appui à la décarbonation du transport maritime



Exemple de types de navires et de solutions envisagées pour réduire leurs émissions

Navires portuaires	Navires de pêche / côtiers	Fluvial	OSV	Navire transport polyvalent	Ferry Zéro émission	Corvette / Frégate	Paquebot	Porte conteneur intercontinental
Concept : Hydrogène gazeux et PAC, batterie Longueur : 5-20 m Puissance : 0.5 à 5 MW Autonomie : 50 nm Date de livraison : 2030 Gains attendus : 0 émission	Concept : Hydrogène gazeux et PAC, batterie Longueur : 5-40 m Puissance : 0.5 à 5 MW Autonomie : 100 nm Date de livraison : 2030 Gains attendus : 0 émission	Concept : Hydrogène liquide et PAC, batterie pour pic shaving Longueur : 60 à 120m Puissance : 0,5 à 3 MW Autonomie : X nm Date de livraison : 2027 Gains attendus : 0 émission	Concept : Hydrogène liquide et PAC, batterie pour pic shaving Longueur : 80-90 m Puissance : 5-6 MW Autonomie : X nm Date de livraison : 2028 Gains attendus : 0 émission	Concept : E-fuel, optimisation énergétique, assistance vélique Longueur : 120 -150 m Puissance : 10 MW Autonomie : 500 nm Date de livraison : 2030 Gains attendus : 0 émission	Concept : ferry hybride bio fuel puis e-fuel, batterie pour pic shaving Longueur : 120 -180 m Puissance : 25 MW Autonomie : 300 nm Date de livraison : 2030 Gains attendus : 0 émission	Concept : Navire militaire faible émission électrique, zéro-émission en patrouille. E-fuels, hybride, batterie pour pic shaving Longueur : 130 - 180 m Puissance : 30 MW Autonomie : 1000 nm Date de livraison : 2030 Gains attendus : 0 émissions en patrouille	Concept : 1^{er} paquebot à propulsion vélique, e-fuel et batterie, aux. hydrogène, efficacité technologique et opérationnelle maximale Longueur : 200 – 300 m Puissance : 40 MW Autonomie : 200 nm Date de livraison : 2030 Gains attendus : -50% émission	Concept : Navire Bio puis e-fuel, aux. hydrogène, courant à quai, efficacité technologique et opérationnelle maximale Longueur : 300 – 400 m Puissance : 60 MW Autonomie : 5000 nm Date de livraison : 2030 Gains attendus : -70% émission

Source : **MEET2050 – Projet H₂ as fuel**

Hydrogène gazeux - CH₂

Hydrogène liquide - LH₂

E-fuels : Ammoniac (NH₃) et méthanol (CH₃OH)

Panorama des études de cas traitées dans le cadre du projet HYDEA



	Production	Conversion	Transport	Distribution	Stockage	Usage final
Espagne						Motorisation hybride diesel/H₂ pour un ferry à passagers (Port de Vigo) Retrofit d'un tombereau vers une motorisation H₂ (Port de Vigo) Développement d'une alimentation électrique à quai (OPS) pour les navires et alimentée à partir d'H₂ vert (Port de Séville)
Portugal			Import/export d'H₂, d'ammoniac ou de méthanol			Retrofit d'équipements portuaires
Irlande						Développement d'une station d'avitaillement en H₂ (Port de Galway, Projet européen SHAMROCK)
France	Production d'H₂ à partir d'énergies renouvelables					Production d'H₂ à partir de vaporeformage du méthane (SMR) et utilisation pour alimenter une OPS (Port de Brest)

Production d'H₂ à partir d'énergies renouvelables sur le port de Brest - Contexte



Consommation potentielle d'H₂ du port de Brest (t de H₂/an)

	2030	2040	2050
Véhicules terrestres	384	3 360	5 784
Equipements portuaires	8	23	34
Flotte captive du port (remorqueurs, pilotines, etc.)	15	200	400
Réparation navale		500	1 000
Navires en transit		1 000	3 700
Navires naviguant au large de Brest (potentiellement touchés pour l'avitaillement)		560	2 700
TOTAL	407	5 643	13 618



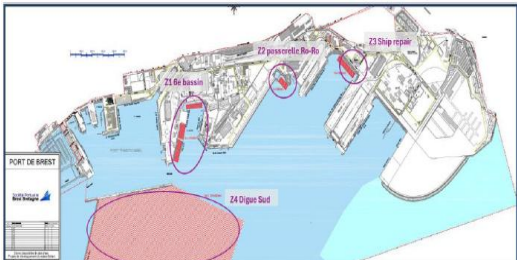
Besoins potentiels en H₂ du port de Brest (t de H₂/an)

	2030	2040	2050
Besoin minimum	390	3 570	6 170
Besoin maximum	407	5 650	13 600

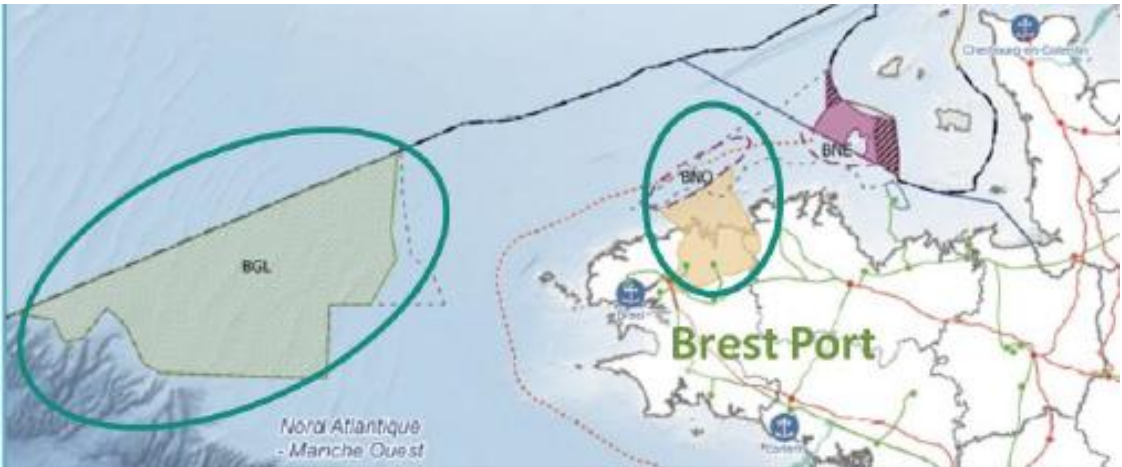
Production envisagée à partir d'énergies renouvelables



PV sur les toits des bâtiments portuaires



PV flottant



Zones de déploiement de l'éolien offshore connectées au port de Brest

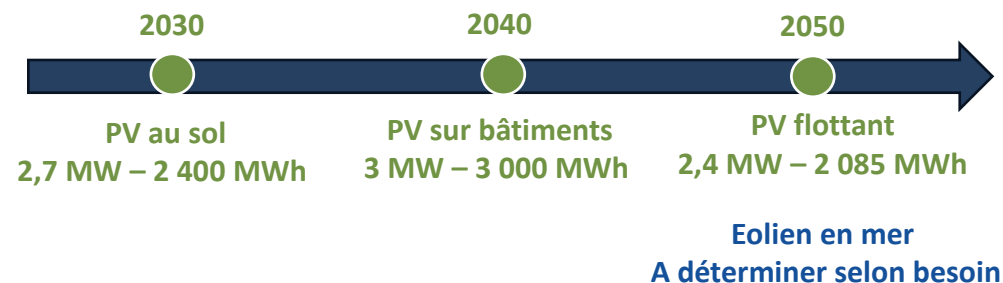
Production d'H₂ à partir d'énergies renouvelables sur le port de Brest - **Evaluation**



Co-funded by
the European Union



• Planning du cas d'étude



• Evaluation technique

- Production d'H₂ à partir d'éolien en mer
 - Production d'H₂ vert effectuée à partir des premières fermes pilotes (Lhyfe)
 - Démonstration à échelle industrielle en cours (PosHYdon)
- Production d'H₂ à partir de photovoltaïque
 - Développement à l'échelle commerciale, maturité en cours
- Production d'H₂ à partir d'éolien offshore
 - Planification à l'échelle industrielle en cours de d'étude (NorthH₂)
 - Etude des optimums de capacité d'électrolyse en cours (terrestre, flottant, configuration mixte)
 - Développement de démonstrateurs pré-commerciaux (Lhyfe, démonstrateur HOPE)
- Production d'H₂ à partir d'énergie houlomotrice ou hydrolienne
 - TRL trop bas, non étudié

• Evaluation économique

Source d'H ₂	Mode de production	LCOH actuel (2025-2026)	Cible long terme (2030+)
H ₂ gris	Vaporeformage du méthane (SMR)	1-2 €/kg	1-2 €/kg
H ₂ vert (photovoltaïque)	Electrolyse à partir d'électricité produite par le photovoltaïque	3-7 €/kg	1.5-3 €/kg
H ₂ vert (éolien offshore)	Electrolyse à partir de d'électricité produite par l'éolien offshore	4-8 €/kg	2-5 €/kg

Facteurs influençant le plus le coût de l'hydrogène

- LCOE de l'éolien offshore (50-70 % du LCOH)
- CAPEX de l'électrolyseur (15 à 30 % du LCOH)
- Traitement de l'eau (< 10 % du LCOH)

• Evaluation environnementale

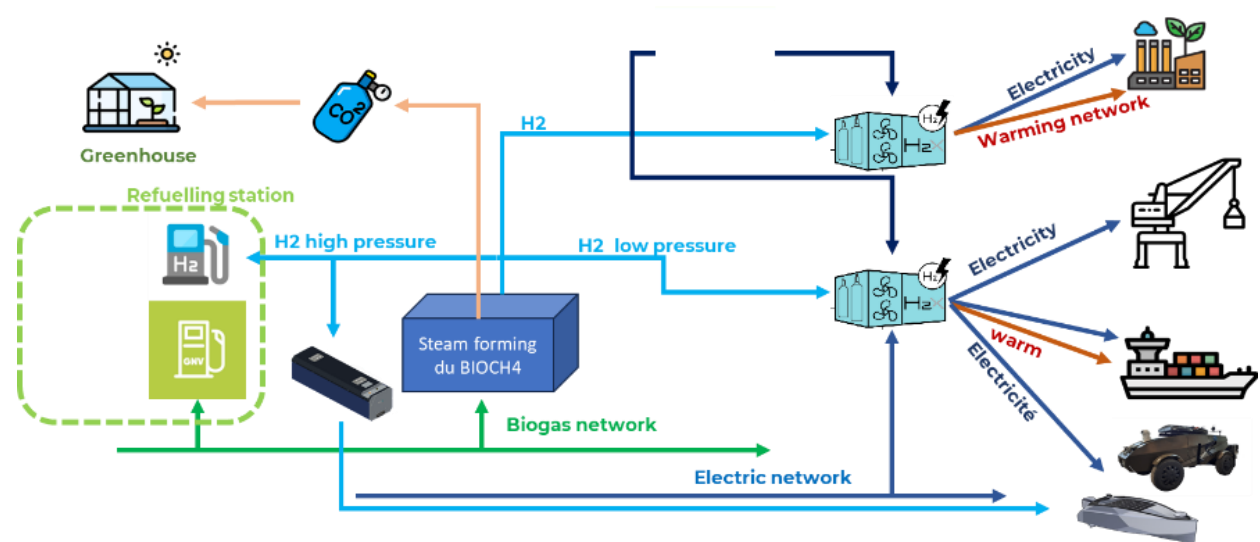
- Gains liés à l'H₂ vert : meilleure empreinte carbone, suppression des émissions de SO_x, NO_x et de particules
- Consommation d'eau ≈ 0,7 m³/MWh + génération de rejets d'eau de production (saumâtre)
- Impact environnemental des rejets d'eau de production (température, salinité et produits chimiques) en cours d'évaluation

Etude de cas très amont, en cours d'évaluation > Faisabilité liée au contexte économique sur le long terme de l'H₂ vert

Production d'H₂ par vaporeformage du méthane avec capture de carbone sur le port de Brest - Contexte



BrestPort



Indicateur/Process	Vaporeformage du méthane	Electrolyse de l'eau
Consommation pour 1 kg de H ₂	9 l d'eau du robinet + 6 kg (9 m ³) de gaz	9 l d'eau ultrapure ASTM II
Energie électrique pour 1 kg de H ₂	13 kWh (chaleur)	50-55 kWh
Surface additionnelle	Besoin uniquement d'un réseau de gaz	Besoin important d'énergie renouvelable pour un maintien à 15 €/kg
Compression et stockage à 300 bars	6-10 kWh	6-10 kWh
LCOH	5-8 €/kg	15-25 €/kg
Emission de GES	< 3,38 kg/kg de H ₂	1,9-2,8 kg/kg de H ₂
Rendement énergétique	70-75 %	70-75 %
Emprise au sol	Container de 40 pieds (480 kg/j)	Container de 30 pieds (40 kg/j)

Production d'H₂ par vaporeformage du méthane (SMR)

- 1 conteneur de 40 pieds :
 - 20 kg de H₂/h (4 modules)
 - 110 kg de CO₂/h
- LCOH avec compression et stockage : 5,9 €/kg
- Valorisation du bio-CO₂ en séquestration carbone : 170 €/t

Consommation d'électricité en bord à quai, à partir d'H₂ (H₂-to-X)

- 1 conteneur 20 pieds :
 - 26 kg H₂/h consommés par 4 PAC de 100 kW
 - Production de chaleur (760 kW)
 - Production d'eau (240 l/h à 60°C)
- Règlementation à respecter : ATEX, PE, Machine, EMC, LT

Production d'H₂ par vaporeformage du méthane avec capture de carbone sur le port de Brest - **Evaluation**



Co-funded by
the European Union

BrestPort

- **Evaluation technique**

- Technologies utilisées pour ce cas d'étude : matures et disponibles commercialement

- **Evaluation économique** du scénario d'une alimentation électrique à quai (OPS) pour remplacer les générateurs diesel du port

CAPEX + OPEX	LCOH	LCOE	ROI	ROI avec crédits carbone	Amortissement du projet sur 15 ans
H ₂ gris	4 €/kg	97 €/MWh	12 ans	10 ans	35 000 k€

- Scénario de réparation navale : financièrement viable sans subventions publiques, en prenant en compte les crédits carbone
- Autres scénarios envisagés (augmentation de la capacité de production d'H₂) visant à fournir des services supplémentaires (OPS + pics de consommation électrique + station d'avitaillement en H₂) : financièrement viables au bout de 30 ans
- Non compétitif comparé au raccordement électrique direct sur le réseau du port (puissance de 42 MW, coût d'usage de l'OPS = 0,205 €/kWh)

- **Evaluation de l'impact environnemental**

- Réduction de la consommation électrique pour le fonctionnement de la SMR par rapport à l'électrolyse (10 fois moins)
- Emissions de 3 500 t de CO₂/an évitées
- Consommation d'eau de 4,5 m³/t de H₂
- Emprise au sol comprise entre 1 400 m² et 2 200 m² au total

- **Evaluation de l'impact social**

- 3 à 6 techniciens nécessaires pour l'opération et la maintenance du système
- Création d'emplois qualifiés pour le développement et le déploiement des solutions (certification ATEX et ESP pour les solutions SMR et H₂-to-X)

La technologie H₂-to-X est une alternative, mais elle n'est pas compétitive vis-à-vis d'une production directe d'électricité