

PROGRAMME REMOVE

ReMove 
Report Modal et Verdissement des flottes de transport massif



LOG-te

Les cahiers techniques LOG-te Fluvial : les différentes solutions technologiques pour la propulsion

Version Février 2026

Sommaire

Introduction	3
I. Les bases techniques	4
a. Hors-bord	4
b. In-board.....	4
c. Z-Drive.....	5
d. Turbine	5
II. Les technologies	6
a. GNR.....	6
b. GTL.....	7
c. B100 (Biodiesel)	11
d. HVO	14
e. Le méthanol.....	18
f. GNL / Biométhane	24
g. Électricité.....	31
h. Hydrogène.....	34
III. Hybridations	41
a. Hybridation série	41
b. Hybridation parallèle	42
IV. Moteurs électriques	44
a. Moteur à courant continu – MCC	44
b. Moteur synchrone – MSRB – MSAP	45
c. Moteurs asynchrones – MAS.....	46
Conclusion	47

Introduction

La propulsion des bateaux est un domaine en constante évolution, au croisement des exigences techniques, économiques et environnementales. Dans un contexte marqué par la transition énergétique, la recherche de solutions plus performantes et moins polluantes devient un enjeu stratégique pour l'ensemble des acteurs du transport fluvial. Face au durcissement des réglementations, à la hausse du coût des carburants fossiles et à la nécessité de réduire drastiquement les émissions de gaz à effet de serre, les armateurs et constructeurs doivent explorer un éventail croissant de technologies de propulsion.

Ce cahier technique propose une vision globale et structurée des différentes solutions disponibles aujourd'hui, qu'elles soient thermiques, électriques, hybrides ou basées sur des carburants alternatifs. Il s'articule autour de quatre axes principaux :

1. **Les bases techniques** des systèmes de propulsion (hors-bord, in-board, Z-drive, turbine), afin de comprendre les principes mécaniques et hydrodynamiques qui les sous-tendent.
2. **Les carburants et énergies** utilisables, depuis les solutions conventionnelles comme le GNR jusqu'aux énergies émergentes telles que l'hydrogène, le méthanol ou l'électricité, en passant par les biocarburants (B100, HVO) et le gaz naturel liquéfié.
3. **Les systèmes hybrides**, qui combinent les avantages des motorisations thermiques et électriques, en version série ou parallèle, pour optimiser la consommation et réduire les émissions.
4. **Les moteurs électriques**, avec une présentation des différentes technologies (MCC, MSRB, MSAP, MAS) et de leurs performances en termes de rendement, compacité et maintenance.

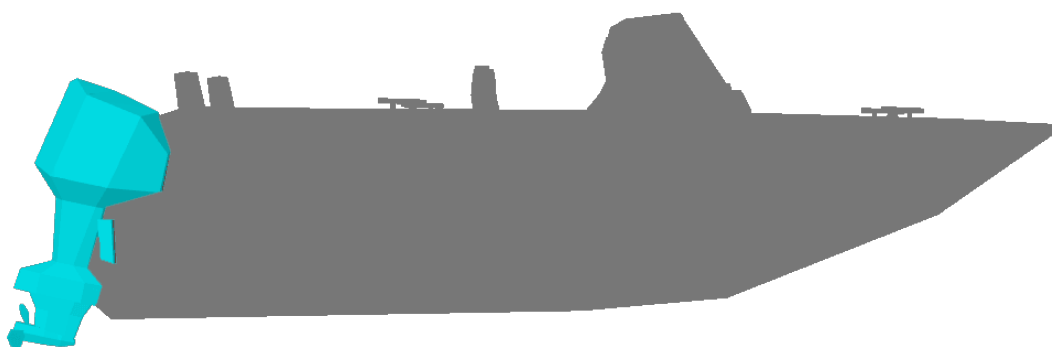
Chaque solution est analysée selon des critères précis : caractéristiques physiques, performances énergétiques, impact environnemental, normes applicables, contraintes techniques et exemples d'application. L'objectif est de fournir aux décideurs, concepteurs et exploitants un outil d'aide à la décision, leur permettant de comparer objectivement les options disponibles et d'identifier la ou les technologies les plus adaptées à leurs besoins.

En adoptant une approche à la fois technique et pragmatique, ce document vise à éclairer les choix d'aujourd'hui et à anticiper les tendances de demain, dans un secteur où l'innovation et l'adaptation sont plus que jamais les clés de la compétitivité et de la durabilité.

I. Les bases techniques

a. Hors-bord

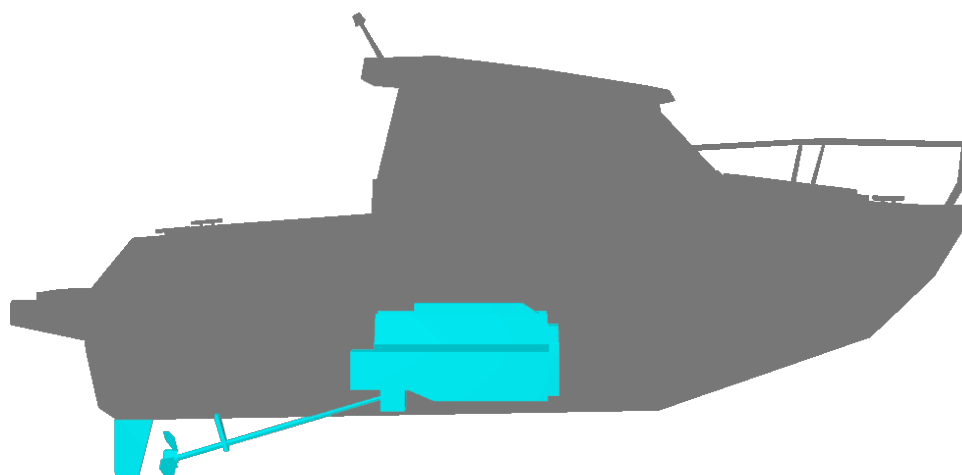
Les moteurs hors-bord sont très prisés et indispensables pour les petites embarcations. Leur légèreté et leur puissance les rendent particulièrement adaptés, et les modèles électriques les plus récents sont d'une grande discrétion sonore. Ce type de moteur assure une propulsion totalement autonome, intégrant le moteur, la transmission, l'arbre et l'hélice. Ils sont généralement fixés directement sur le tableau arrière du bateau, bien que certains modèles de bateaux prévoient un puits à moteur ou un support pour l'installation. Le moteur entier pivote pour faciliter le pilotage en permettant à l'hélice de pousser l'arrière du bateau.



b. In-board

Le moteur est placé à l'intérieur de l'embarcation ("in-board"), généralement vers le centre, pour garantir une répartition optimale du poids. Ce type de moteur se trouve principalement sur les plus grandes embarcations.

Il est directement relié à une transmission d'où part un arbre traversant la coque du bateau. Cet arbre est connecté à une hélice qui tourne pour propulser l'embarcation. Comme l'arbre est fixe et ne peut pas pivoter latéralement, un gouvernail est installé derrière l'arbre et l'hélice pour orienter le flux d'eau et diriger le bateau.



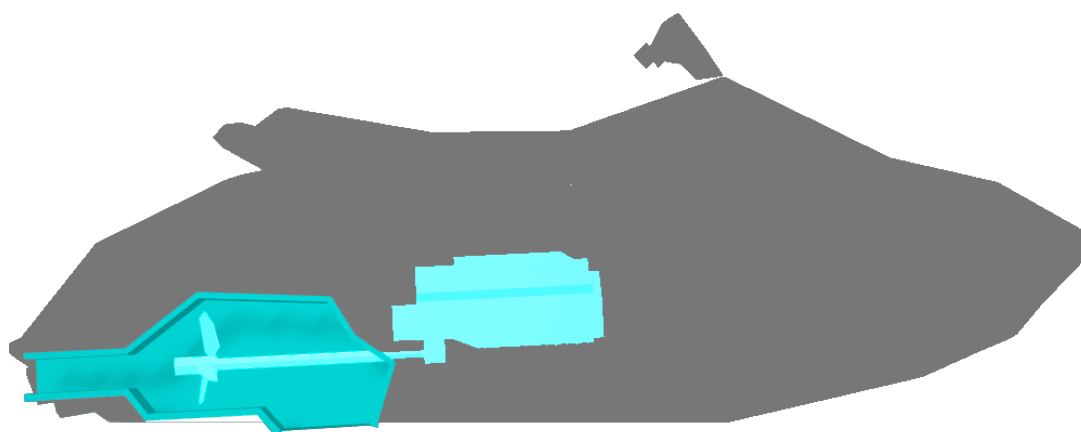
c. Z-Drive

Les embases combinent les caractéristiques d'un moteur in-board et hors-bord, fixées près de la base du tableau arrière. Elles sont généralement plus lourdes que les moteurs hors-bord. Leur partie extérieure ressemble à la partie inférieure d'un moteur hors-bord et peut pivoter latéralement pour diriger le bateau, ainsi que s'incliner vers le haut ou vers le bas pour maintenir une bonne stabilité en navigation.



d. Turbine

Le moteur à turbine, généralement installé à l'intérieur de la structure de l'embarcation, fonctionne en aspirant l'eau à travers une pompe actionnée par une roue. Les motomarines utilisent souvent ce type de moteur. Contrairement aux systèmes à hélice, il ne présente pas de danger pour les personnes dans l'eau ni pour la vie marine. L'eau est ensuite expulsée à haute pression par une buse, propulsant l'embarcation vers l'avant. Cette buse pivote pour orienter le bateau.



II. Les technologies

a. GNR

A l'image du diesel et de l'essence, le GNR (Gasoil Non routier) est un type de carburant. Depuis plusieurs années, il est utilisé pour l'ensemble des engins mobiles non routiers :

- Les tracteurs et machines agricoles ;
- Les bateaux de navigation intérieure ;
- Les engins forestiers, de chantier ou encore de travaux publics.

• Caractéristiques :

- Point éclair : > 55°C
- Point d'auto-inflammation : 250°C
- Densité énergétique : 43 MJ/kg
- Masse volumique : 820 à 845 kg/m³
- Intensité carbone WtW : 95.1 g eq CO₂/MJ

• Production :

Le GNR est un produit issu du raffinage du pétrole. Pour obtenir ce carburant, le pétrole doit être transformé car il ne peut être utilisé dans son état brut. Le gazole non routier est ainsi fabriqué en 5 étapes :

- Après avoir été extrait de son gisement et acheminé jusqu'à la raffinerie, le pétrole est nettoyé des éventuelles impuretés qu'il peut contenir, comme du sable ou de l'eau par exemple.
- Il est ensuite distillé, c'est-à-dire chauffé à différents paliers de température afin d'obtenir trois grandes « coupes », c'est-à-dire trois grands composants. On distingue ainsi dans la colonne de distillation :
 - Les produits légers en haut (l'essence, le butane, le propane et autres gaz) ;
 - Les produits moyens au milieu (le kérozène, le gazole et le fioul domestique) : pour le gazole, le pétrole est porté à ébullition entre 200 et 350°C ;
 - Les produits lourds dans le fond (le bitume, la paraffine, le fioul lourd).
- Une fois obtenu, le gazole, qu'il soit routier ou non routier, est amélioré. Il subit en effet divers traitements afin de répondre aux normes européennes en vigueur. On réduit ainsi son taux de soufre grâce à un traitement à l'hydrogène afin de limiter son impact écologique, on améliore son indice de cétane pour rendre sa combustion plus performante, on contrôle sa densité, etc.
- Le GNR est encore enrichi en biocarburants, et plus spécifiquement en Ester Méthylique d'Acide gras (EMAG), afin de compenser sa faible teneur en soufre. Le gasoil non routier comprend ainsi au maximum 7% d'EMAG, élaborés généralement à partir d'huile végétale de colza. C'est à cause des propriétés détergentes des biocarburants que le stockage du GNR doit se faire dans des conditions précises et pour une durée limitée.

Actuellement, contrairement au GNR destiné aux usages agricoles ou dans le BTP, l'incorporation d'EMAG dans le GNR fluvial n'est pas imposé. Néanmoins, la future réglementation à venir, issue de la transposition de la directive REDIII, va prévoir une obligation d'incorporation d'EMAG dans le GNR à destination du fluvial. Il s'agit du dispositif IRICC qui entrera en vigueur en 2027.

b. GTL

Le GTL (Gas-to-Liquids) est produit à partir de gaz naturel (ou biomasse, charbon) et transformé en carburant liquide par le procédé chimique Fischer-Tropsch, inventé en 1923 en Allemagne et optimisé depuis par la société Shell (principal producteur pour le marché français).

C'est un carburant ayant un pouvoir calorifique plus important que celui du gazole conventionnel qui permet ainsi d'obtenir une combustion plus complète dans le moteur d'où de meilleures performances.

- **Caractéristiques :**

- Point éclair : >61°C : ce qui en fait un carburant facile à manipuler et à stocker
- Point d'auto-inflammation : 210°C
- Densité énergétique : 34 MJ/kg (surconsommation 10% par rapport au GNR)
- Masse volumique : 765 à 800 kg/m³
- Intensité carbone WtW : 94.3 g eq CO₂/MJ

Potentiel de réduction des émissions polluantes par rapport au GNR :

Polluants atmosphériques	
Dioxyde de carbone (CO ₂)	11% (à tempérer avec les analyses du cycle de vie)
Méthane (CH ₄)	100%
Oxydes d'azote (NO _x)	8 à 13%
Oxydes de soufre (SO _x)	100%
Particules fines	20% - 60% selon SHELL

Le GTL est également classé parmi les produits « rapidement biodégradables » par l'OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques) et comme non-nocif pour l'environnement aquatique.

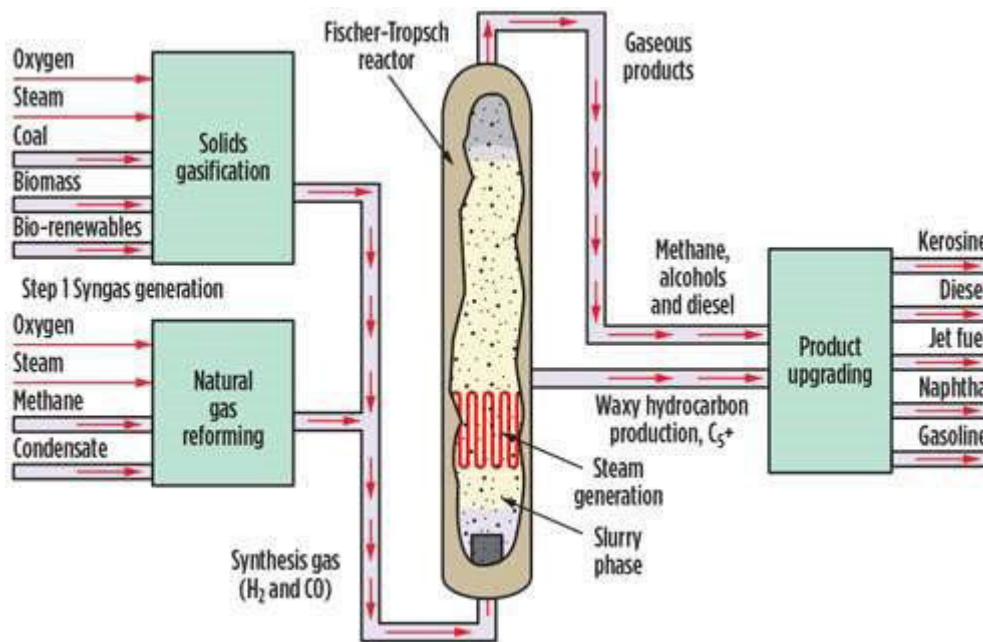
Ces avantages varient en fonction du moteur utilisé. Une étude réalisée en 2013 aux Pays-Bas par le cabinet SGS Environnemental Services, sur deux bateaux de 110 et 130 m équipés de moteurs Caterpillar, a ainsi montré que l'utilisation de GTL a permis de diminuer de 8 à 13 % les émissions d'oxydes d'azote (NO_x), comparé à l'utilisation

de GNR classique. Pour les particules, le différentiel calculé est de -16 à -60 % ; il est moins important pour le CO₂ (jusqu'à -11%).

Les études réalisées par le producteur selon la méthode du cycle de vie (prenant en compte le processus de fabrication du GTL) montrent en effet que les émissions de CO₂ du GTL sont comparables à celles du gazole issu d'un raffinage conventionnel.

- **Production et maturité**

Méthode de production :



Procédé de fabrication du GTL // Source : Gas processing & LNG

Le procédé chimique Fischer-Tropsch consiste à décomposer le méthane (CH₄) en un gaz de synthèse (composé de H₂ et CO) qui est lui-même traité pour obtenir un liquide aux molécules plus grandes et plus régulières. On notera que le procédé consomme 25 à 40% de l'énergie pour sa production.

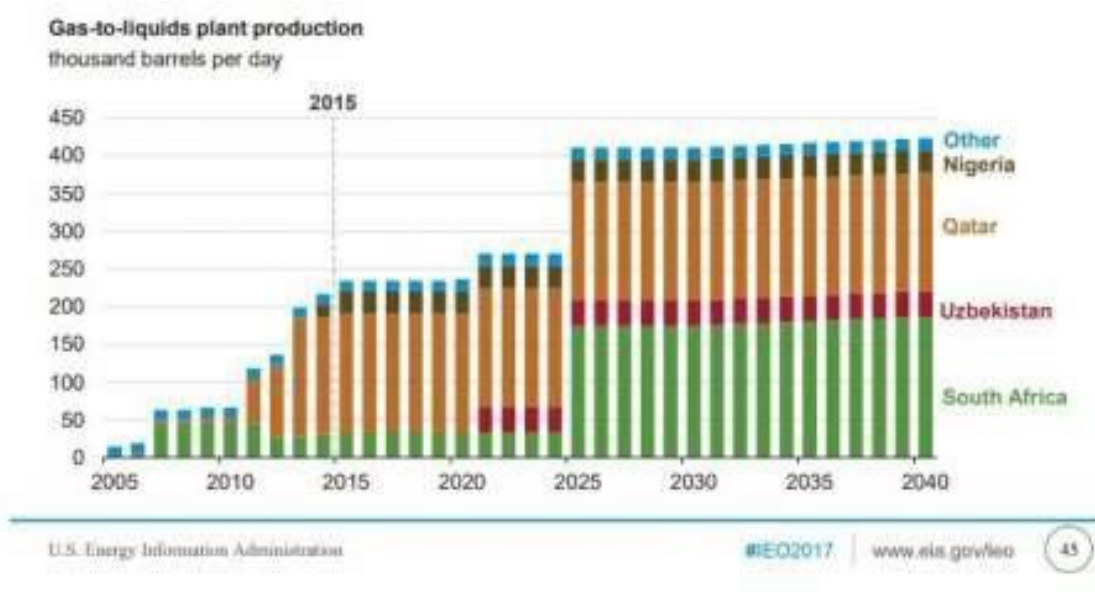
La production de GTL commence par la conversion du gaz naturel en gaz de synthèse par un processus de reformage.

Le mélange d'hydrogène et de dioxyde de carbone qui en résulte peut ensuite être converti en longues molécules d'hydrocarbures par réaction catalytique.

Une dernière étape permet de produire des molécules plus courtes et liquides.

Cette méthode de production inclut en fait une variété de produits finaux, dont le GTL utilisé dans les bateaux.

Volume de production :



Augmentation mondiale de la production de GTL // Source : US Energy Administration

Le volume de production mondial du GTL augmente constamment depuis l'ouverture de la 1ere usine en 1993.

- **Mise en œuvre dans le secteur fluvial**

Stockage à bord :

- Pas de modifications
- Vidange et nettoyage des cuves avant le premier soutage

Moteur :

- Pas de modifications

Exemple d'utilisation :

Une grande partie de la flotte parisienne, principalement des bateaux passagers mais aussi certains bateaux de marchandises



Pousseur "Emerillon" // Source : CEMEX

- **Les normes applicables**
 - Norme EN 15940 : Carburants pour automobiles - Gazoles paraffiniques de synthèse ou obtenus par hydrotraitement - Exigences et méthodes d'essais

- **Avantages / inconvénients**
 - **Avantages :**
 - Les réserves de gaz naturel sont moins limitées que celle de pétrole brut : ressource disponible.
 - La production de GTL par la biomasse, permettra de récupérer le méthane (CH₄) avant qu'il se retrouve dans l'atmosphère. Le méthane est 80% plus accélérateur du réchauffement climatique que le CO₂.
 - Contrairement aux produits pétroliers, ne contient pas le soufre.
 - La production est facilement extensible, permettant de s'affranchir d'un cours du pétrole volatil.
 - Le carburant GTL est compatible avec les moteurs diesel existants et peut être utilisé sans modification majeure.
 - Non toxique et biodégradable
 - Combustion plus uniforme
 - Réduction de l'encrassement moteur
 - Combustion plus uniforme que le GNR
 - Miscible dans le GNR
 - Ne produit ni fumée, ni odeur

 - **Inconvénients :**
 - Consomme 25 à 40% de l'énergie pour sa production.

- + cher que le GNR (environ 5 cts/L de plus)
- 1 seul produit disponible en France (ShellGTL)
- Reste émetteur de CO2 et de particules fines
- Surconsommation de 10% par rapport au GNR
- L'utilisation du GTL ne nécessite pas de modification sur les moteurs, mais nécessite tout de même de vider et nettoyer les cuves avant le 1er soutage.

c. B100 (Biodiesel)

Le B100 (100% Biodiesel) est un carburant composé à 100% d'esters méthyliques d'acides gras (EMAG), et qui a fait l'objet d'une définition et d'une normalisation au niveau européen. Cette énergie s'inscrit dans la Loi de Transition Énergétique, le B100 faisant partie des solutions vertes proposées aux flottes captives.

- **Caractéristiques :**
 - Point éclair : >100°C : ce qui en fait un carburant facile à manipuler et à stocker
 - Point d'auto-inflammation : 260°C
 - Densité énergétique (PCI) : 37.7 MJ/kg (surconsommation 8% par rapport au GNR)
 - Masse volumique : 880 kg/m³
 - Intensité carbone WtW : 37.6gCO₂e/MJ

Potentiel de réduction des émissions polluantes par rapport au GNR :

Polluants atmosphériques	
Dioxyde de carbone (CO ₂)	60% (à tempérer avec les analyses du cycle de vie)
Méthane (CH ₄)	100%
Oxydes d'azote (NO _x)	Augmentation 10 à 20%
Oxydes de soufre (SO _x)	100%
Particules fines	80%

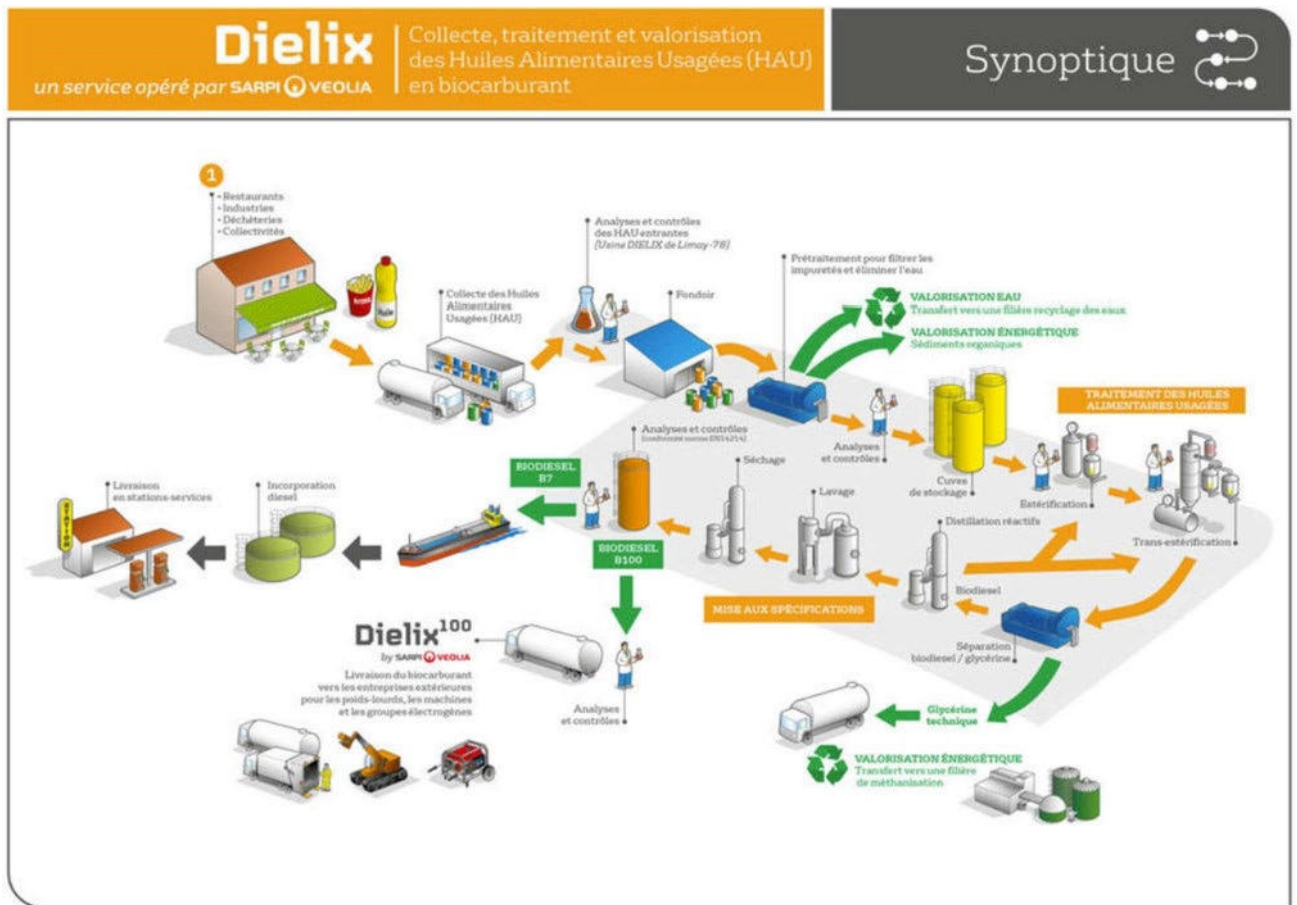
Le B100 est biodégradable, non toxique, non ATEX (point éclair supérieur à 100°C) et non classé ICPE. Beaucoup moins inflammable que le diesel pétrolier, il peut être entreposé à faible pression à la température ambiante et est plus sûr à manipuler et à transporter.

Son bilan carbone global, met en évidence une réduction des émissions de gaz à effet de serre d'au moins 60% par rapport au gazole. La qualité de l'air est également améliorée puisque le B100 permet de réduire jusqu'à 80% les émissions de particules fines.

Avantage supplémentaire, le B100 ne présente aucun risque de pollution puisqu'il est classé non dangereux pour les Hommes et l'environnement.

- Production et maturité

Méthode de production :



Chaîne de production du B100

Le B100 est un produit agricole issu de la culture française de colza. Son traitement dans des usines de transestérification permet de transformer le tourteau, un résidu des graines de colza, en huile puis en ester méthylique après une séparation des molécules à l'aide de méthanol.

- Mise en œuvre dans le secteur fluvial

Stockage à bord :

- Utilisation de cuve double-paroi (risque de corrosion)

Moteur :

- Peu demander une adaptation

Exemple d'utilisation :

CFT a expérimenté l'OLEO 100 (dénomination commerciale du B100 produit par Saipol).

<https://www.actu-transport-logistique.fr/archives/fluvial/transport-fluvial-cft-experimete-uncarburant-alternatif-loleo100-636291.php>



Bateau SANDRE // Source : CFT

- **Les normes applicables**

- Arrêté du 26/06/2024 modifiant l'arrêté du 29/03/2018 relatif aux caractéristiques du carburant dénommé B100 : <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000049834725>
- Arrêté du 30 juin 2010 relatif aux caractéristiques des esters méthyliques d'acides gras (EMAG)
- Norme EN 590 – CSR 4-1-08 pour le GNR (B7)
- Norme NF EN 14-214 : produits pétroliers liquides - Esters méthyliques d'acides gras
- (EMAG) pour moteurs diesel et comme combustible de chauffage - Exigences et méthodes d'essai

- **Avantages / inconvénients**

- **Avantages :**

- Normalisé EU
- Pas d'émissions de soufre
- Peu d'émission de particules
- Emission de Co2 réduites
- Miscible avec le GNR
- Bonnes propriétés de lubrification

- **Inconvénients :**

- Augmentation des émissions de Nox (10-20%)
- Tous les moteurs ne sont pas compatibles
- Contient 10% d'énergie en moins que le GNR
- Surconsommation de l'ordre de 8%
- Peut présenter un risque de développement bactérien

- Peut entraîner une oxydation des cuves dans le cas des stockages long : obligation de passer par une cuve double paroi ?
- Risque de colmatage (le B100 décolle les dépôts dans les réservoirs)
- Plan de maintenance raccourci nécessaire (intervalle de maintenance réduit)
- Pose la question de l'affectation des sols

d. HVO

Le HVO (Huile Végétale Hydrotraitée) est un carburant paraffinique de synthèse. Il est certifié internationalement en matière de durabilité et carbone (ISCC).

Son procédé de fabrication éliminant tout l'oxygène du carburant HVO, il est possible de le stocker sans contamination pendant des périodes très longues.

- **Caractéristiques :**
 - Point éclair : >60°C :
 - Point d'auto-inflammation : 204°C
 - Densité énergétique (PCI) : 44 MJ/kg
 - Masse volumique : 770 - 790 kg/m³
 - Intensité carbone WtW : 34.3 g eCO₂/MJ

Potentiel de réduction des émissions polluantes par rapport au GNR :

Polluants atmosphériques	
Dioxyde de carbone (CO ₂)	90%
Méthane (CH ₄)	100%
Oxydes d'azote (NO _x)	25%
Oxydes de soufre (SO _x)	100%
Particules fines	42%

Les émissions sont considérablement réduites, jusqu'à 90 % des émissions de CO₂ par rapport au Gazole Non Routier (GNR).

Les résultats de tests indépendants ont prouvé qu'il peut réduire les émissions de NO_x jusqu'à 25 % et les particules jusqu'à 42 %.

Comparatif entre les carburants alternatifs

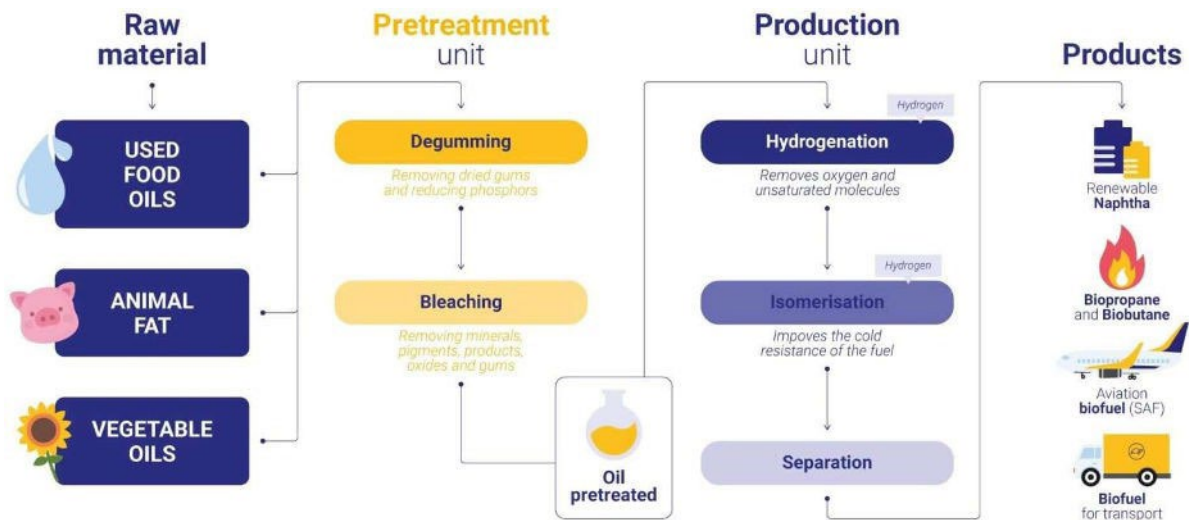
	B 100	HVO
MATIÈRES PREMIÈRES	100% Huile de colza	Graisses et huiles végétales / Déchets végétaux, graisses et huiles résiduelles
PROCÉDÉ DE RAFFINAGE	Transestérification	Hydrotraitement / Hydrogénation d'acides gras
MISCIBLE AVEC LE DIESEL GNR	Non	Oui
RÉDUCTION DES ÉMISSIONS CO2* (%)	Jusqu'à 60 %	Jusqu'à 90 %
RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE PARTICULES* (%)	Jusqu'à 80 %	Jusqu'à 30 %
NUISANCES OLFACTIVES	Aucune	Aucune
ASPECT	Jaune translucide	Translucide
LOCALISATION DU SITE DE PRODUCTION	France	France
DURÉE DE STOCKAGE	Limitée	Sans limite
CERTIFICATION	Certification biomasse & biocarburants, Schéma volontaire pour la durabilité (2BSvs)	Certification internationale en matière de durabilité et de carbone (ISCC)



Comparatif B100 / HVO

- **Production et maturité**

Méthode de production :



Chaîne de production HVO // Source : Onturtle.eu

Le HVO est produit par hydrogénation, c'est-à-dire par traitement à l'hydrogène. Il est produit à partir de composants 100% renouvelables comme des huiles, des déchets et des matières premières végétales (colza, palmier, soja...).

Volume de production :

Cependant, l'adoption du HVO dans le secteur fluvial reste limitée, non pas tant en raison de sa disponibilité ou d'un problème d'approvisionnement, mais principalement à cause de son coût plus élevé par rapport au GNR. En France, le HVO est produit par Total sur deux sites (La Mède, près de Marseille, et Grandpuits) et, à partir de 2025, il devrait l'être avec de l'hydrogène vert, ce qui réduira encore davantage son empreinte carbone. Jusqu'en 2024, son usage était restreint aux flottes captives, ce qui constituait un frein majeur pour les armateurs souhaitant y recourir. La réglementation ayant évolué, cette contrainte n'existe plus. Néanmoins, la fiscalité actuelle demeure défavorable au fluvial, car le secteur n'entre pas dans le mécanisme de la TIRUERT. Cette situation devrait évoluer en 2027, avec l'entrée en vigueur de l'IRICC (qui remplacera la TIRUERT), réduisant ainsi l'écart de coût entre le GNR et le HVO et rendant cette alternative plus compétitive.

- **Mise en œuvre dans le secteur fluvial :**

Stockage à bord :

- Pas de modifications

Moteur :

- Utilisable sur moteur existant : le HVO a toutes les caractéristiques d'un GNR
- Homologué constructeur pour tous des moteurs Stage V

Exemple d'utilisation :

VNF – Bateau Le Rhône

<https://www.vnf.fr/vnf/test-hvo-la-vedette-vnf-laboratoire-dinnovations-pour-la-transitionenergetique/>



Bateau le Rhône // Source : VNF

- **Les normes applicables**
 - Norme EN 15940 : Carburants pour automobiles - Gazoles paraffiniques de synthèse ou obtenus par hydrotraitement - Exigences et méthodes d'essais
 - Arrêté du 28 février 2017 relatif aux caractéristiques du gazole paraffinique de synthèse et du gazole obtenu par hydrotraitement dénommés gazole XTL

- **Avantages / inconvénients**
 - **Avantages :**
 - Réduction significative des émissions de CO₂ par rapport aux carburants fossiles.
 - Compatible avec les moteurs diesel existants sans modification. Le HVO a toutes les caractéristiques d'un GNR.
 - Tous les motoristes l'ont homologué à partir d'EURO 6 – Stage V
 - Mélangeable avec le GNR
 - Biodégradable, réduit les risques de pollution en cas de déversement.
 - Pas d'émission de soufre (gazole chimiquement pur)

- **Inconvénients :**
 - Aujourd’hui, le HVO coûte environ 80 cts/L de plus que le GNR, car le fluvial n’entre pas encore dans le mécanisme de la TIRUERT. À partir de 2027, avec la mise en place de l’IRICC (qui remplacera la TIRUERT), l’écart devrait se réduire et se situer plutôt autour de +20 à +25 cts/L, sous réserve des variations de marché. Cette estimation a été réalisée par GREENEA dans le cadre de l’étude sur la fiscalité des biocarburants commandée par VNF et la DGITM.
 - Disponibilité limitée des matières premières.
 - Coûts de production élevé et volume de production faible
 - Contrairement au biodiesel de première génération (1G), le HVO est aujourd’hui majoritairement produit à partir de déchets (huiles usagées, graisses résiduelles, etc.), ce qui limite la concurrence avec les cultures alimentaires et les terres agricoles. Toutefois, la croissance de la demande soulève des interrogations sur la disponibilité et la traçabilité de ces déchets, ainsi que sur l’impact carbone lié à leur importation (par exemple, huiles de friture en provenance de Chine).

e. Le méthanol

Le méthanol est un produit chimique organique et l’alcool aliphatique le plus simple, dont la formule est CH₃OH. Il s’agit d’un liquide léger, volatil, incolore et inflammable, dont l’odeur alcoolique caractéristique est similaire à celle de l’éthanol. En raison de sa très faible viscosité par rapport au diesel, des efforts particuliers sont nécessaires pour assurer une bonne combustion et éviter les fuites au niveau des joints d’étanchéité.

Son faible point d’éclair et son haut point d’auto-inflammation impose de nombreuses considérations pratiques à prendre en compte lors de l’utilisation du méthanol.

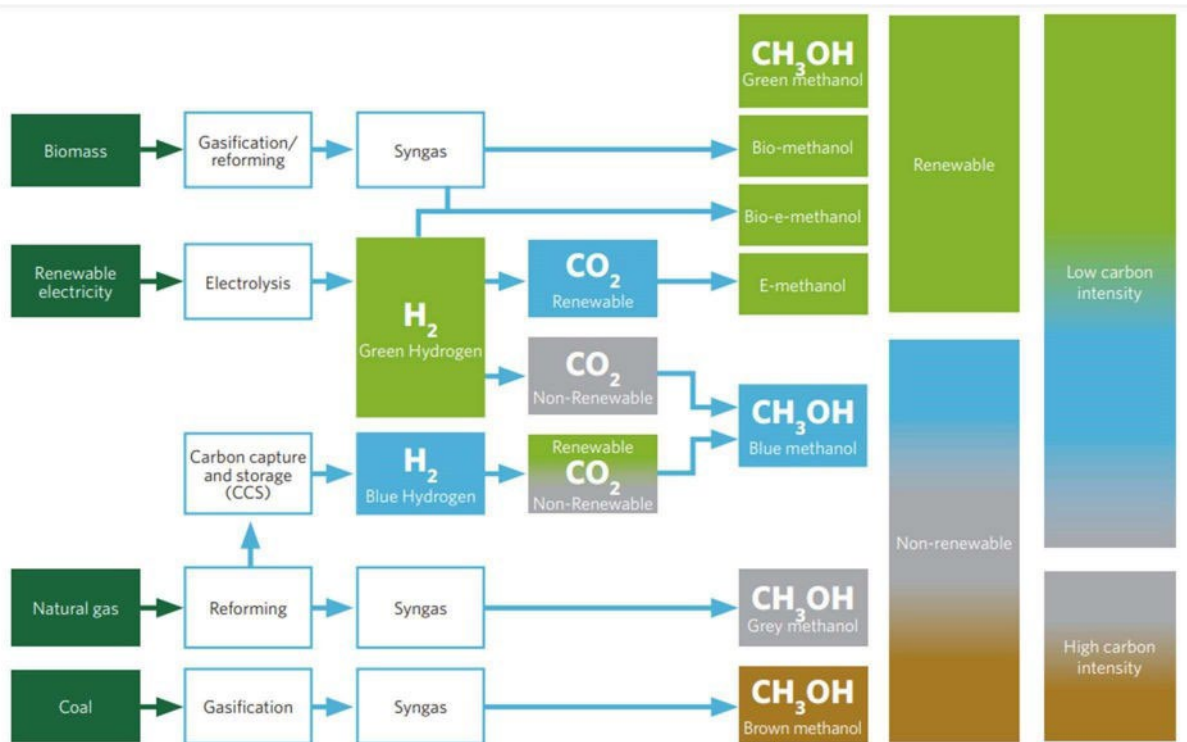
- **Caractéristiques :**
 - Point éclair : 12°C :
 - Point d’auto-inflammation : 455°C
 - Densité énergétique (PCI) : 19.9 MJ/kg (1/2 du GNR)
 - Masse volumique : 793 kg/m³
 - Intensité carbone WtW :
 - Méthanol gris : 110 g eCO₂/MJ
 - Méthanol vert : 10-40g eCO₂/MJ
 - Méthanol bleu : 22.5g eCO₂/MJ
 - E-methanol : 0.9g eCO₂/MJ

Potentiel de réduction des émissions polluantes par rapport au GNR :

Polluants atmosphériques	
Dioxyde de carbone (CO ₂)	
Méthanol gris	0%
Méthanol bleu	42 à 60%
Méthanol vert	85 à 91%
E-Méthanol	58 à 94%
Méthane (CH ₄)	
100%	
Oxydes d'azote (NO _x)	
60 à 80%	
Oxydes de soufre (SO _x)	
99%	
Particules fines	
95%	

- **Production**

Production :

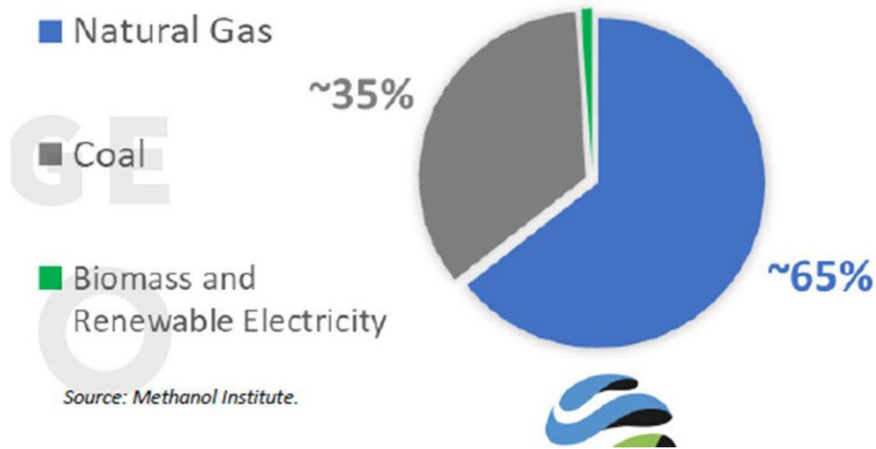


Différentes méthodes de production du méthanol // Source : IRENA et Methanol Institute 2021

Il existe 4 types de méthanol, en fonction de sa méthode de production :

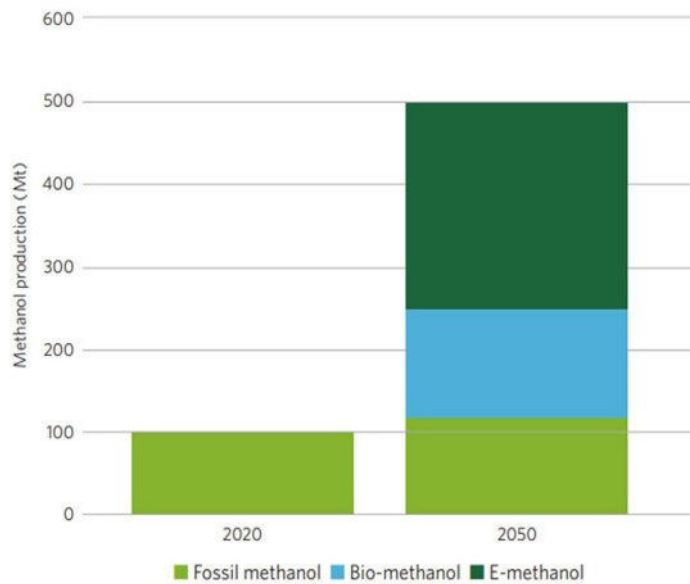
- Le méthanol gris est nommé ainsi car il est dérivé du gaz naturel ou du charbon ;
- Le méthanol bleu est aussi issu du gaz naturel ;
- Le bio-méthanol ou méthanol vert est produit à partir de la biomasse ainsi qu'à partir du captage et au stockage du carbone ;
- Le e-méthanol est produit à partir de l'électricité renouvelable et du dioxyde de carbone qui a été capté.

Global Methanol Production by Feedstock



Répartition de la production de méthanol // Source : Methanol Institute

Volume de production :



Prévision des volumes de production de méthanol // Source : IRENA 2021

Du fait de ces nouveaux usages, en particulier pour la mobilité, IRENA (Source : IRENA – Renewable Methanol – 2021) anticipe que la production de méthanol va passer de 100 millions de tonnes/an actuellement à une production de 500 millions de tonnes/an en 2050. Cette augmentation sera aussi accompagnée par le développement de la production de méthanol renouvelable. En 2050, la production de e-méthanol passerait à 250 millions de tonnes/an et celle de bio-méthanol à 135 millions de tonnes/an.

- Mise en œuvre dans le secteur fluvial

Stockage à bord :

- Des tuyaux à double paroi sont nécessaires car il s'agit d'un combustible à faible point d'éclair
- Les réservoirs doivent être environ 2,4 fois plus grands pour un contenu énergétique équivalent à celui des combustibles fossiles (en raison d'une densité énergétique plus faible)
- La faible viscosité du méthanol par rapport aux carburants traditionnels signifie que les systèmes de stockage et d'approvisionnement en carburant doivent être bien étanches et entretenus pour éviter les fuites

Motorisation :

- Les moteurs à combustion au méthanol sont déjà disponibles dans le commerce (y compris en tant que modèle à double carburant) : ABC, Caterpillar, Hyundai, MAN, Wärtsila
- Les conversions ICE sont possibles, les adaptations comprennent la modification du système d'injection de carburant
- Un système de purge est nécessaire (Azote ou autre gaz inerte) pour permettre un entretien en toute sécurité
- Le méthanol peut également être utilisé dans des piles à combustible.
 - Utilisation dans des piles à combustible à oxyde solide (rendement <60%)
 - Les piles à combustible à méthanol direct sont en cours de développement, mais leur rendement électrique est faible (30 à 40 %).

Méthanol dans moteur à combustion interne (ICE) :

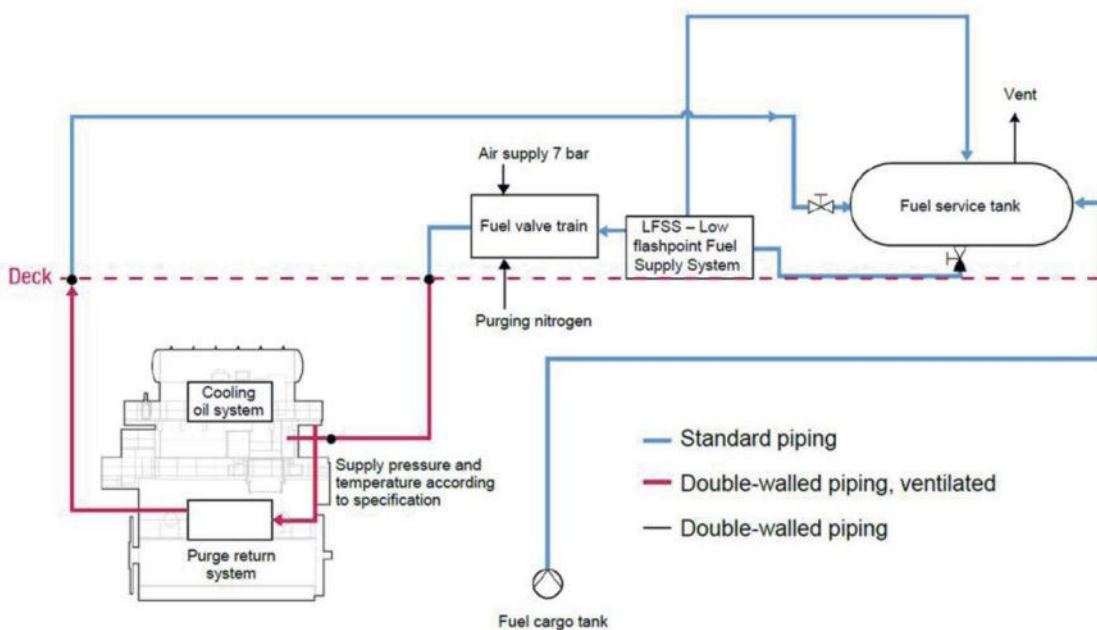


Figure 5-1: Schematic overview of the methanol fuel system^{20/}

Circuit combustible méthanol // Source : <https://www.sustainable-ships.org/>

Les ICE qui fonctionnent au méthanol sont basés sur des moteurs diesel. Ils fonctionnent avec un mélange de méthanol et un additif de lubrification.

Les moteurs à méthanol sont équipés de systèmes de distribution de carburant à double paroi, à l'instar des bateaux GNL. Les vapeurs de méthanol sont plus lourdes que l'air et se déplacent donc vers le bas, d'où la nécessité de placer des détecteurs de gaz et des systèmes de ventilation à des niveaux inférieurs. En outre, l'ensemble du système, y compris le moteur lui-même, est conçu pour être purgé à l'azote, ce qui permet aux opérateurs de travailler sur le moteur en toute sécurité.

On remarquera que la caisse journalière est sur le pont et que le circuit peut être purgé à l'azote.

Méthanol dans pile à combustible (PAC) :

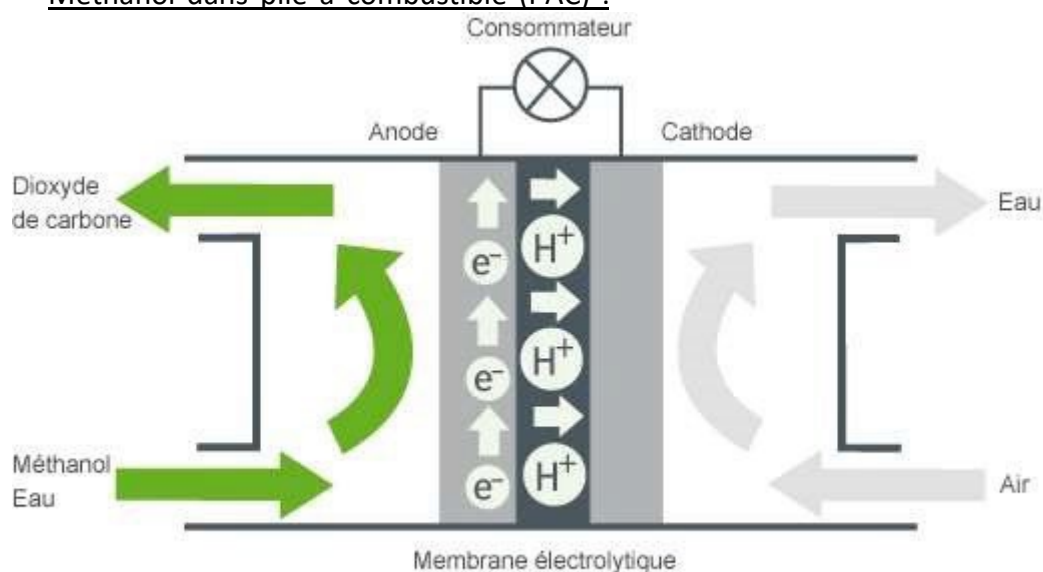


Schéma d'une pile à combustible au méthanol direct

Pile à combustible Méthanol

PAC méthanol / DMFC (Direct Méthanol Fuel Cells) : Rendement de l'ordre de 30 à 40%.

La pièce centrale des piles à combustible qui produit du courant est le Stack (signifiant en anglais « empilement »).

Le stack consiste en cellules individuelles dont chacune est composée d'une anode, d'une cathode et d'une membrane qui sert d'électrolyte pour séparer l'une de l'autre l'anode et la cathode. A travers cette membrane peut se diffuser les protons, particules électriques à charge positive. Du côté de l'anode de l'eau et du méthanol sont acheminés, du côté de la cathode de l'oxygène de l'air ambiant. Dans la réaction sur l'anode des ions H^+ et des électrons libres se produisent, ainsi que le produit de réaction, le dioxyde de carbone (CO_2). Les protons peuvent traverser la membrane, les électrons doivent migrer par un circuit raccordé vers la cathode, produisant de la sorte du courant. Sur la cathode, les ions H^+ réagissent avec l'oxygène pour produire de la vapeur d'eau.

Exemple d'utilisation :



Tanker Fluvial Stolt IJssel - Propulsion méthanol-électrique

Pour aller plus loin :

Un outil permet de calculer le coût moyen d'une conversion au méthanol :

<https://www.sustainable-ships.org/decarbonizer>

- **Les normes applicables**

- ES- TRIN 2023/1 : Chapitre 30 « dispositions particulières pour les bâtiments munis de systèmes de propulsion ou de systèmes auxiliaires utilisant des combustibles dont le point d'éclair est inférieur ou égal à 55°C » ; mais pas de spécificité particulière pour l'usage du méthanol.
- NR670 de Bureau Veritas : methanol and ethanol fuelled ships
- NR540 de Bureau Veritas dans le cas d'une utilisation dans des PAC

- **Avantages / inconvénients**

- **Risques :**
 - Explosion (points d'éclairs plus faibles que pour le diesel) ;
 - Incendie (liquide et vapeur inflammables, flamme très peu visible) ;
 - Toxique en cas de contact, d'ingestion ou d'inhalation, étude analyse de risque en cours pilotée par la DGITM
- **Avantages :**
 - Réduction des émissions de CO₂ si produit de manière durable.
 - Coût de construction de nouveaux bateaux ou de la conversion inférieur aux autres conversions de carburant de remplacement (hydrogène, électricité, ammoniac)
 - L'un des 5 principaux produits chimiques expédié chaque année dans le monde : disponibilité du méthanol grâce à l'infrastructure existante.
 - Des bateaux en circulation depuis 2016.
- **Inconvénients :**
 - Coût de production élevé.

- Nécessite un carburant pilote pour amorcer la combustion
- Densité énergétique plus faible que le GNR, il faut donc 2.4* plus d'espace pour stocker la même quantité d'énergie
- Les stockages de méthanol doivent également être maintenus sous atmosphère inerte pour éviter le risque de réactions chimiques dangereuses (inertage à l'azote)
- Nécessite une évaluation des risques

f. GNL / Biométhane

GNL :

Le gaz naturel liquéfié (et son sigle GNL) désigne le gaz naturel d'origine fossile transformé sous forme liquide. La liquéfaction signifie rendre à l'état liquide. Cet état est atteint lorsque le gaz est refroidi à une température d'environ -160°C à pression atmosphérique. C'est un liquide dit « cryogénique ».

Il est constitué de méthane (CH₄), sous forme pratiquement. Il ne faut pas le confondre avec le GPL (Gaz de Pétrole liquéfié), qui est un produit du pétrole.

C'est un liquide inodore, sans couleur, non corrosif et non toxique.

Après traitement, la liquéfaction permet de condenser le gaz naturel en réduisant son volume d'un facteur de près de 600, pour un même pouvoir calorifique.

Biométhane (ou bio-GNC) :

Le biométhane est un gaz 100% renouvelable produit à partir de déchets issus de l'industrie agroalimentaire, de la restauration collective, de déchets agricoles et ménagers, ou encore de boues de stations d'épuration. Ce biogaz épuré a les mêmes propriétés que le gaz naturel, et donc les mêmes usages.

• Caractéristiques :

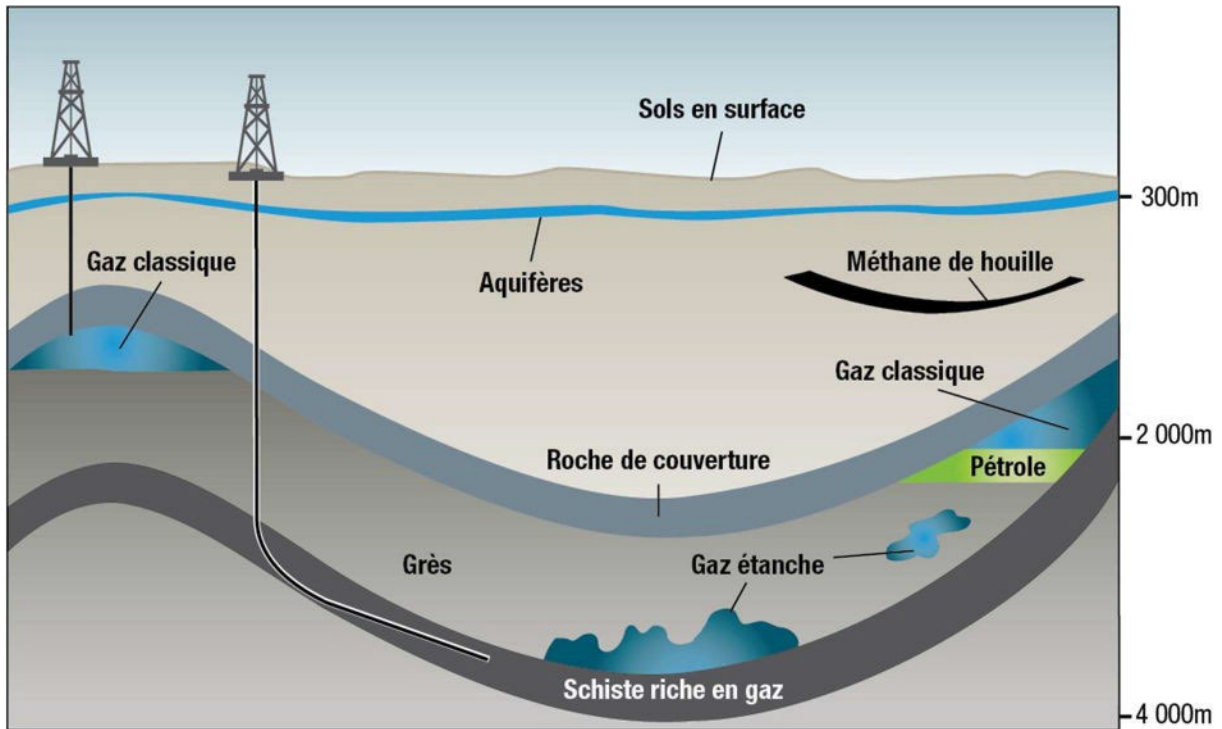
- Point éclair : -188°C (à l'état gazeux) :
- Point d'auto-inflammation : 537°C
- Densité énergétique (PCI) : 22.4MJ/kg
- Masse volumique : 445 kg/m³
- Intensité carbone WtW : 84.5g eCO₂/MJ

Potentiel de réduction des émissions polluantes par rapport au GNR :

Polluants atmosphériques	
Dioxyde de carbone (CO ₂)	15%
Méthane (CH ₄)	Présence de méthane à l'échappement
Oxydes d'azote (NO _x)	60 à 80%
Oxydes de soufre (SO _x)	100%
Particules fines	100%

- Production

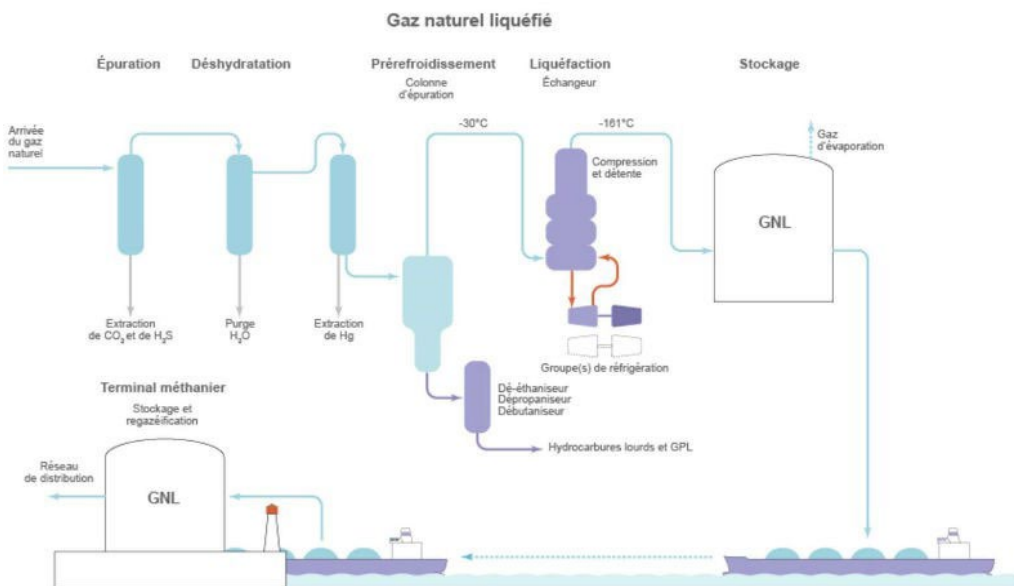
GNL :



Extraction du gaz naturel // Source : GRDF

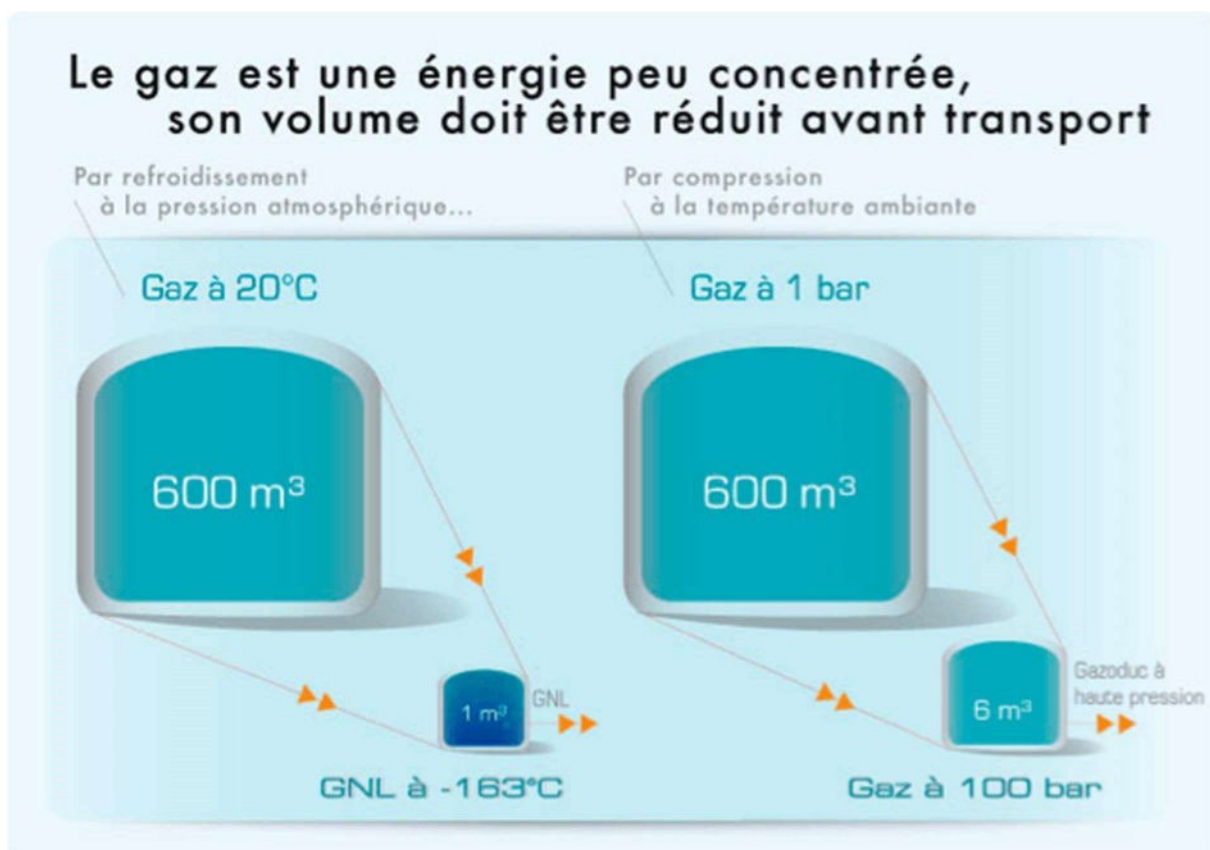
Le gaz naturel est d'abord acheminé par gazoduc, du gisement où il a été extrait jusqu'à une usine de liquéfaction disposant d'installations portuaires.

Dans l'unité de liquéfaction, le gaz naturel subit plusieurs traitements successifs :



Production du GNL

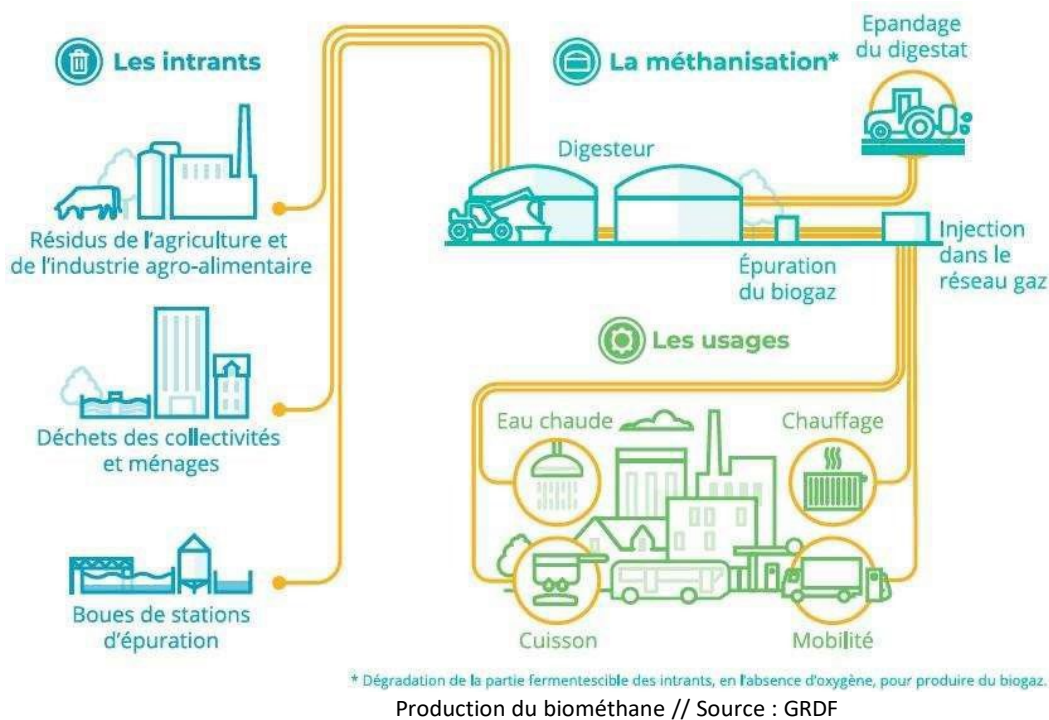
- **Épuration** : elle consiste à extraire le dioxyde de carbone (CO_2) du gaz naturel car il peut endommager les unités de liquéfaction en s'y solidifiant, ainsi que le sulfure d'hydrogène (H_2S) et d'autres composés soufrés ;
- **Déshydratation** : on élimine l'eau (H_2O) du gaz pour éviter la formation d'hydrates de méthane qui peuvent bloquer les échangeurs cryogéniques. Une fois « sec », le gaz naturel est quasiment du méthane pur. On le débarrasse également de toute trace de mercure (Hg), élément toxique qui peut corroder les alliages utilisés dans la suite du processus ;
- **Pré-refroidissement** : le gaz naturel est refroidi à une température proche de -30°C . Une série de distillations (dans les colonnes d'épuration) permet d'isoler les hydrocarbures plus lourds ainsi que les GPL (gaz de pétrole liquéfié : propane et butane). Ceux-ci peuvent être vendus comme matière première dans la pétrochimie ou comme carburant ;
- **Liquéfaction** : le gaz est comprimé, refroidi à pression constante puis détendu. Cette opération est renouvelée à deux ou trois reprises dans des colonnes frigorifiques dont le gaz sort à près de -160°C , entièrement liquide à pression atmosphérique.



Diminution du volume de GNL // Source : GRDF

Le processus de liquéfaction consomme une importante quantité d'énergie : l'usine de liquéfaction utilise en moyenne près de 10% du gaz qui lui est livré pour son propre fonctionnement, en particulier pour alimenter ses pompes à chaleur.

Biométhane :



Le biométhane est produit par méthanisation :

- Les déchets organiques sont triés, brassés et introduits dans un méthaniseur. Ils sont ensuite mélangés et chauffés. En fermentant, les bactéries les transforment en biogaz.
- Une fois odorisé et contrôlé le biogaz prend le nom de biométhane.

Il faut noter qu'à l'échelle mondiale, 99% du LNG produit, l'est à partir de gaz naturel.

• Mise en œuvre dans le secteur fluvial :

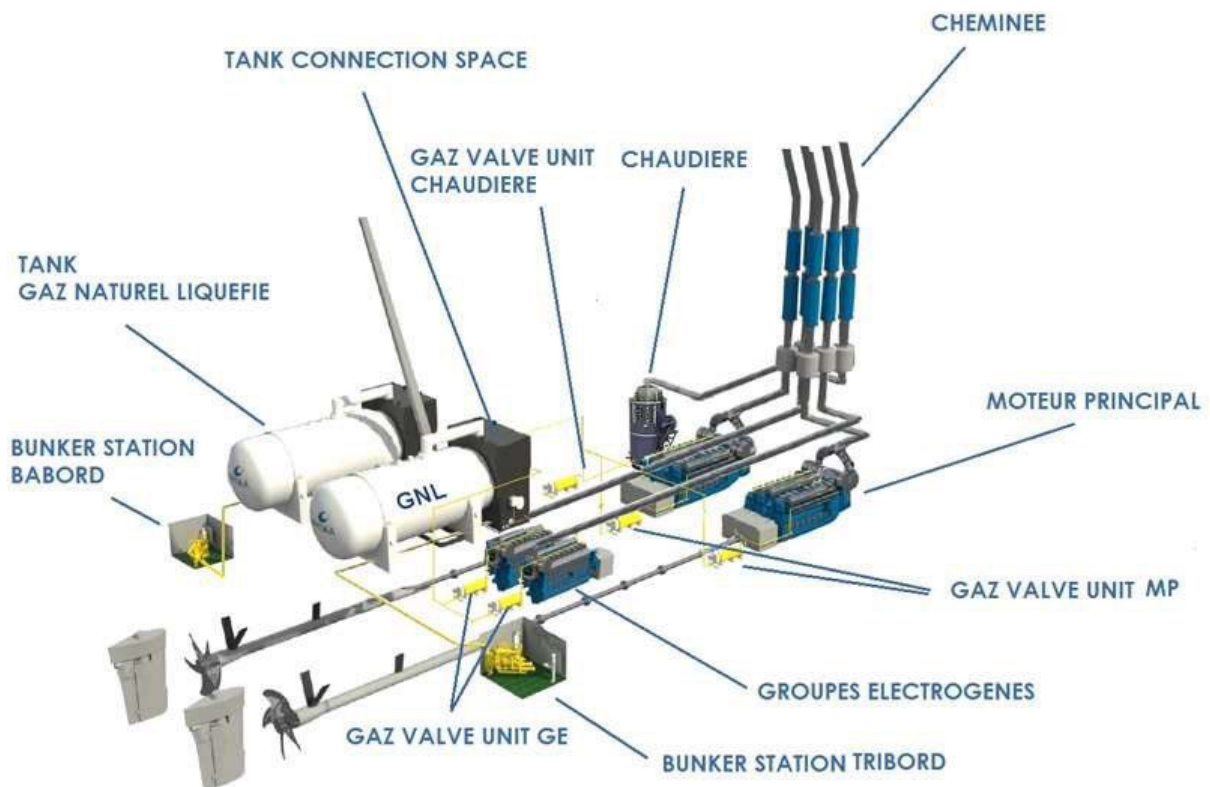
Stockage à bord :

- Des tuyaux à double paroi sont nécessaires car il s'agit d'un combustible à faible point d'éclair
- Le GNL est stocké dans des réservoirs cryogéniques isolés afin de réduire au minimum le phénomène de Boil Off Gas (BOG).
- Dans le réservoir, le GNL s'évapore à raison de 0,15 à 0,4 % de sa masse par jour. On appelle cette évaporation partielle, le « boil-off ». Ce gaz doit être utilisé ou évacué, afin de maintenir la pression de service du réservoir.
- Des cuves plus grandes (2,3x) sont nécessaires pour un contenu énergétique équivalent au GNR (en raison d'une densité énergétique volumétrique plus faible).

Motorisation :

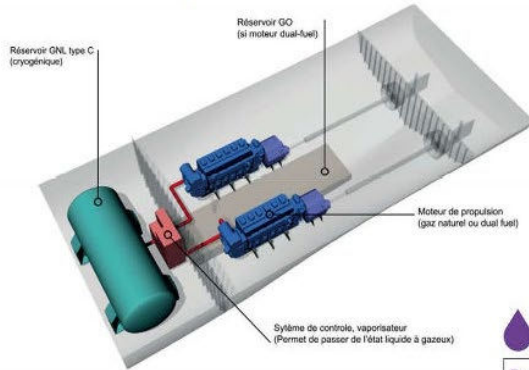
- Les moteurs à combustion GNL sont déjà disponibles dans le commerce, y compris les modèles à double carburant (DUAL-FUEL).
- Un système de purge est nécessaire (Azote ou autre gaz inerte) pour permettre un entretien en toute sécurité.
- Les moteurs à combustion interne à 2 temps à basse et haute pression et les moteurs à combustion interne à 4 temps à basse pression sont largement disponibles.
- Les piles à combustible basées sur le GNL en sont à un stade de développement plus précoce, mais elles pourraient offrir un rendement plus élevé que les moteurs à combustion si elles étaient commercialisées.

Installations de propulsion :

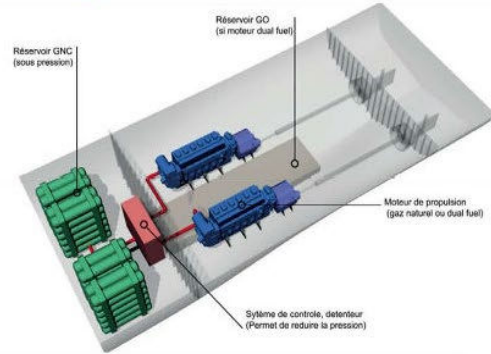


Source : Corsica Linea

Installation type au GNL



Installation type au GNC



Représentations graphiques, Lebéfaude Solutions Navales – DR.

Source : BATELIA/VNF/ Lebéfaude Solutions Navales

Stockage :

Onboard LNG Storage Technologies

IMO Classification:	Type A	Type B	Type C	Membrane
Pressure	Atmospheric	Atmospheric	Pressurised	Atmospheric
Secondary Barrier	Full	Partial	None	Full
Typical Capacity	>5,000m ³	>5,000m ³	Up to 1,000m ³	>5,000m ³
Cost	High	High	Medium	High
Space Efficiency	Medium	Medium	Low	High

Types de cuves LNG // Source : ALTERNATIVE FUELS AND ENERGY CARRIERS FOR SHIPPING - IMO

Pour la propulsion des bateaux fluviaux, la réglementation applicable préconise un stockage du GNL dans des réservoirs indépendants cryogéniques de « type C » à -162°C/1 bar jusqu'à environ -130 °C /10 bars maximum sous l'effet du « boil off ».

Concernant le bio-GNC, il est prélevé sur le réseau de gaz de ville, puis comprimé à température ambiante. On peut atteindre des rapports de réduction de volume 1/100-ème à 1/250-ème. A bord, cela se traduit par un assemblage de bombones où le gaz est à une pression de 100bar. Il devra être détendu pour être ensuite injecté dans le moteur.

- **Les normes applicables**

- ES- TRIN 2023/1 : Chapitre 30 « dispositions particulières pour les bâtiments munis de systèmes de propulsion ou de systèmes auxiliaires utilisant des combustibles dont le point d'éclair est inférieur ou égal à 55°C » // annexe 8, section 1 « Gaz naturel liquéfié (GNL) ».

Les cahiers techniques LOG-te Fluvial : les différentes solutions technologiques pour la propulsion | 29

- Norme ISO 20519 : 2021
Navires et technologie maritime — Spécification pour le soutage des navires fonctionnant au gaz naturel liquéfié
- Norme ISO 22548:2021
Navires et technologie maritime — Procédures d'essais de performance des systèmes d'alimentation en gaz combustible GNL (FGSS) pour navires
- Norme ISO 21593:2019
Navires et technologie maritime — Exigences techniques relatives au couplage de connexion et de déconnexion à sec pour le soutage de gaz naturel liquéfié
- Norme ISO 6919 :2024
Mesurage des combustibles gazeux liquéfiés réfrigérés à base d'hydrocarbures ou à base non pétrolière — Mesurage dynamique du gaz naturel liquéfié (GNL) en tant que combustible marin — Soutage de camion à navire
- NR529 Gas Fuelled Ships (Bureau Veritas)

- **Avantages / inconvénients**

- **Risques :**
 - Asphyxiant
 - Brûlure / fragilisation cryogénique
 - Explosion (très explosif) / Inflammable (vapeurs)
 - Formation d'un nuage froid et bouillonnement en cas de déversement de grande ampleur
 - Transition de phase rapide (RPT)
- **Avantages :**
 - Réduction des GES de 15% pour le GNL et jusqu'à 80% pour le biogaz.
 - Quasiment pas d'émission de soufre et de particules fines, -80% de Nox.
 - Il existe des motorisations dual fuel, permettant l'injection de GNR ou de GNL.
 - Pour le biométhane, production en France.
- **Inconvénients :**
 - L'utilisation de ce genre d'architecture de propulsion nécessite une formation de l'équipage.
 - Densité énergétique plus faible que le GNR, ce qui nécessite d'avoir plus de place pour transporter la même quantité d'énergie
 - Les projets de refonte et de construction neuve doivent faire l'objet d'une analyse de sécurité de l'installation.
 - Disponibilité des ressources pour sa production (particulièrement pour le Biogaz, bien que la filière soit en pleine expansion en France).

- Coût des motorisation supérieur (environ +30% ou +10% moteur uniquement).
- Présence de méthane à l'échappement, environ 3% n'est pas brûlé (le méthane a un impact 80x supérieur au CO2) – Source « Transports et Environnement ».

g. Électricité

Les bateaux électriques n'émettent pas de gaz à effet de serre, particules fines ou NOx à l'échappement, puisqu'il n'y a pas de combustion.

Cependant, l'impact environnemental global des bateaux entièrement électriques dépend des éléments suivants :

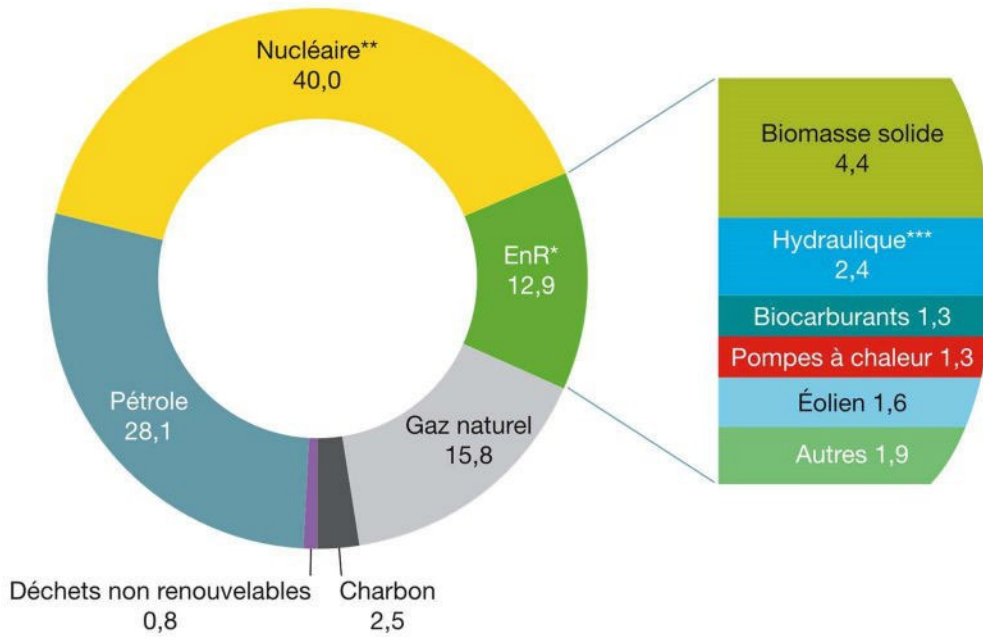
- De l'intensité en carbone de l'électricité utilisée pour charger les batteries (cela dépendra de la combinaison de production d'électricité pour l'alimentation électrique du lieu de chargement).
 - Des émissions liées au cycle de vie de la fabrication des batteries (cependant, comme les batteries peuvent être rechargées, elles représentent la totalité de l'énergie de propulsion fournie pendant la durée de vie du bateau).
 - Recyclage ou recyclage des batteries à la fin de leur durée de vie utile
- **Caractéristiques :**
 - Point éclair : /
 - Point d'auto-inflammation : /
 - Densité énergétique (PCI) : 0.36 à 0.95MJ/kg (pour des batteries Lithium-ion)
 - Masse volumique : /
 - Intensité carbone WtW :
 - 32.4g eCO2/MJ sur la base du mix énergétique français (Source : LARRIEU Pierre-Yves, Marine Fuels strategic Dashboard, Europe, PCEM, La Rochelle, 2024)
 - 4g eCO2/MJ si l'électricité utilisée est issue du renouvelable

Potentiel de réduction des émissions polluantes par rapport au GNR :

Polluants atmosphériques	
Dioxyde de carbone (CO2)	100%
Méthane (CH4)	100%
Oxydes d'azote (NOx)	100%
Oxydes de soufre (SOx)	100%
Particules fines	100%

- **Production**

En % (données non corrigées des variations climatiques)



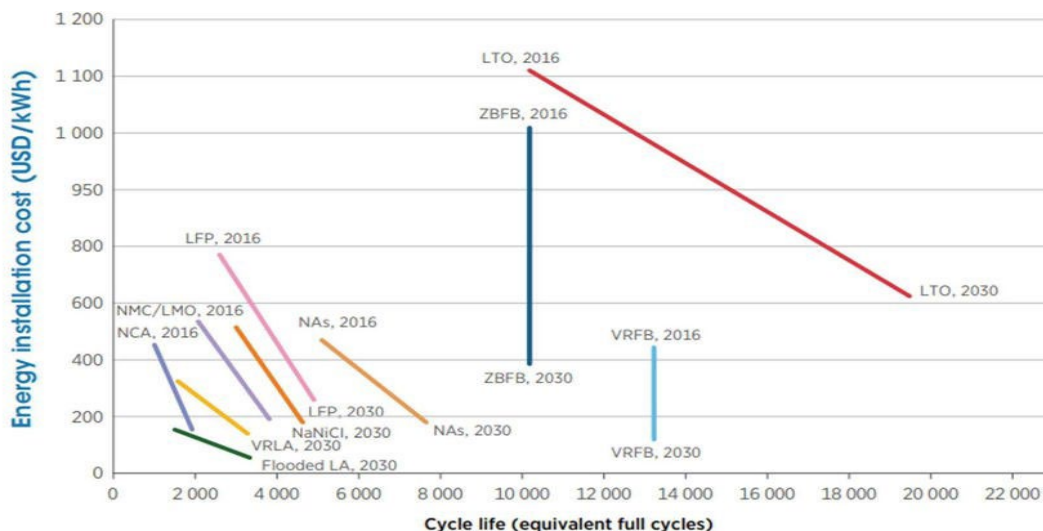
Mix énergétique FRANCE // Source : Ministère de la transition écologique

La France est un des pays européens avec le mix électrique le plus décarboné (59,9 gCO₂/kWh en 2020). Ainsi, l'électricité française est un carburant alternatif propre est un atout sur la voie de l'atteinte de l'objectif de décarbonation des transports d'ici à 2050.

- **Mise en œuvre dans le secteur fluvial**

Stockage à bord :

Il existe une multitude de technologies de batteries.



Perspective sur les technologies de batteries // Source : IRENA (2019), Navigating to a renewable future: Solutions for decarbonising

Le graphique ci-dessous donne un aperçu de la manière dont les technologies des batteries devraient s'améliorer à l'avenir, en termes de coût d'investissement et de nombre de cycles.

Exemple d'utilisation :

L'AFBE (Association Française pour le bateau électrique) recense l'ensemble des bateaux électriques en France :

<https://www.bateau-electrique.com/catalogue/type/bateaux-electriques-hybrides-transportpassagers/>

- **Les normes applicables**

100% électrique :

- ESTRIN 2025/1 : Chapitre 11 – Dispositions particulières pour les installations de propulsion électriques
- NR467 du Bureau Veritas : Rules for the classification of Steel ship / Part F: Additional Class notifications
- NR 320 du Bureau Veritas : Certification Scheme of Materials and Equipment for the Classification of Marine Units
- Norme NF EN 62619 Accumulateurs alcalins et autres accumulateurs à électrolyte non acide - Exigences de sécurité pour les accumulateurs au lithium pour utilisation dans des applications industrielles
- NF EN 62620 Accumulateurs alcalins et autres accumulateurs à électrolyte non acide - Eléments et batteries d'accumulateurs au lithium pour utilisation dans les applications industrielles
- NFEN IEC 62281 Sécurité des piles et des accumulateurs au lithium pendant le transport
- UL1642 Standard for Lithium Batteries
- IACS : DNV GL Maritime Battery Safety Joint Development Project-Report

Hybridation :

- Application de la réglementation et recommandations présentées sur les applications thermiques et 100% électriques

- **Avantages / inconvénients**

- **Avantages :**
 - Pas d'émissions polluantes en exploitation
 - Efficacité énergétique élevée
 - Maintenance minimale
 - Pollution acoustique nulle
 - Forte puissance et couple disponibles en permanence
- **Inconvénients :**

- Capacité de stockage d'énergie limitée par la technologie actuelle des batteries qui est en constante évolution Infrastructure de recharge encore en développement
- Coût initial élevé pour l'installation de systèmes de propulsion électrique
- Le poids des batteries (stabilité des bateaux équipés)
- Leur encombrement physique
- Coût d'installation des bornes électriques et leur raccordement au réseau

h. Hydrogène

L'hydrogène est produit à ce jour quasiment exclusivement (plus de 95 %) par la transformation de ressources fossiles et principalement par vaporeformage du gaz naturel. Ce procédé a deux inconvénients, il émet de grandes quantités de CO₂ et son rendement est peu convaincant.

Reste cependant la difficulté de stockage et de transport de l'hydrogène. En effet, sa densité énergétique (kg/m³) est beaucoup plus faible que celle du gazole. C'est la raison pour laquelle, à ce jour, près de 99% de l'hydrogène produit est consommé sur le site de production.

Comme nous l'avons vu précédemment, l'hydrogène est utilisé pour la fabrication du méthanol ainsi que de l'ammoniac.

L'hydrogène est identifié comme l'énergie du futur, notamment pour sa capacité à réduire les émissions de gaz à effet de serre.

L'hydrogène peut être utilisé à bord sous 2 formes :

- LH₂ : hydrogène sous forme liquide
- GH₂ : hydrogène sous forme comprimée

- **Caractéristiques :**

- Point éclair : / :
- Point d'auto-inflammation : 500 à 571°C
- Densité énergétique (PCI) :
 - 120 MJ/kg - Forme liquide
 - 120MJ/kg – Forme gazeuse
- Masse volumique :
 - 31.43 kg/m³ (pour GH₂)
 - 70kg/m³ (pour LH₂)
- Intensité carbone WtW :
 - Hydrogène bleu : 18.1 g eCO₂/MJ (LH₂) 15.1 (GH₂)
 - Hydrogène vert : 1.5g eCO₂/MJ
 - Hydrogène gris : 133g eCO₂/MJ

Potentiel de réduction des émissions polluantes par rapport au GNR :

Polluants atmosphériques	
Dioxyde de carbone (CO ₂)	
Hydrogène gris	Augmentation 70%
Hydrogène bleu	22%
Hydrogène vert	87%
Méthane (CH ₄)	100%
Oxydes d'azote (NO _x)	100% (PAC) – 97% (Moteur ICE)
Oxydes de soufre (SO _x)	100% (PAC)
Particules fines	100% (PAC)

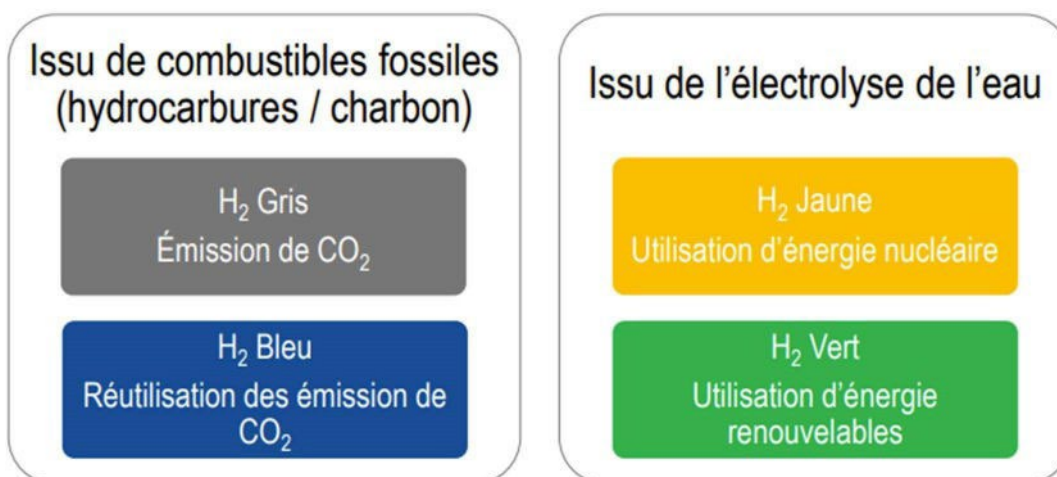
Les réductions de gaz à effet de serre de l'hydrogène décarboné sont estimées entre 22 % et 87 % de réduction par rapport au véhicule équivalent diesel, sur l'ensemble du cycle de vie.

Cependant, l'efficacité énergétique de la solution hydrogène est encore trop faible (un électrolyseur a un rendement de l'ordre de 65% et la pile à combustible a également un rendement de 50%). A cause de sa faible efficacité énergétique, la solution hydrogène issue d'électrolyse nécessite plus d'électricité que la solution batterie pour une même quantité d'électricité restituée à l'utilisation.

Cela impacte notamment le coût d'utilisation et le bilan carbone si l'électricité employée pour générer l'hydrogène n'est pas décarbonée.

- **Production**

Les différents types d'hydrogène :



Les différentes couleurs de l'hydrogène // Source : CEDRE 2022

Il existe 4 types d'hydrogène :

- **Hydrogène gris** : produit à partir de gaz naturel, dans une usine de vaporeformage. Ce procédé repose alors sur trois étapes successives, notamment la production de "gaz de synthèse" ($HH_2 + CCO$) à partir de méthane (CCH_4), puis la réaction à l'eau du mélange (transformation de CCO et HH_2OO en HH_2 et $CCOO_2$) et enfin la purification de l'hydrogène (séparation de l'hydrogène du reste des composés). Dans ce cas, une certaine quantité de carbone sera émise dans l'atmosphère, correspondant aux atomes de carbone de la molécule de méthane. Ce procédé requiert une certaine quantité d'énergie, la réaction de séparation ne se produisant que dans certaines conditions de pression et de température ($900^\circ C$ à 25 bars). On compte approximativement un rendement brut de 65% à 80% pour la production d'hydrogène à partir de méthane (rapport entre l'énergie contenue dans le gaz de synthèse et l'énergie dépensée pour la synthèse, ainsi que l'énergie brute du méthane).

Les installations de vaporeformage du méthane totalisent une écrasante majorité des capacités de production d'hydrogène (près de 95% de la production totale). La majeure partie de cette production est actuellement utilisée dans les procédés de raffinage du pétrole. Dans ce cas, la production de gaz est centralisée dans des unités de production de grande capacité.

- **Hydrogène bleu** : c'est le même principe que l'Hydrogène gris, mais en utilisant des systèmes de captation carbone

- **Hydrogène vert** : c'est l'hydrogène produit par électrolyse de l'eau. L'énergie utilisée est d'origine renouvelable.

La production de gaz se fait alors dans un électrolyseur qui dissocie les molécules d'eau (HH_2OO) en hydrogène (HH_2) et en oxygène (OO_2). La réaction de fonctionnement repose sur des principes électrochimiques où l'eau est dissociée en ions HH^+ et en électrons ee^- à l'anode, pour ensuite être re-combinée à la cathode en dihydrogène (HH_2). Cette réaction n'est rendue possible qu'avec l'injection d'un courant électrique aux dipôles de l'électrolyseur. Cette réaction fonctionne avec un rendement global de 70% à 80% (rapport entre l'énergie brute du dihydrogène produit et l'électricité dépensée pour la production).

La synthèse d'hydrogène à partir d'eau n'implique pas a priori de rejet de gaz à effet de serre. Aujourd'hui, les capacités de production d'hydrogène par électrolyse restent minoritaires.

Néanmoins, dans le contexte des politiques de développement des infrastructures hydrogène, les capacités d'électrolyse devraient passer de 13 MW en 2022 à 5 GW en 2030 et 8 GW en 2035 (Source : ministère de l'Économie – Avril 2025).

- **Hydrogène jaune** : même principe que l'hydrogène vert, mais en utilisant une énergie d'origine nucléaire.

- **Mise en œuvre dans le secteur fluvial**

Stockage :

- La compression et la liquéfaction sont coûteuses et consomment beaucoup d'énergie.
- La liquéfaction à -253 °C (hydrogène sous forme LH2) est problématique en raison du phénomène de BOIL OFF : des réservoirs fortement isolés et sous vide ou à double paroi sont nécessaires. L'hydrogène est présenté dans des réservoirs de type C (comme le GNL).



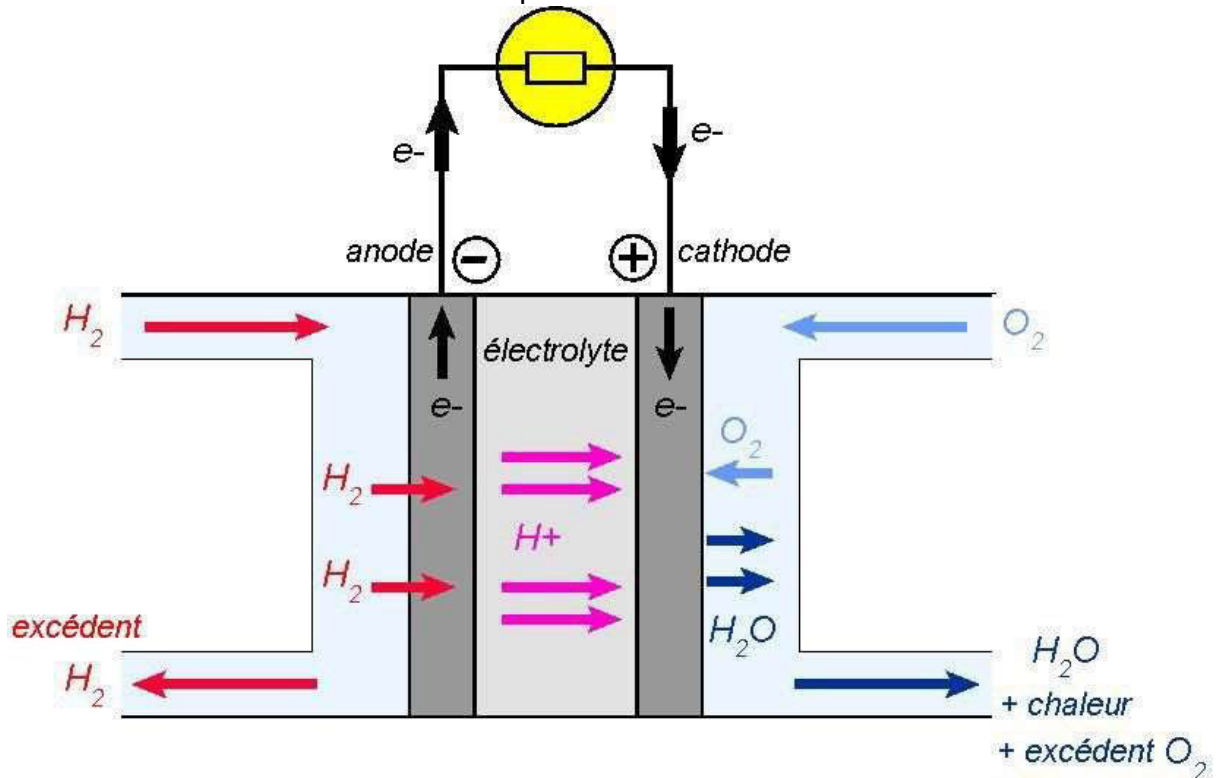
Stockage H2 type C

- La compression à froid/cryogénique à 350 ou 700 bar (hydrogène sous forme GH2) est une méthode hybride (40-80K et 300 bar) sans perte par ébullition. L'hydrogène est présenté dans des racks de bonbonne.
- Des réservoirs 4 à 13 fois plus grands sont nécessaires pour un contenu énergétique équivalent au GNR.
- Les réservoirs de GH2 et de LH2 ont des formes cylindriques fixes et ne peuvent donc pas s'implanter dans tous les types de compartiments

Propulsion :

- L'hydrogène peut être brûlé dans un moteur à combustion interne spécialisé (ICE) mais ces moteurs nécessitent d'adjoindre un carburant pilote pour la combustion.

- L'hydrogène peut être utilisé pour produire de l'électricité dans des piles à combustible (PEMFC ou SOFC), qui peuvent ensuite alimenter des moteurs électriques.



PAC Hydrogène // Source ; OCEAN SKILLS

Les piles à combustible ont un rendement plus élevé que les moteurs à combustion interne et ne produisent pas de gaz à effet de serre ni de polluants atmosphériques.

Exemple d'utilisation :

Les technologies de moteur ICE n'étant pas matures, la plupart des projets fluviaux utilisent une architecture de propulsion utilisant des PAC.



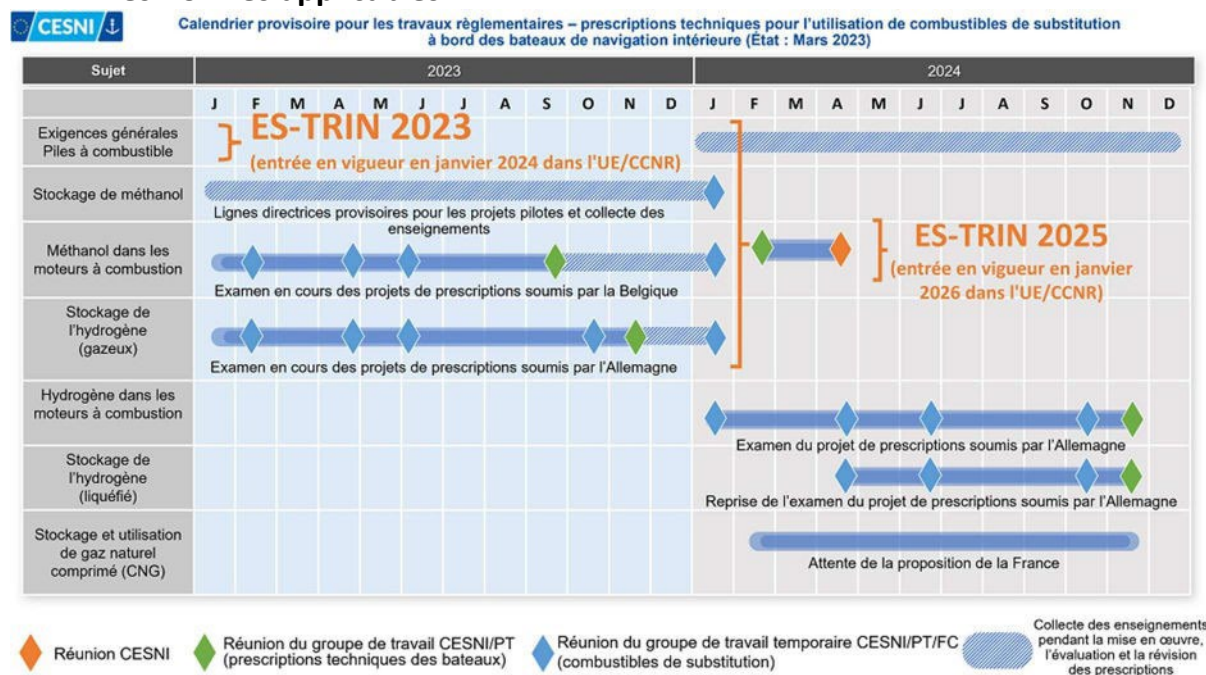
Propulsion hydrogène - Zulu6 // Source : H2-mobile

Les cahiers techniques LOG-te Fluvial : les différentes solutions technologiques pour la propulsion | 38

Long de 55 m et large de 8 m, le Zulu 6 a reçu à l'origine une motorisation diesel/électrique qui a été conservée. Il sera par la suite équipé en plus de deux piles à combustible de 200 kW, fournies par Ballard Power Systems. Les deux piles à combustible ainsi que la réserve d'hydrogène seront positionnées en pontée

Prenant la forme d'un conteneur citerne de 20 pieds, « le réservoir d'hydrogène contiendra 300 kg d'hydrogène comprimé à 300 bars », précise le directeur technique. La consultation du fournisseur d'hydrogène est en cours.

• Les normes applicables



Axes de travail du CESNI // Source : CESNI.eu

- ES- TRIN 2023/1 : Chapitre 30 « dispositions particulières pour les bâtiments munis de systèmes de propulsion ou de systèmes auxiliaires utilisant des combustibles dont le point d'éclair est inférieur ou égal à 55°C » // annexe 8, section 3 « Hydrogène ».
- NR 547 : Ships using Fuel Cells
- NR678 : Hydrogen-Fuelled Ships

• Avantages / inconvénients

- **Risques :**
 - Explosion (très explosif) / Incendie (gaz inflammable, flamme très peu visible)
 - Fuites d'H2 (faible viscosité et de sa faible masse moléculaire - Taux de fuite de l'hydrogène liquide 50 fois supérieur à l'eau)
 - Incompatibilité avec certains matériaux
 - Stockage cryogénique : Brûlure et fragilisation des matériaux

- **Avantages :**
 - Zéro émission de CO₂.
 - Abondance potentielle de l'hydrogène, si produit à partir de sources renouvelables.

- **Inconvénients :**
 - Infrastructure de ravitaillement limitée.
 - Stockage difficile (faible densité énergétique volumétrique pour l'hydrogène comprimé).
 - Coût de production encore élevé.
 - Une ébullition constante doit être gérée (BOIL OFF)

Pour approfondir le sujet de la propulsion à hydrogène : [Étude Promovan H2](#) conduite par Voies Navigables de France (VNF), LMG Marin, Compagnie Fluviale de Transports (CFT) et Entreprises Fluviales de France (E2F).

III. Hybridations

a. Hybridation série

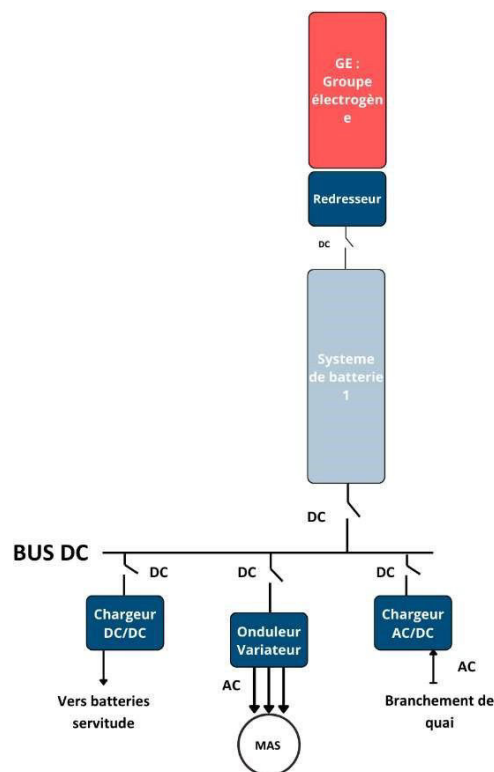
- **Principe**

Dans une propulsion hybride série, le moteur thermique n'est pas relié mécaniquement à l'arbre d'hélice. Il sert uniquement à entraîner un générateur électrique qui alimente un moteur électrique. Ce moteur électrique assure à lui seul la propulsion du bateau. L'énergie peut aussi être stockée dans des batteries intermédiaires pour lisser la production ou permettre une navigation 100 % électrique sur de courtes distances.

Chaîne énergétique :

Moteur thermique → Générateur électrique → Moteur électrique → Hélice

- **Schéma**



- **Avantages et inconvénients**

- **Avantages :**

- Simplification de la ligne d'arbre (pas de boîte de vitesses ni d'embrayage mécanique)
- Possibilité de fonctionnement silencieux en mode tout électrique
- Rendement optimisé du moteur thermique (fonctionnant à régime constant)
- Meilleure intégration des énergies renouvelables (panneaux solaires, hydro générateurs)

- **Inconvénients :**
 - Double conversion d'énergie : pertes supplémentaires (thermique → élec → mécanique)
 - Masse et coût accrus (groupe électrogène + batteries + électronique de puissance)
 - Complexité du système de gestion énergétique

- **Cas d'usage**

Petits bateaux de transport à usage portuaire ou fluvial (zones à faibles émissions)
 Yachts de plaisance recherchant le silence en navigation lente
 Bateaux militaires ou scientifiques souhaitant un mode silencieux temporaire
 Ferries assurant des traversées courtes et régulières (avec recharge à quai)

b. Hybridation parallèle

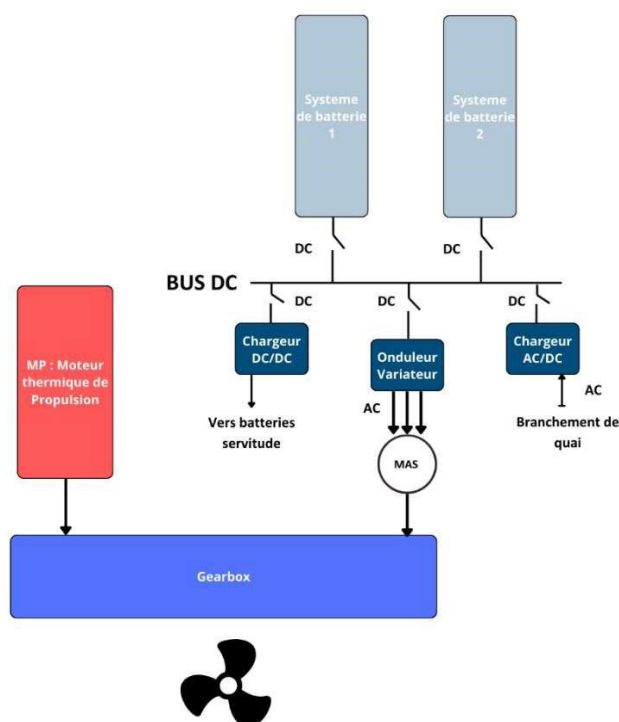
- **Principe**

Dans une propulsion hybride parallèle, le moteur thermique et le moteur électrique sont tous deux couplés à la ligne d'arbre propulsive. Ils peuvent fonctionner séparément ou simultanément. Ce système permet d'utiliser le moteur électrique à basse vitesse ou lors des manœuvres, et le moteur thermique en croisière, avec la possibilité de combiner les deux pour obtenir plus de puissance si nécessaire.

Chaîne énergétique :

(Moteur thermique + Moteur électrique) → Ligne d'arbre → Hélice

- **Schéma**



- **Avantages et inconvénients**

- **Avantages :**

- Polyvalence d'utilisation selon le profil de navigation
- Possibilité d'utiliser le moteur électrique comme générateur (récupération d'énergie)
- Moins de pertes d'énergie que dans l'hybridation série (moins de conversions)
- Réduction de consommation en milieu urbain/portuaire

- **Inconvénients :**

- Complexité mécanique (embrayage, transmission)
- Coordination moteur thermique / moteur électrique plus complexe
- Moins optimisé pour le fonctionnement tout électrique

- **Cas d'usage**

Bateaux de travail, pousseurs qui alternent des phases à charge variable

Ferries ou bateaux à horaires réguliers avec alternance haute/basse puissance

Bateaux de plaisance à long rayon d'action (autonomie thermique + confort électrique)

IV. Moteurs électriques

Définitions nécessaires à la compréhension :

- **Rotor** : partie mobile d'un moteur électrique
- **Stator** : Partie fixe d'un moteur électrique

Thermique vs. électrique, quelques chiffres.

		
Puissance spécifique (kW/kg)	1 à 1,5	2 à 3
Rendement	0 % à 35 %	60 % à 92 %
Nombre de pièces	200 à 250	< 50
Part mécanique/ électronique prix	90/10	40/60

Moteur thermique VS Moteur électrique // Source : Le moteur thermique comparé au moteur électrique - Chimie et transport - 2014

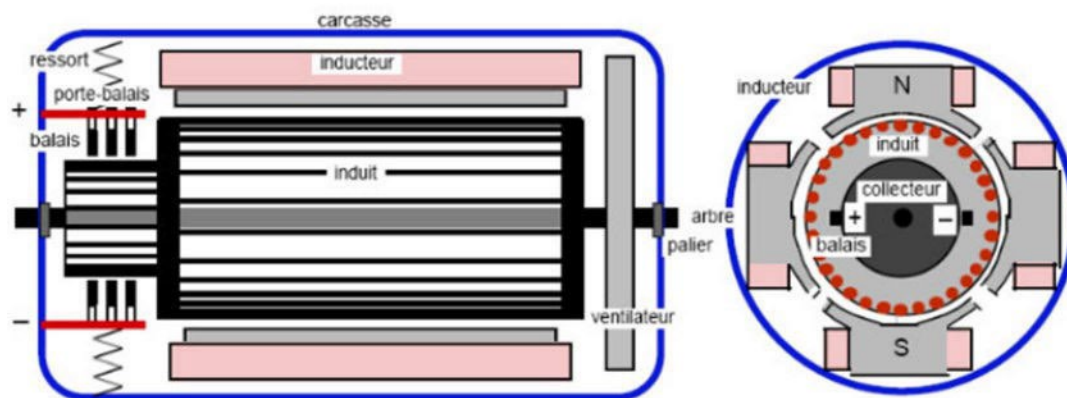
Différents types de machines électriques sont utilisées pour la propulsion navale : les machines à courant continu (MCC), les machines synchrones à rotor bobiné (MSRB), les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) et enfin les machines asynchrones (MAS).

La majorité des machines de propulsion sont des machines à courant alternatif. Les machines asynchrones et les machines synchrones sont ainsi les deux solutions les plus utilisées en propulsion de nos jours.

a. Moteur à courant continu – MCC

Le moteur électrique à courant continu est constitué :

- D'un rotor appelé induit (bobinage parcouru par un courant)
- D'un stator appelé inducteur (aimant permanent)
- D'un ensemble de balais porte-balais pour pouvoir alimenter le rotor en tension lors de la rotation



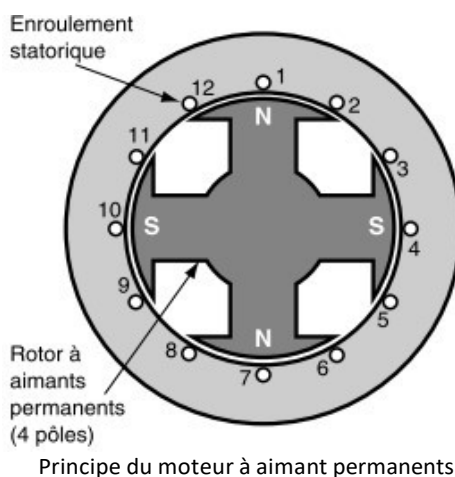
Moteur à courant continu // Source : NZAMBI

Les MCC sont de moins en moins utilisées car elles posent des problèmes en termes de maintenance, encombrement et compatibilité électromagnétique.

b. Moteur synchrone – MSRB – MSAP

MSAP (machines synchrones à aimants permanents) :

Le rotor du moteur est équipé d'aimants permanents en générale en terre rare pour obtenir un champ élevé dans un volume réduit. Le stator comporte les enroulements triphasés. Ces moteurs peuvent accepter des courants de surcharge importants pour réaliser des accélérations très rapides.



Les MSAP présentent l'avantage d'avoir un niveau de maintenance faible (au contraire des machines à rotor bobiné), d'être compactes et, sans pertes Joule au rotor, les MSAP ont un bon rendement. L'utilisation de machines synchrones à aimants permanents permet d'augmenter la puissance massique et améliore également la fiabilité et la robustesse des systèmes. Cela en fait donc une bonne candidate pour être utilisée en propulsion navale.

L'inconvénient majeur des MSAP est le coût important de la machine dû au coût des aimants permanents (et la présence de terres rares par les aimants, les neodymes).

MSBR (machines synchrones à rotor bobiné) :

Les autres machines synchrones sont à rotor bobiné, elles sont réversibles et peuvent fonctionner en générateurs (alternateurs) ou en moteurs. Pendant longtemps ces machines ont surtout été utilisées en alternateurs. Leur usage en moteur était pratiquement confiné aux applications où il était nécessaire d'entraîner des charges à vitesse fixe en dépit des variations relativement importantes de leur couple résistant.



Moteur à rotor bobiné

Une importante partie de la propulsion de grande puissance utilise des MS à rotor bobiné (par exemple pour les bâtiments de la marine française, et les paquebots).

c. Moteurs asynchrones – MAS

Nous avons vu que les moteurs les plus utilisés pour les applications navales sont les MSBR, c'est cependant une solution qui tend à être remplacée par des MAS (machines asynchrones).

Les machines asynchrones sont réversibles, c'est-à-dire qu'elles peuvent se comporter en moteur ou en générateur.

Il existe 2 types de MAS :

- A rotor cage d'écureuil : des barres d'aluminium ou de cuivre réagissent aux champs magnétiques du stator
- A rotor bobiné : le courant est transmis par un système de bagues et balais

Conclusion

La diversité des solutions de propulsion présentées dans ce cahier technique illustre la richesse et la complexité des choix qui s'offrent aujourd'hui aux acteurs du transport fluvial. Chaque technologie dispose de ses atouts et de ses limites : certaines offrent une maturité industrielle et une disponibilité immédiate, tandis que d'autres, plus récentes, promettent des gains environnementaux significatifs mais nécessitent encore des évolutions en matière de coût, d'infrastructure ou de réglementation.

Il n'existe pas de solution universelle. Le choix optimal dépendra de nombreux paramètres : type de bateaux, profil de navigation, contraintes réglementaires locales et internationales, accessibilité aux infrastructures de soutage, stratégie environnementale de l'armateur, ou encore perspectives économiques à long terme. Dans cette équation complexe, les carburants alternatifs (biocarburants, GNL, méthanol, hydrogène) et l'électrification progressive jouent un rôle central pour réduire l'empreinte carbone, tandis que les systèmes hybrides permettent une transition progressive et flexible.

La réussite de cette transition énergétique repose sur plusieurs leviers complémentaires :

- **L'innovation technologique**, pour améliorer le rendement et la fiabilité des systèmes.
- **Le développement des infrastructures**, afin de garantir l'approvisionnement et le déploiement à grande échelle des nouvelles énergies.
- **L'harmonisation réglementaire**, pour encadrer et accompagner les investissements
- **La formation des équipages**, essentielle pour exploiter en toute sécurité des systèmes de plus en plus sophistiqués.

Ce cahier technique ne se limite pas à un état des lieux ; il constitue également un point de départ pour la réflexion stratégique. Les prochaines années verront l'émergence de solutions hybrides et multimodales, où plusieurs sources d'énergie pourront coexister à bord pour répondre aux différentes phases d'exploitation. L'enjeu est double : garantir la performance opérationnelle tout en contribuant activement à la décarbonation du transport.

En définitive, la propulsion de demain sera le fruit d'un équilibre entre innovation, pragmatisme et vision à long terme. Les choix posés aujourd'hui conditionneront non seulement la compétitivité économique des flottes, mais aussi leur capacité à répondre aux défis environnementaux et sociétaux de notre époque.

Ce Cahier Technique vous est proposé par :

entreprises
fluviales
de France



Contactez l'équipe LOG-te Fluvial

Entreprises fluviales de France – E2F

Aurélié MILLOT

Déléguée générale adjointe

aurelie.millot@entreprises-fluviales.fr

Communauté portuaire de Paris – CPP

Jacques BUDIN

Délégué Innovation

jacques.budin@cpp.paris

Marc-Alban GAST

Délégué Transition énergétique

marc-alban.gast@cpp.paris

Page Internet du dispositif : <https://cee-remove.ademe.fr/log-te-fluvial/>