

Options de durabilité pour la navigation intérieure



INTRODUCTION

Ces fiches ont été commandées par Top Sector Logistics, dans le but de fournir aux expéditeurs une vue d'ensemble simple et indépendante des options en matière de durabilité, en guise de première orientation.

L'accent est mis ici sur :

- les principes techniques ;
- des considérations commerciales ;
- les réglementations et les conditions-cadres.

Les fiches d'information ont été rédigées sur la base de publications existantes et d'entretiens avec des experts techniques. Il s'agit d'un instantané de l'état de l'art au début de l'année 2023.

Les fiches décrivent les principales technologies clés pour la navigation intérieure, telles qu'établies par la CCNR (Feuille de route pour la réduction des émissions dans la navigation intérieure, mars 2022) et correspondent donc largement à la classification générale de l'EICB & TNO (Future sustainable inland navigation, avril 2021).

FICHES D'INFORMATION

Fiche 1 : système de post-traitement des gaz

Fiche 2 : carburants de substitution

Fiche 3 : batteries électriques

Fiche d'information 4 : l'hydrogène

Fiche d'information 5 : le méthanol

Fiche 6 : diesel-électrique

Fiche 7 : moteur à combustion alternatif Fiche 8 : pile à combustible

Fiche 9 : biométhane liquéfié (LBM/Bio-LNG) Fiche 10 : vecteurs d'hydrogène NaBH₄ & LOHC



Fiche 1 : Système de post-traitement des gaz d'échappement

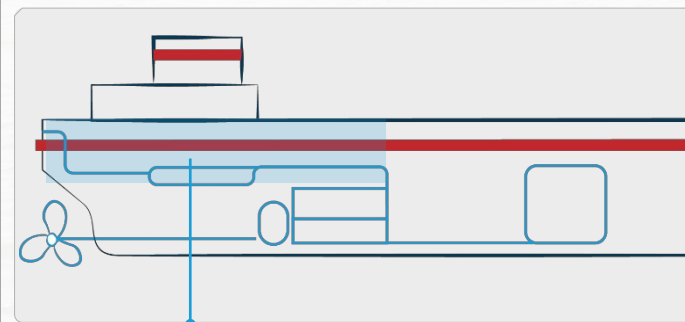
DESCRIPTION

Un système de post-traitement des gaz d'échappement est un système dans lequel les substances nocives sont éliminées des gaz d'échappement. Cette opération s'effectue en plusieurs étapes et avec différents composants, souvent combinés dans un boîtier commun intégré au système d'échappement. Sur les nouveaux moteurs, il s'agit d'un composant obligatoire pour se conformer aux réglementations actuelles en matière d'émissions. Sur les moteurs plus anciens, il peut être installé ultérieurement à installer. La taille du ou des composants dépend des valeurs d'émission visées, du type de moteur et du profil de charge.

CARACTÉRISTIQUES

Technology Readiness Level		▲	
Investerings (CAPEX)	▲		
Operationele kosten (OPEX)	▲		
Beschikbare infrastructuur		▲	
Noodzakelijke veiligheidseisen	▲		
Benodigde opleiding	▲		
<i>Uitlaatgassen nabehandeling</i>	Laag	Midden	Hoog

IMPACT



Post-traitement des gaz d'échappement

TECHNIQUE

Le système de post-traitement des gaz d'échappement se compose des éléments suivants :

- DOC (catalyseur d'oxydation diesel).
- DPF (filtre à particules diesel).
- SCR (réduction catalytique sélective).



Le DOC réduit les émissions de HC et de CO et est souvent le premier composant du système de post-traitement par lequel passent les gaz d'échappement. Le DPF filtre les particules de suie (PM) des gaz d'échappement. Avec le temps (si la contre-pression des gaz d'échappement augmente trop), la suie restante est brûlée et transformée en cendres. Ce processus est appelé "régénération". Un DPF est équipé d'une régénération active ou passive. Le SCR est un convertisseur catalytique qui utilise

l'ajout d'urée réduit les concentrations de NO_x (oxyde d'azote).

Choix

- Nouveau moteur répondant aux exigences actuelles en matière d'émissions (phase V).
- Installation d'un système de post-traitement des gaz d'échappement sur un vieux moteur.

Avantages

- Les moteurs de la phase V et les systèmes de post-traitement sont disponibles dans le commerce (TRL9).
- Moins d'émissions.

Inconvénients

- Installation supplémentaire à bord occupant de l'espace dans la salle des machines.
- Il convient de prendre en considération les carburants et les huiles de lubrification à utiliser. Une teneur en soufre trop élevée peut avoir un effet néfaste sur le fonctionnement et la durée de vie de la SCR et du DPF. Les carburants conformes à la norme EN590 conviennent à presque tous les systèmes de post-traitement. Pour l'utilisation de carburants alternatifs tels que (le mélange de) biodiesel ou le HVO ou pour l'utilisation d'huile lubrifiante à faible teneur en soufre, il faudra encore consulter le fabricant

COMMERCIAL

Investissements

- Installation complète avec DOC, SCR, DPF et périphériques : 120 000 euros pour un moteur de 750 kW.
- Un moteur de la phase V de l'UE +/- 375 € par kW*.
- Installation (consultation d'experts).

Utilisation

- AdBlue : est comprise entre 3,5 % et 5 % par rapport à la consommation annuelle de carburant (+/- 1€/litre).

Considérations

- Délai de récupération : à l'heure actuelle, l'investissement ne peut pas être récupéré d'une manière purement opérationnelle.

* Niveau des prix 2021, CCNR

Incitations locales :

- plusieurs ports et organismes tels que Green Awards ont créé des incitations pour récompenser les navires dont les émissions nocives sont moindres en réduisant les frais portuaires (greenaward.org).
- Port de Rotterdam : 30% de réduction sur les frais de port.
- Port d'Amsterdam 15% de réduction sur les frais de port.
- Ports de la mer du Nord 10% de réduction sur les taxes portuaires.

Exigences futures :

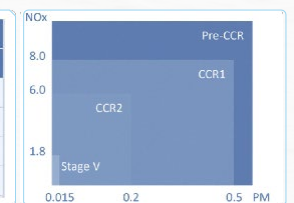
- On s'attend à ce que, dans un avenir (proche), il y ait de plus en plus d'exigences en matière d'émissions, telles que des restrictions d'accès aux ports, comme cela est envisagé à Rotterdam, mais les chargeurs et les clients pourraient également commencer à imposer des exigences, ce qui crée un avantage commercial si les réglementations les plus récentes étaient respectées.
- Lors de l'installation d'un nouveau moteur, il est souvent possible de bénéficier d'une consommation de carburant plus efficace grâce à l'évolution technologique du moteur.

CONDITIONS LIMITES

Règlement

Les émissions de polluants provenant des moteurs diesel, tels que l'oxyde d'azote (NO_x), l'oxyde de soufre (SO_x) et les particules (PM), sont de plus en plus réduites par étapes grâce à des mesures de réduction des émissions. (voir figure). Les moteurs des bateaux de navigation intérieure doivent être conformes aux exigences de la phase V de l'UE en matière d'émissions à partir du 1er janvier 2020 (règlement (UE) 2016/1628). Les valeurs d'émission pour la phase V de l'UE sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

Category	Net Power kW	Date	g/kWh				PN 1/kWh
			CO	HC ^a	NO _x	PM	
IWP/IWA-v/c-1	19 ≤ P < 75	2019	5.00		4.70 ^b	0.30	-
IWP/IWA-v/c-2	75 ≤ P < 130	2019	5.00		5.40 ^b	0.14	-
IWP/IWA-v/c-3	130 ≤ P < 300	2019	3.50	1.00	2.10	0.10	-
IWP/IWA-v/c-4	P ≥ 300	2020	3.50	0.19	1.80	0.015	1 × 10 ¹²



Infrastructure

Outre le choix du carburant et de l'huile de graissage, il convient également de procéder à l'avitaillement de l'urée. L'urée est disponible dans la plupart des stations d'avitaillement le long des voies navigables connues en Europe.

- * Les émissions de gaz d'échappement doivent satisfaire aux exigences minimales en matière d'émissions conformément à la phase V de l'UE pour les moteurs IWP ou IWA.
- ** Les moteurs peuvent devoir être modifiés et/ou marinisés pour être conformes aux lignes directrices de l'ES-TRIN. La marinisation peut modifier le moteur (émissions), invalidant ainsi l'homologation. Plusieurs entreprises actives sur le marché sont spécialisées dans la fabrication de moteurs de camions certifiés UE-Euro-VI adaptés à la navigation intérieure.

L'équipage

Le personnel technique à bord des navires équipés d'un système de post-traitement des gaz d'échappement devrait recevoir une formation spéciale ou des explications de la part du fabricant.

Fiche d'information n° 2 : les carburants de substitution

DESCRIPTION

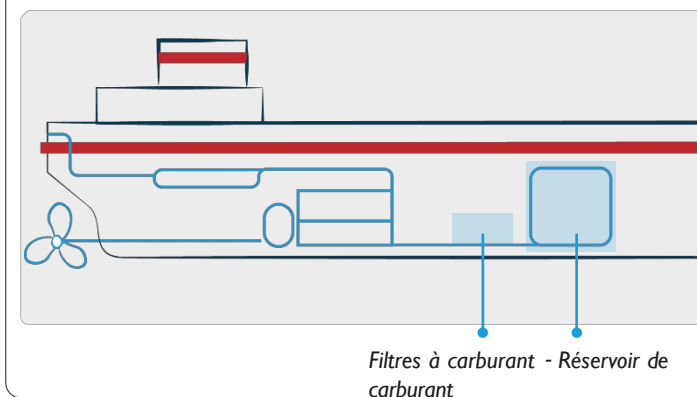
Les carburants de substitution sont des alternatives au diesel (diesel fossile). Ils sont faciles à remplacer sans modification de l'installation existante (moteur). Ils peuvent être entièrement ou partiellement un mélange avec du diesel ordinaire peut être appliqué. Dans de nombreux cas, les émissions de qualité de l'air (NOx/SOx/fines) peuvent être considérablement améliorées par l'utilisation de ce mélange. Les combustibles. Bien que ces combustibles émettent tous des gaz à effet de serre du même ordre de grandeur (CO₂), ils sont toujours considérés comme "neutres sur le plan climatique", en fonction de la matière première dont ils sont constitués (lorsque les sources biologiques ont déjà absorbé le CO₂ de l'environnement). Ils sont également appelés 'carburant renouvelables'.

CARACTÉRISTIQUES

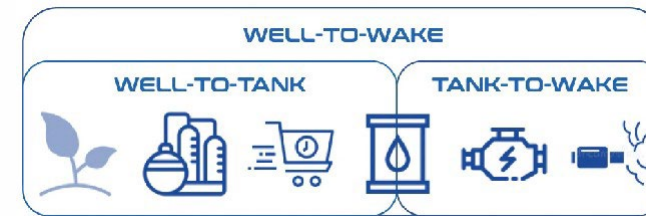
Technologie Readiness Level	Laag	Midden	Hoog
Investering (CAPEX)	▲		▲
Operationele kosten (OPEX)			▲
Beschikbare infrastructuur		▲	▲
Noodzakelijke veiligheidsisen		▲	▲
Benodigde opleiding		▲	▲

Drop-in' brandstoffen

IMPACT



TECHNIQUE



Lors de l'évaluation des différents types de combustibles intégrés en termes d'émissions de CO₂, il est donc important de prendre en compte les approches suivantes :

- Du puits au réservoir.
- Tank to Wake (du réservoir aux émissions).
- Well to Wake (de la source aux émissions).

On peut dire d'une manière générale que les émissions Tank to Wake de la plupart des carburants de substitution sont similaires en termes de gaz à effet de serre (tous émettent du CO₂), mais aussi en termes d'émissions de gaz à effet de serre.

Si les émissions du puits au réservoir sont incluses, ces émissions sont compensées par toute absorption de CO₂ provenant de la source (par opposition au CO₂ organique) et un carburant (presque) « climatiquement neutre » peut être obtenu (en raison du cycle court du carbone).

Choix

Outre la matière première, le processus de raffinage est également important, car il détermine en grande partie la qualité et les propriétés d'émission des carburants. Les produits ci-dessous sont des alternatives courantes pour la navigation intérieure.

Produit	Source primaire	Processus	Mélange avec du diesel fossile	Prix par rapport au diesel fossile	Avantages	Inconvénients	Standard
GTL (du gaz au liquide)	Gaz naturel	Processus Fischer-Tropsch : processus de craquage impliquant une reconstruction moléculaire en un carburant similaire au diesel fossile.	Adjuvant illimité (0-100%).	€ ▲	Réduction NOx jusqu'à 13% (CCNR2). Réduction SOx jusqu'à 100% (CCNR2). Réduction des particules jusqu'à tot 60% (CCNR2).	Pas de réduction des émissions de CO ₂ .	EN15940
HVO (Huile végétale hydrotraitee)	Huiles végétales, huiles résiduelles, graisses animales et graisses telles que les graisses de friture usées.	Hydrogénation : processus de craquage impliquant une reconstruction moléculaire en un carburant similaire au diesel fossile.	Adjuvant illimité (0-100%).	€ € € ▲	Réduction NOx jusqu'à 13%(CCNR2). Réduction des particules jusqu'à 60% (CCNR2). Réduction SOx jusqu'à 100%(CCNR2). Réduction CO2 jusqu'à 90% (Well to Wake).	Pas de réduction des émissions de CO ₂ .	EN15940
NOTORIÉTÉ (Esters méthyliques d'acides gras)	Huiles végétales, huiles résiduelles, graisses animales et graisses telles que les graisses de friture.	Transestérification : réaction au cours de laquelle les esters sont brisés et reformés; utilisable comme biodiesel après-filtration.	Mélange limité ; généralement 7% d'EMAG pour le transport routier (diesel B7).	€ ▲ €	Réduction CO ₂ – jusqu'à 90% (Well to Wake).	Attire l'eau et la saleté, ce qui peut entraîner la formation de bactéries, d'algues et de moisissures. Les substances nocives pour la qualité de l'air ne sont pratiquement pas réduites	EN14214

COMMERCIAL

Investissements

- Modifications éventuelles du système d'alimentation en carburant (en cas d'utilisation d'EMAG).

Utilisation

- Les coûts des carburants alternatifs sont plus élevés que ceux du gazole ordinaire. Avec le temps, ces différences devraient disparaître, voire désavantager le gazole ordinaire, en raison de la prise en compte des coûts d'émission.
- intervalles de nettoyage et de remplacement plus longs pour les séparateurs d'eau et les filtres à carburant (en cas d'utilisation d'EMAG).
- des intervalles de nettoyage plus longs pour les réservoirs de carburant (en cas d'utilisation d'EMAG)
- Échantillonnage plus régulier de la qualité du carburant (en cas d'utilisation d'EMAG).

Utilisation

Application

Lors de l'utilisation de carburants de substitution, le fournisseur du moteur doit toujours être contacté en ce qui concerne la garantie, le risque de perte de l'homologation et les recommandations relatives aux lubrifiants adaptés.

Risques

Une ligne directe pour la navigation intérieure lancée en 2021 a montré que, dans la pratique, les EMAG pouvaient avoir des conséquences techniques (dues à la pollution) à bord des navires. Par conséquent, le mélange obligatoire de b i o c a r b u r a n t s pour la navigation intérieure au 1er janvier 2023 n'a pas encore été introduit. Une nouvelle date doit encore être déterminée.

Fiche 3 : batteries électriques

DESCRIPTION

Dans un bateau électrique à batterie, le bateau est propulsé par un moteur électrique et l'énergie est stockée dans des batteries. La régulation de la puissance de propulsion se fait par l'intermédiaire de convertisseurs de fréquence électrique. L'énergie peut être rechargée via une station de charge à terre (batteries fixes) ou en échangeant le pack de batteries (batteries conteneurs). Si l'énergie stockée dans les batteries est générée à partir de sources renouvelables, il est possible de naviguer en neutralité climatique (sans émissions de CO₂).

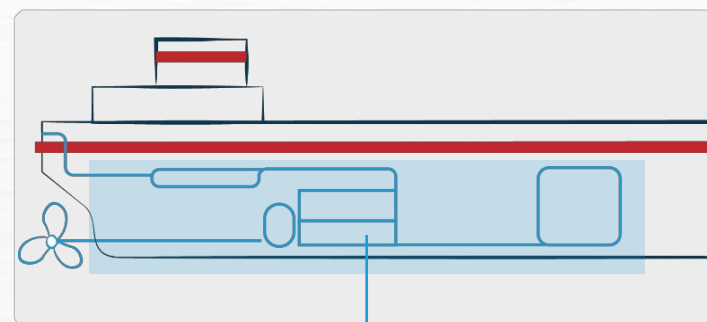
CARACTÉRISTIQUES

Technology Readiness Level			▲
Investering (CAPEX)			▲
Operationele kosten (OPEX)		▲	
Beschikbare infrastructuur	▲		
Noodzakelijke veiligheidseisen		▲	
Benodigde opleiding			▲

Batterij elektrisch

Laag Midden Hoog

IMPACT

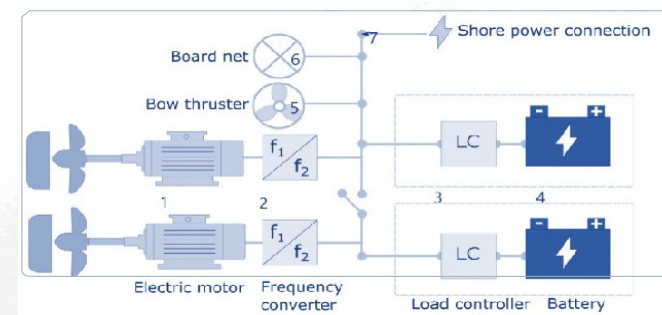


Salle des machines, tableau principal et stockage des batteries

TECHNIQUE

L'installation de bord pour la navigation électrique à batterie se compose des éléments suivants :

- 1 Le moteur électrique
- 2 Le convertisseur de fréquence
- 3 Le tableau de distribution principal
- 4 Batteries
- 5 et 6 Autres consommateurs
- 7 Raccordement à terre



Choix

- Batteries intégrées ou système de stockage d'électricité (EOS, par exemple dans un conteneur).
- Type de piles* en fonction du nombre de cycles de charge/décharge et de la durée de vie prévue.

Avantages

- Les bateaux électriques à batterie sont disponibles dans le commerce (TRL 9).
- L'efficacité énergétique est élevée ; le TTW se situe entre 88% et 92% (conversion énergétique : moteur électrique PM 97%, pile à combustible 55% et moteur à combustion interne 43%).

Investissements

- Les coûts d'électrification et d'installation (moteurs, contrôle et interface) sont plus élevés que ceux de la propulsion diesel conventionnelle : 350K€ à 850K€ **
- Les coûts d'installation sont similaires, mais les coûts de développement du système électrique dépendent fortement du fournisseur et de la standardisation éventuelle de la solution.
- Les coûts de la batterie s'ajoutent au coût de la propulsion (ordre de grandeur de 750 €/kWh**). Ce problème sera éliminé si l'on opte pour un modèle de batterie interchangeable et de paiement à l'utilisation.

Utilisation

Actuellement, les coûts de carburant pour la navigation électrique sont plus élevés que pour la navigation diesel, bien que cela dépende fortement des fluctuations des prix du diesel et de l'électricité :

Diesel : +/- 0,19 €/kWh € 0,82 €/l/9,96kWh/l/43%

- Électricité : +/- 0,31 €/kWh (0,27 €/kWh/88%)
- Les coûts d'entretien de la propulsion électrique sont manifestement inférieurs à ceux de la propulsion diesel. En gros, les coûts d'entretien d'un moteur diesel peuvent être mis au rebut (20ct/l de consommation de carburant ; 4ct/kWh).
- La consommation en kWh devrait être relativement plus faible qu'une conversion directe de la consommation de diesel, Concernant la baisse de la consommation à faible puissance/au repos.

- Pas de consommation lorsque la propulsion n'est pas nécessaire (pas de consommation au ralenti).
- Adaptation modulaire à d'autres vecteurs énergétiques possible grâce à l'utilisation de modules interchangeables (pile à combustible hydrogène/méthanol ou groupe électrogène diesel).
- Confort accru (peu de bruit et de vibrations, pas de nuisances olfactives et de suie).
- Faible besoin de maintenance.

Inconvénients

- Les batteries ont une densité énergétique très faible par rapport au carburant diesel (batterie : 0,18-0,26kWh/kg/diesel 12kWh/kg).
- L'autonomie de navigation est limitée avec une seule charge (par rapport à l'autonomie d'un navire à moteur diesel).
- La technologie des batteries est encore en cours de développement, de sorte que les performances continueront d'augmenter dans les années à venir.

Règle empirique

100l de diesel = 5 000kg de batteries.
100l diesel = 488kWh de capacité de batterie.

*LFP = Lithium Iron Phosphate
NMC = Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide
LTO = Lithium Titanate Oxide

CONDITIONS LIMITES

Réglementation

Les bateaux de navigation intérieure électriques à batterie doivent respecter un certain nombre de réglementations et de directives supplémentaires de l'ES-TRIN. La propulsion électrique principale d'un bateau se compose au minimum de :

- Deux sources d'énergie, indépendantes du nombre de moteurs principaux.
- En cas de défaillance d'une source d'énergie, la source d'énergie restante doit être en mesure de fournir les consommateurs nécessaires à la sécurité de la navigation pendant au moins 30 minutes.
- Une électronique de puissance et/ou une commande de puissance redondantes (selon le cas) pour garantir le maintien de la manœuvrabilité requise.
- D'autres lignes directrices techniques sont décrites dans le document ES-TRIN. Il est possible que les exigences relatives à l'équipage (conducteur) soient mises à jour à l'avenir.

L'infrastructure

En raison du rayon d'action plus limité du navire (par rapport à un navire diesel standard), la présence d'infrastructures de recharge ou de points d'échange de batteries (EOS) doit être prise en compte dans le programme de navigation. L'Alpherium d'Alphen aan den Rijn est actuellement la seule station publique d'échange de batteries aux Pays-Bas.

Des infrastructures de recharge publiques et des points d'échange pour les conteneurs de batteries sont actuellement développés, notamment par Zero Emission Services (ZES) avec le soutien financier du gouvernement (National Growth Fund) dans le but de :

- 75 conteneurs de piles,
- 14 stations de recharge et
- 45 navires électrifiés.

Considérations

- Batterie intégrée vs système de stockage d'électricité (EOS).
- Profil de navigation adapté - capacité de la batterie.

Les possibilités de subvention peuvent rendre la navigation électrique commercialement intéressante.

** Price level 2021, CCNR



Fiche d'information 4 : l'hydrogène

DESCRIPTION

L'hydrogène est un élément chimique que l'on trouve généralement sur Terre dans des composés tels que l'eau (H₂O) ou le méthane (CH₄). L'hydrogène peut être utilisé comme carburant (vecteur d'énergie) pour la navigation intérieure en le brûlant dans un moteur à combustion ou en l'utilisant dans une pile à combustible. Lorsque l'hydrogène est utilisé dans une pile à combustible, l'énergie de la substance eau est directement convertie en électricité pour la propulsion électrique. La combustion de l'hydrogène dans un moteur à combustion interne libère de l'énergie mécanique. Actuellement, la poussière d'eau est principalement produite à partir de gaz naturel, ce qui libère du CO₂.

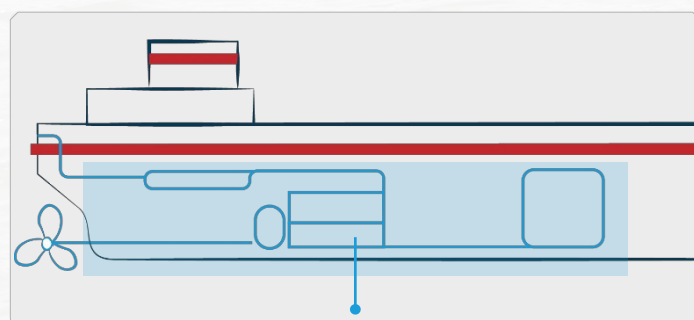
L'électrolyse permet toutefois d'extraire l'hydrogène de l'eau ce qui en fait (si l'électricité provient de sources renouvelables telles que l'énergie solaire ou éolienne) un carburant sans émissions.

CARACTÉRISTIQUES

Technology Readiness Level	Laag	Midden	Hoog
Investering (CAPEX)			▲
Operationele kosten (OPEX)		▲	▲
Beschikbare infrastructuur	▲		
Noodzakelijke veiligheidseisen		▲	▲
Benodigde opleiding		▲	▲

Waterstof

IMPACT



Salle des machines, système d'alimentation en carburant et stockage

TECHNIQUE

production d'hydrogène nécessite beaucoup d'énergie (électrique). ce qui rend l'efficacité du système Well-to-Wake faible (20-30%).- Le stockage et le transport de l'hydrogène sont complexes.



Choix

- Comme carburant dans un moteur à combustion interne modifié.
- Comme combustible pour une pile à combustible.

Types d'hydrogène

- **Hydrogène gris** : 95% de la production mondiale (actuelle) est réalisée à partir de combustibles fossiles (gaz naturel).
- Ses émissions de CO₂ sont plus élevées que celles du diesel.
- **L'hydrogène bleu** : il est également fabriqué à partir de gaz naturel, mais le CO₂ libéré au cours du processus est capturé et stocké. L'hydrogène bleu a donc un taux d'émission de CO₂ empreinte que l'hydrogène gris.
- **Hydrogène vert** : L'hydrogène vert est produit par électrolyse, c'est-à-dire que l'eau est divisée en hydrogène et en oxygène dans un électrolyseur utilisant de l'électricité provenant de sources renouvelables, telles que l'énergie solaire ou éolienne. Ce processus n'émet pas de gaz à effet de serre.

Avantages

- L'hydrogène vert ne produit pas d'émissions.
- Densité énergétique élevée par kg.
- Les matières premières de l'hydrogène sont abondantes (eau et énergie solaire ou éolienne).
- L'hydrogène n'est pas toxique.

Inconvénients

La disponibilité de l'hydrogène vert est faible.- La production d'hydrogène nécessite beaucoup d'énergie (électrique). ce qui rend l'efficacité du système Well-to-Wake faible (20-30%).- Le stockage et le transport de l'hydrogène sont complexes.

COMMERCIAL

Investissements

- Une pile à combustible combinée à une propulsion électrique.
- Ou un moteur à combustion d'hydrogène dédié.
- Dans le cas d'un moteur à combustion interne, installation d'un système de post-traitement.
- Système de tuyauterie, de sécurité et de ventilation adapté
- Indication Moteur à hydrogène Stage V/Euro VI 650 €/kW*
- Afin d'abaisser le seuil d'investissement pour les armateurs, ils travaillent sur des conteneurs d'hydrogène pressurisé interchangeables avec un modèle commercial de paiement à l'utilisation.

* La situation peut varier considérablement et dépend de plusieurs facteurs tels que les prix du marché du pétrole brut et du gaz. À l'avenir, d'éventuelles taxes sur les émissions de CO₂ et des incitations en faveur des carburants renouvelables pourraient faire baisser le prix de l'hydrogène vert par rapport au diesel et stimuler la demande.

Utilisation

- Coût de l'hydrogène par rapport au diesel ordinaire* :
 - Hydrogène gris** : le prix par unité d'énergie est inférieur à celui du diesel ordinaire.
 - Hydrogène bleu** : le prix par unité d'énergie est inférieur à celui du diesel ordinaire, mais légèrement supérieur à celui de l'hydrogène gris en raison des coûts supplémentaires liés au captage et au stockage du CO₂.
 - Hydrogène vert** : environ 3x le prix du diesel (en 2023)

RÈGLES D'APPLICATION

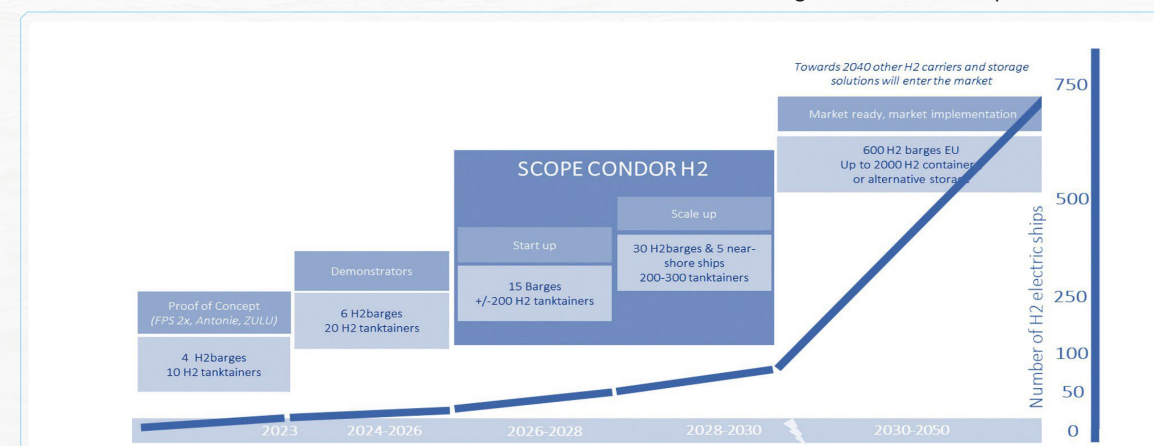
Règlement

Des directives et exemptions supplémentaires doivent être respectées pour la navigation à l'hydrogène. Le document ES-TRIN (édition 2021/1) n'inclut pas encore de réglementations pour l'application de l'hydrogène. Cependant, un projet pour les PEM-FC est prêt et des règlements pour le stockage de l'hydrogène sont en cours d'élaboration et seront prêts au début de l'année 2024. Une exemption (temporaire) doit être demandée à la CCNR. Si l'exemption est accordée, un certain nombre d'exigences et de lignes directrices doivent être respectées, conformément au chapitre 30 et à l'annexe 8 du document ES-TRIN. Voir également la fiche d'information "Pile à combustible" pour une explication plus détaillée.

Infrastructure

Il n'existe pas encore d'infrastructure de stockage et de transport pour la navigation intérieure, comme c'est le cas pour le ravitaillement en diesel. Cependant, plusieurs initiatives ont été prises pour mettre en place cette infrastructure et cet écosystème de l'hydrogène. Par exemple, selon la feuille de route "Hydrogène" du programme national sur l'hydrogène de la RVO, des bases seront jetées pour la technologie et la normalisation de la navigation à hydrogène et l'introduction de lois et de réglementations jusqu'en 2030.

Le plus grand programme européen de transition vers les barges à hydrogène s'appelle RH2INE. Il prévoit une mise à l'échelle jusqu'en 2050, comme le montre la vue d'ensemble ci-dessous. Le projet CONDOR H2 poursuivra la mise à l'échelle grâce au modèle de paiement à l'utilisation.



Fiche d'information 5 : le méthanol

DESCRIPTION

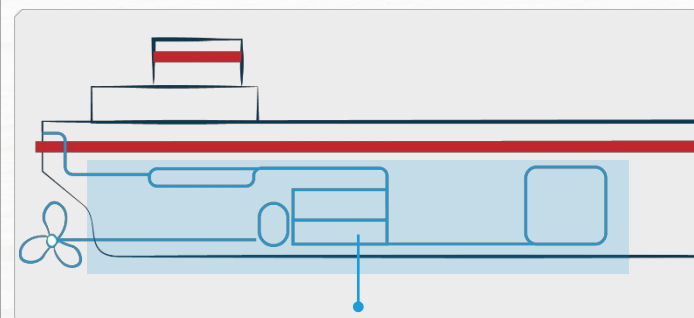
Le méthanol est un alcool (alcool méthylique) largement utilisé dans le monde entier dans l'industrie pétrochimique, mais il peut également être utilisé comme vecteur énergétique. Le méthanol est actuellement fabriqué à partir de gaz naturel ou de charbon. Il s'agit d'une substance incolore, liquide à température ambiante, qui peut donc être stockée sous pression normale, mais qui est hautement inflammable et toxique. Le méthanol brûle pratiquement sans émissions. Sa densité énergétique est inférieure à celle du gasoil, mais beaucoup plus élevée que celle de l'hydrogène dans les réservoirs de stockage ou les batteries. Le méthanol peut être utilisé dans un moteur à combustion ou pour produire de l'énergie par le biais d'une pile à combustible.

CARACTÉRISTIQUES

	Laag	Midden	Hoog
Technology Readiness Level			▲
Investering (CAPEX)			▲
Operationele kosten (OPEX)		▲	
Beschikbare infrastructuur	▲		
Noodzakelijke veiligheidseisen		▲	
Benodigde opleiding		▲	

Methanol

IMPACT



Salle des machines, système d'alimentation en carburant et stockage

TECHNIQUE

Le point d'éclair étant bas (11°C contre 78°C pour le gasoil) et le méthanol étant très corrosif et toxique, il nécessite une conception différente du système de stockage et de tuyauterie :

- Réservoir de stockage et tuyauterie en acier inoxydable très résistants à la corrosion.
- Tuyauterie à double paroi.
- Stockage inerte, ventilation supplémentaire et détection des fuites.

Choix

- Comme carburant dans un moteur à combustion interne modifié.
- Comme combustible pour une pile à combustible (après conversion ou non en hydrogène).

Types de méthanol

- **Méthanol fossile** : fabriqué à partir de gaz naturel (gris) ou de charbon (brun) ; les émissions de Well-to-Wake sont similaires à celles du diesel fossile.
- **Biométhanol** : fabriqué à partir de la biomasse. Neutre sur le plan climatique car la biomasse a déjà absorbé du CO₂ et s'il est produit à partir d'énergie verte.
- **E-méthanol** : fabriqué à partir d'hydrogène et de CO₂ /CO. Neutre sur le plan climatique si l'énergie nécessaire à la production est verte (soleil ou vent, par exemple).

Avantages

- Des infrastructures et des connaissances sur l'utilisation, le stockage et le transport sont disponibles.
- Neutre sur le plan climatique en cas d'utilisation de biométhanol ou d'e-méthanol.
- Densité énergétique relativement élevée par rapport à d'autres vecteurs énergétiques (seulement la moitié de celle du diesel).
- Le stockage du méthanol et l'avitaillement peuvent se faire à température et pression ambiantes.

Inconvénients

- Hautement toxique (le liquide et les vapeurs sont toxiques pour l'homme et les animaux).
- Hautement inflammable avec une flamme invisible.
- La disponibilité du bioéthanol est faible et la production d'e-méthanol est encore en développement.

COMMERCIAL

Investissements

- Moteur à combustion dédié au méthanol ou pile à combustible combinée à un système d'entraînement électrique.
- Dans le cas d'un moteur à combustion interne, installation d'un système de post-traitement.
- Système de tuyauterie et de ventilation adapté.
- Indication moteur méthanol Stage V/Euro VI +/- €500/kW*.
- Installation et système de méthanol (consultation d'experts).

* Niveau des prix 2021, CCNR

Utilisation

- Les coûts du carburant sont nettement plus élevés :
 - Méthanol fossile** : semble lié au prix du gaz aux États-Unis.
 - Bio-méthanol** : environ 1,5 fois le prix du méthanol fossile.
 - E-méthanol** : environ 3x le prix du méthanol fossile.
- Les coûts d'entretien pour une utilisation dans un moteur à combustion interne seront similaires à ceux d'un moteur à combustion interne conventionnel.
- Les coûts d'entretien liés à l'utilisation d'une pile à combustible seront nettement inférieurs à ceux d'un moteur à combustion interne et comparables à ceux d'un système d'entraînement électrique à batterie.

CONDITIONS LIMITES

Règlement

Actuellement, il n'y a pas de description concernant le méthanol dans les réglementations ES-TRIN pour les barges fonctionnant au méthanol. Le groupe de travail CESNI-PT-FC travaille sur des amendements à l'annexe 8 de l'ES-TRIN, qui était à l'origine prévue uniquement pour le GNL, et qui est maintenant complétée par des descriptions sur les piles à combustible et complétée par l'hydrogène et le méthanol en tant que carburant pour les bateaux de navigation intérieure. La mise en œuvre de ces amendements à l'ES-TRIN est prévue pour le 1er janvier 2025. Les réglementations internationales s'appuient principalement sur le code IGF (prescriptions pour les gaz ou autres combustibles à faible point d'éclair).

Infrastructure

L'industrie pétrochimique dispose déjà d'une vaste infrastructure dans de nombreux ports et à proximité de ceux-ci. Les connaissances nécessaires pour l'étendre aux infrastructures de soutage des navires sont également présentes, car le méthanol est aussi fréquemment transporté par bateau dans le monde entier.

Disponibilité des moteurs et des piles à combustible

Certains fabricants de moteurs à moyenne et basse vitesse ont déjà intégré des moteurs au méthanol dans leur programme. Il s'agit de moteurs dont la plage de puissance est bien supérieure à celle qui est habituelle en navigation intérieure. Les moteurs des fournisseurs les plus courants de moteurs à grande vitesse qui se situent dans la plage de puissance de la navigation intérieure ne seront disponibles que dans quelques années. En outre, certains fabricants de moteurs étudient également la possibilité de fournir des kits d'adaptation, ce qui devrait permettre de convertir les moteurs diesel actuellement installés au méthanol.

Disponibilité du méthanol

- **Méthanol fossile** : facilement disponible.
- **Biométhanol** : disponibilité limitée.
- **E-méthanol** : en cours de développement.

Fiche 6 : diesel-électrique

DESCRIPTION

Dans la propulsion diesel-électrique ou hybride, l'hélice est entraînée par un moteur électrique (diesel-électrique) ou par une combinaison d'un moteur électrique et d'un moteur diesel (hybride). L'objectif est d'utiliser en permanence une propulsion efficace, même en cas de demande de puissance très variable. Le groupe motopropulseur électrique se compose des éléments suivants

- 1 moteur(s) de propulsion électrique
- 2 convertisseur de fréquence et
- 3 tableau principal
- 4 groupes électrogènes diesel et/ou 5 (batterie avec BMS*)



Ces systèmes de propulsion sont considérés comme une technologie de transition importante, car les groupes électrogènes diesel peuvent être facilement remplacés ultérieurement par d'autres sources d'énergie, telles qu'un groupe électrogène au méthanol, une batterie ou une pile à combustible.

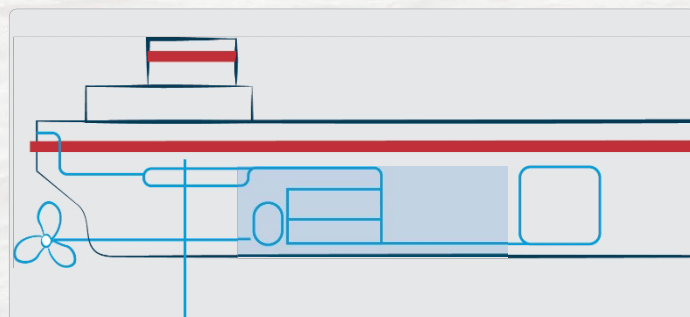
CARACTÉRISTIQUES

Technologie Readiness Level		▲
Investering (CAPEX)		▲
Operationele kosten (OPEX)	▲	
Beschikbare infrastructuur		▲
Noodzakelijke veiligheidseisen	▲	
Benodigde opleiding	▲	

Diesel elektrisch

Laag Midden Hoog

IMPACT

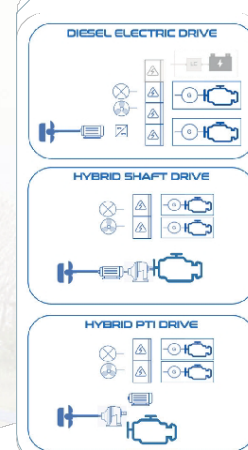


Salle des machines (générateurs, moteurs électriques et tableau principal)

TECHNIQUE

Lors de l'application de la propulsion diesel-électrique ou hybride, le profil de navigation est essentiel pour sélectionner la puissance/les composants appropriés. Les aspects suivants sont importants :

- Profil de croisière (demande de puissance en fonction du temps et de la distance de croisière).
- Exigences en matière de redondance et de confort (vibrations/bruit).



Choix

Diesel-électrique, il s'agit toujours d'une navigation électrique ; l'énergie est générée par un ou plusieurs groupes électrogènes (en fonction de la taille de l'équipage) de la puissance nécessaire) et peut être combiné à un bloc-batterie, ce qui permet de naviguer (temporairement) sans émissions. Ce système est le plus souvent utilisé sur les nouvelles constructions.

Hybride, il permet de naviguer à la fois en mode électrique et en mode conventionnel, car la chaîne cinématique diesel conventionnelle est conservée, mais elle est complétée par un entraînement électrique (avec un moteur électrique directement sur l'arbre de transmission - entraînement par arbre - ou sur la boîte de vitesses - entraînement PTI), ce qui permet également (temporairement) de naviguer en mode électrique. Il s'agit d'une solution pragmatique pour la modernisation.

Avantages

- Niveau de préparation technique (TRL) : 9 - technologie mature.
- Réduction de la consommation de carburant et du nombre d'heures de fonctionnement grâce à une utilisation optimale du moteur.
- Les moteurs électriques peuvent supporter un couple élevé à faible vitesse, ce qui permet d'utiliser des hélices plus efficaces (plus lourdement chargées).

Inconvénients

- Poids et espace supplémentaires requis (plus de composants à bord).
- Complexité supplémentaire (intégration du système).

L'efficacité des moteurs diesel-électriques à pleine puissance est inférieure à celle des moteurs diesel à entraînement direct. Les systèmes de propulsion électrique optimaux sont conçus en fonction du profil opérationnel prévu. Une connaissance détaillée de ce profil est essentielle pour une sélection et une conception correctes.

COMMERCIAL

Investissements

- Groupe électrogène diesel (DPF + SCR inclus) : +/- 550 €/kW**.
- Moteur électrique : 240 €/kW**.
- Installation, conversion et gestion de l'énergie (base du projet).

Utilisation

En utilisant (plusieurs) moteurs diesel plus petits, ils sont relativement moins chargés et fonctionnent donc plus efficacement.

La puissance excédentaire est ainsi automatiquement coupée, ce qui limite le nombre d'heures de fonctionnement par moteur.

Il en résulte que :

- Réduction des coûts de carburant.
- Réduction des coûts de maintenance.

Ces pertes sont compensées par les pertes électriques (dus à la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique, puis à nouveau en énergie mécanique).

* Système de gestion de la batterie
** Niveau des prix 2021, CCNR

Considérations

Étant donné que des pertes de conversion supplémentaires se produisent également, cette configuration n'est pas nécessairement intéressante. Elle dépend fortement du profil opérationnel : plus la différence entre les besoins moyens et maximaux en énergie du navire est importante, plus l'option diesel-électrique est intéressante. ou devenir hybride.

Règle empirique

- Si la charge moyenne du moteur de propulsion est inférieure à 55 % de la puissance maximale, une propulsion diesel-électrique ou hybride présente un intérêt commercial.
- Une installation optimisée peut permettre des économies de carburant de 10 à 20 % et une réduction des coûts de maintenance pouvant aller jusqu'à 60 %.

CONDITIONS LIMITES

Règlement

Les règles relatives aux installations diesel-électriques sont définies dans la norme européenne relative aux prescriptions techniques des bateaux de navigation intérieure (ES-TRIN 2019). Il peut y avoir des règles supplémentaires si un bateau est soumis aux règles d'une société de classification.

Selon la réglementation ES-TRIN 2019, un système de propulsion diesel-électrique doit être composé d'au moins deux groupes électrogènes, d'un tableau de distribution principal, d'un convertisseur de fréquence et d'un moteur électrique sur l'arbre d'hélice. L'un des groupes électrogènes doit être capable d'assurer le fonctionnement du navire en toute sécurité pendant au moins 30 minutes en cas de défaillance du second groupe électrogène.

Application

Depuis 2019, seuls les moteurs et les groupes électrogènes diesel dotés d'une certification d'émissions de phase V de l'UE (ou supérieure) peuvent être placés sur les bateaux de navigation intérieure. Si le moteur doit être remplacé, nécessitera donc nécessairement un investissement substantiel (qui dépendra également des subventions disponibles).

En fonction de la puissance maximale requise, du profil de navigation et de la configuration choisie (entièrement diesel-électrique, avec ou sans batterie ou hybride), le coût supplémentaire peut être limité et il est donc possible d'obtenir un retour sur investissement en moins de 10 ans par rapport à l'installation d'un nouveau moteur de la phase V. Cette solution offre également la souplesse nécessaire pour franchir à l'avenir l'étape suivante vers une navigation sans émissions, et ce à très faible coût. Plus de 300 bateaux diesel-électrique circulent actuellement sur les voies navigables européennes.

L'équipage

Il n'y a pas d'impact significatif à bord en ce qui concerne le niveau de connaissance de l'équipage, étant donné que le niveau de connaissance technique de l'équipage est très élevé.

les principes déjà présents à bord (installation électrique et moteurs). En particulier pour les tensions et les puissances plus élevées, des certifications supplémentaires de l'équipage peuvent être requises.

En général, cela ne s'applique pas encore à la navigation intérieure.

Fiche 7 : moteur à combustion alternatif

DESCRIPTION

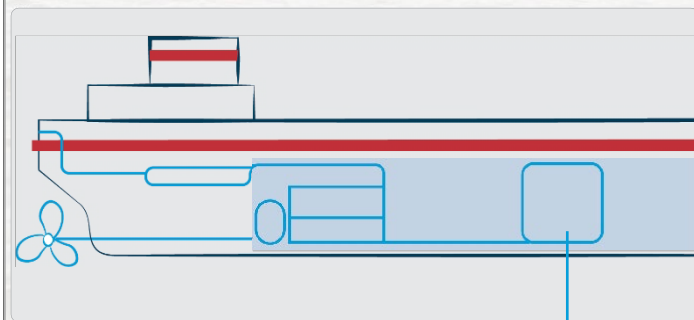
Le moteur à combustion interne est le moyen le plus courant de convertir un combustible en énergie mécanique ou en électricité (en tant que groupe électrogène). Le plus souvent, ce sont des combustibles fossiles (diesel) qui sont utilisés dans ce processus. Les carburants alternatifs peuvent dans certains cas être utilisés dans un moteur diesel non modifié (les carburants dits "drop-in"). D'autres carburants nécessitent des modifications du moteur. Cette dernière catégorie est appelée traité ici. Plus précisément, il s'agit de moteurs à combustion dans lesquels l'hydrogène, le méthanol et le Bio-LNG (LBM) peuvent être utilisés. Une distinction a été faite entre les moteurs monocarburants et les moteurs bicarburants. En outre, ces moteurs peuvent être utilisés comme entraînement direct ou pour générer de l'énergie via un générateur.

CARACTÉRISTIQUES

Technologie Readiness Level	Laag	Midden	Hoog
Investering (CAPEX)			▲
Operationele kosten (OPEX)		▲	▲
Beschikbare infrastructuur	▲		
Noodzakelijke veiligheidsisen		▲	▲
Benodigde opleiding		▲	▲

Alternatieve verbrandingsmotor

IMPACT



Moteurs à combustion, système de carburant et stockage

TECHNIQUE

Moteur à combustion pour carburants alternatifs :

L'hydrogène, le méthanol et le Bio-LNG ne peuvent pas être utilisés dans un moteur à combustion classique parce que ces carburants ont une température d'auto-inflammation beaucoup plus élevée que le carburant diesel ordinaire.

Choix

- **Monocombustible** : convient pour un seul combustible avec allumage par étincelle.
- **Bicarburant** : convient pour un seul carburant, avec un mélange de gazole pour obtenir l'allumage (injection pilote +/- 5 % de gazole).
- **Bicarburant** : convient pour deux carburants différents, un carburant alternatif avec injection pilote ou un mélange de diesel (entre 20 % et 100 % de diesel). Comme la combustion se poursuit, il y aura des émissions de polluants. En fonction du carburant choisi, un système de post-traitement (limité) devra donc être appliqué. Les conduites de carburant à bord doivent également être à double paroi afin de détecter rapidement les fuites et d'en limiter les conséquences éventuelles.

Avantages

- La pureté de l'hydrogène peut être inférieure (<99,99% Vol.-%) à celle des piles à combustible.
- La neutralité climatique est possible (TtW), en fonction du carburant (dans le cas d'une bicarburant, le diesel doit également être renouvelable, par exemple en utilisant du HVO).
- Les émissions de particules et de NOx sont nettement inférieures à celles du diesel.
- Investissement inférieur à celui d'une pile à combustible.

Cons

- Pour les moteurs bicombustibles et certains moteurs monocombustibles à hydrogène et à méthanol, un système de post-traitement des gaz d'échappement (bien que plus limité) est toujours nécessaire pour respecter les valeurs d'émission de la phase V de l'UE.
- Le développement (et donc la disponibilité) de moteurs appropriés avec une gamme de puissance pour la navigation intérieure est encore très faible (à l'exception des moteurs GNL, qui ont un TRL de 9).

CONDITIONS LIMITES

Règlement

L'utilisation de l'hydrogène et/ou du méthanol n'est pas encore réglementée dans l'ES-TRIN. Le GNL l'est, notamment dans l'annexe 8 de l'ES-TRIN 2019 et dans le chapitre 30 sur les dispositions spéciales applicables aux navires équipés de systèmes de propulsion ou de systèmes auxiliaires fonctionnant avec des combustibles dont le point d'éclair est inférieur ou égal à 55°C. Au sein du CESNI, un groupe de travail (CESNI-PT-FC) est chargé de proposer des règles techniques pour l'utilisation, l'avitaillement et le stockage des carburants alternatifs à bord des bateaux de navigation intérieure. La mise en œuvre de ces modifications dans l'ES-TRIN est prévue pour le début de l'année 2025. D'ici là, l'utilisation d'hydrogène ou de méthanol sur les bateaux de navigation intérieure nécessite une demande d'exemption. Des règles plus strictes s'appliquent également à la ventilation et à la détection des vapeurs, entre autres.

Disponibilité

Les moteurs à combustion (bio-)GNL sont disponibles depuis plusieurs années pour les bateaux de navigation intérieure. Pour l'hydrogène et le méthanol, il existe déjà des fabricants de moteurs qui proposent des moteurs bicarburants dans leur gamme de produits, mais souvent avec une gamme de puissance plus élevée que celle habituellement utilisée pour la propulsion des barges. Les fournisseurs de moteurs à grande vitesse incluront dans leur programme de vente, au cours des prochaines années, des moteurs modifiés adaptés aux carburants alternatifs. En outre, certains fabricants de moteurs fourniront dans les années à venir des kits d'adaptation qui permettront de convertir les moteurs diesel actuellement installés en moteurs à méthanol.

COMMERCIAL

Investissements

- **Moteur de phase V/Euro VI pour l'hydrogène** : +/- 650 € par kW*. (On suppose que le stockage de l'hydrogène à bord se fera dans des réservoirs interchangeables et avec un paiement à l'utilisation).
- **Moteur de phase V/Euro VI pour le méthanol** : +/- 500 € par kW*. En outre, le volume des soutes/réservoirs devrait également être augmenté pour la même plage de croisière, car la densité énergétique du méthanol est environ deux fois moins élevée que celle du diesel.
- **Moteur Stage V/Euro V pour le (Bio-)GNL** : +/- 450 € par kW*.

Utilisation

- L'efficacité énergétique sera similaire à celle d'un moteur diesel ordinaire de phase V, mais inférieure à celle d'une pile à combustible.
- En principe, les coûts d'entretien devraient être comparables à ceux d'un moteur diesel standard de la phase V.
- Les détails exacts ne sont pas encore connus, car de nombreux fabricants sont encore en phase de développement.
- Les carburants utilisés étant plus purs que le diesel fossile, les coûts d'entretien du moteur lui-même pourraient être légèrement inférieurs.
- En outre, les coûts de maintenance des systèmes de combustible sont susceptibles d'augmenter en raison de la complexité des systèmes à haute pression et/ou cryogéniques. Il sera donc plus difficile de confier les travaux à du personnel interne.

* Niveau des prix 2021, CCNR

Fiche d'information 8 : pile à combustible

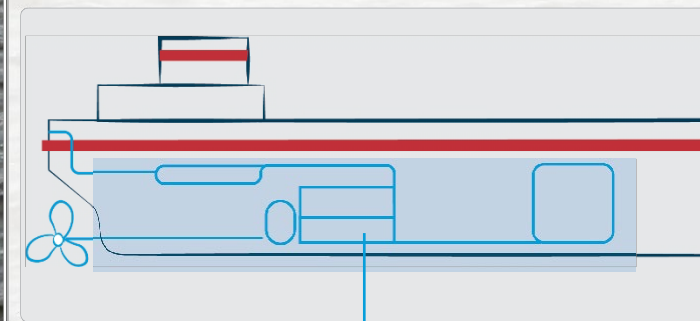
DESCRIPTION

Une pile à combustible est un dispositif électrochimique dans lequel l'hydrogène réagit avec l'oxygène pour produire de l'électricité, en rejetant de l'eau et de la chaleur. L'un des principaux avantages de la pile à combustible est qu'elle n'émet pas de polluants, contrairement aux moteurs à combustion. La pile à combustible est donc une technologie intéressante pour produire de l'électricité lorsque les batteries n'ont pas une capacité suffisante. Elle peut fournir. Si l'hydrogène est fabriqué à partir d'énergies renouvelables telles que l'énergie solaire ou éolienne, on obtient une source d'énergie sans émissions. Outre l'hydrogène, le méthanol peut également être utilisé comme carburant. Dans ce cas, l'hydrogène est d'abord extrait du méthanol via un "reformeur". La pile à combustible spécifique au méthanol en est encore à ses balbutiements. Le type de pile à combustible le plus couramment utilisé dans le secteur des transports est la PEM-FC (pile à combustible à membrane d'hydrogène).

CARACTÉRISTIQUES

	Laag	Midden	Hoog
Technology Readiness Level			▲
Investerings (CAPEX)			▲
Operationele kosten (OPEX)		▲	
Beschikbare infrastructuur	▲		
Noodzakelijke veiligheidseisen		▲	
Benodigde opleiding		▲	

Brandstofcel

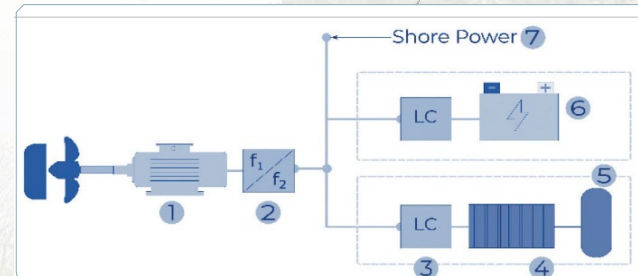


Salle des machines et stockage de carburant

TECHNIQUE

L'installation à bord d'un navire équipé d'un moteur à hydrogène comprend les éléments suivants :

- 1 Moteur électrique.
- 2 Convertisseur de fréquence.
- 3 Tableau principal.
- 4 Pile à combustible.
- 5 Réservoir d'hydrogène.
- 6 Batterie.
- 7 Connexion à la terre.

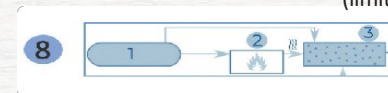


Dans le cas du méthanol, d'abord :

- 8 hydrogène extrait du méthanol et
1. Le stockage du méthanol remplace
- 5 le stockage de l'hydrogène.

Les composants de ce système sont les suivants :

1. Stockage du méthanol.
2. Élément chauffant.
3. Réformateur.



Choix

- Hydrogène ou méthanol comme carburant.
- Conteneur de piles à combustible modulaire ou intégré.
- Stockage modulaire de l'hydrogène ou réservoirs intégrés.
- Batterie modulaire.

Avantages

- La pile à combustible elle-même ne produit pas d'émissions. En fonction de l'empreinte du carburant du puits au réservoir, elle peut fournir une propulsion totalement exempte d'émissions.
- Aucune contrainte mécanique sur les composants de la pile à combustible, d'où une usure, des vibrations et un bruit nul ou minime.
- Conversion d'énergie plus efficace que le moteur à combustion interne.

Inconvénients

- Haute pureté de l'hydrogène (99,99 %) requise pour une durée de vie optimale de la pile à combustible.
- Le rendement énergétique peut varier et la pile à combustible met un certain temps à atteindre la température. Par conséquent, pour la propulsion d'un navire, elle doit toujours être associée à un bloc-batterie (limité).

COMMERCIAL

Investissements

- Pile à combustible : +/- 2 500 euros par kW*.
- Les coûts d'électrification et d'installation (moteurs, contrôle et interface) sont plus élevés que ceux de la propulsion diesel conventionnelle : 350 000 € à 850 000 €*.
- Batterie en plus de la pile à combustible : +/- 750 €/kWh*.
- Le coût de développement du système électrique dépend fortement du fournisseur et de la normalisation éventuelle de la solution.
- Installation et système d'hydrogène (consultation d'experts).
- Les coûts du stockage de l'hydrogène sont élevés et dépendent fortement du projet. C'est également le cas pour le méthanol, mais dans une moindre mesure.

Avec la propulsion électrique, des solutions énergétiques modulaires peuvent également être utilisées, où les piles à combustible, le stockage de l'hydrogène et/ou les batteries sont placés à bord sous forme de conteneurs. Dans ce cas, le modèle "énergie en tant que service" / "paiement à l'utilisation" est adopté pour abaisser le seuil d'investissement.

Utilisation

- Consommation indicative d'hydrogène : 60 kg/1 000 kWh.
- Les coûts d'entretien sont plus faibles (pas de contraintes mécaniques, donc moins de pièces d'usure et pas de lubrifiants), pour la production d'électricité.
- Actuellement, la durée de vie prévue est $\geq 20\ 000$ heures. Les fabricants s'efforcent d'atteindre une durée de vie de 80 000 heures.

CONDITIONS LIMITES

Règlement

Pour naviguer avec une pile à combustible, il faut respecter les règles de base de la propulsion électrique. Des directives et des exemptions supplémentaires doivent être respectées pour la navigation à l'hydrogène. Le document ES-TRIN (édition 2021/1) ne contient pas encore de descriptions pour l'application de l'hydrogène. Alors que le projet de règlement sur les piles à combustible PEM est déjà prêt, le projet de règlement sur le stockage de l'hydrogène est attendu pour le début de l'année 2024. Une exemption (temporaire) doit être demandée à la CCNR. Si l'exemption est accordée, un certain nombre d'exigences et de lignes directrices doivent être respectées, conformément au chapitre 30 et à l'annexe 8 du document ES-TRIN.

Les lignes directrices supplémentaires sont les suivantes

- Évaluation des risques et directives (de construction) des systèmes embarqués.
- Lignes directrices pour le stockage de l'hydrogène.
- Lignes directrices pour l'avitaillement en hydrogène (applicables uniquement aux réservoirs fixes).
- Lignes directrices pour l'entretien des systèmes de piles à combustible
- Exigences en matière de formation des membres d'équipage sur les risques liés au fonctionnement, à l'entretien et à l'inspection des systèmes de piles à combustible.

Infrastructure

L'infrastructure requise dépend fortement de la solution choisie, ce qui permet également de faire preuve de flexibilité. Lorsque l'on travaille avec des solutions modulaires sous la forme de conteneurs interchangeables, il est possible d'utiliser à la fois des conteneurs de batteries et des conteneurs d'hydrogène/une infrastructure d'hydrogène. On pourrait donc choisir de commencer par la propulsion électrique au moyen de conteneurs à batterie et de conteneurs à hydrogène ou d'infrastructures à hydrogène. passer ultérieurement (temporairement ou définitivement) à l'approvisionnement en énergie par le biais d'un réservoir d'hydrogène, en fonction de de l'infrastructure de l'époque et des itinéraires de navigation prévus. D'ici 2023, il y aura plus de navires à hydrogène que de navires entièrement alimentés par des batteries.

* Niveau de prix 2021, CCNR

Fiche 9 : biométhane liquéfié (LBM/Bio-LNG)

DESCRIPTION

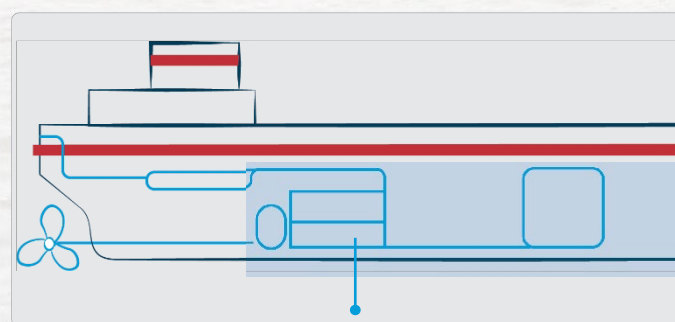
Le GNL est un liquide fossile clair, incolore et non toxique produit lorsque le gaz naturel est refroidi à -162°C. Le LBM (biométhane liquéfié, également appelé Bio-LNG aux Pays-Bas) est une variante non fossile de ce gaz et est produit à partir de matières organiques, telles que la biomasse, les déchets agricoles, le fumier, les boues d'épuration et les déchets alimentaires. Le LBM a des propriétés identiques à celles du GNL fossile et peut donc être utilisé dans un moteur à combustion (moteur à gaz). Le LBM peut également être mélangé au GNL fossile sous la forme de forme intermédiaire. La combustion dans un moteur à combustion interne libère beaucoup moins de polluants ($NO_x/SO_x/PM$) qu'un moteur diesel. Contrairement au GNL fossile, le LBM permet également une réduction substantielle des gaz à effet de serre (Well-to-Wake) peut être obtenue.

CARACTÉRISTIQUES

	Laag	Midden	Hoog
Technology Readiness Level			▲
Investering (CAPEX)			▲
Operationele kosten (OPEX)	▲		
Beschikbare infrastructuur	▲		
Noodzakelijke veiligheidsisen			▲
Benodigde opleiding			▲

Liquefied methane gas

IMPACT



Moteurs à combustion, système de carburant et stockage

TECHNIQUE

Le potentiel de réduction des émissions d'un moteur à gaz utilisant des LBM par rapport à un moteur diesel CCR2 (WtW) est le suivant : 65-100% de CO_2 , 81% de NO_x et 97% de particules. En outre, aucun oxyde de soufre n'est émis.

Choix

- **Bio-LNG créé à partir de matières organiques :**
Pour produire du Bio-LNG, les matières organiques sont converties en biogaz dans un digesteur. Tous les contaminants éventuels sont ensuite filtrés.
- **e-LNG produit à partir d'hydrogène et de CO_2 :**
L'e-LNG est produit à partir d'hydrogène vert et de CO_2 capturé dans un processus Power-to-Gas (P2G) dans lequel il est converti en méthane.

En le refroidissant ensuite à -162°C, il devient liquide et rétrécit à 1/600 de son volume d'origine. Il est ainsi plus facile à transporter et sa densité énergétique est plus élevée.

Avantages

- Respecter les normes strictes en matière d'émissions de gaz d'échappement (phase V de l'UE) sans système de post-traitement.
- Forte réduction des gaz à effet de serre (Well-to-Wake). Les émissions de CO_2 peuvent même être négatives si le LBM est extrait du fumier, dont le méthane aurait autrement été libéré dans l'atmosphère.
- Des moteurs à gaz certifiés sont disponibles et leur fiabilité est avérée (TRL 9).
- Densité énergétique élevée par rapport aux vecteurs énergétiques que sont l'hydrogène et/ou les batteries électriques (mais toujours nettement inférieure à celle du diesel)

Cons

- Investissement élevé pour le stockage du GNL/LBM/e-LNG et l'installation à bord.
- Installation complexe de gaz avec mesures de sécurité associées
- Risque de fluctuation des prix du GNL/LBM/e-LNG.

COMMERCIAL

Investissements

- Moteur à combustion spécifique au GNL +/- 450 €/kW*.
- Système GNL, installation incluse +/- 2 200 K€*.

Utilisation

Le prix du LBM/e-LNG est lié au prix du GNL et dépend donc également des tensions géopolitiques.

Une prime (substantielle) par rapport au prix du GNL est souvent utilisée. En fonction de la disponibilité, Cependant, cette augmentation a été tout aussi négative. Le coût du LBM est environ deux fois moins élevé par quantité d'énergie que celui de l'hydrogène vert.

* Niveau des prix 2021, CCNR

Il est difficile de porter un jugement de valeur concret sur le niveau des coûts d'entretien. Les moteurs à gaz ont une combustion plus propre et donc probablement moins de dépôts de carbone et moins d'usure interne du moteur que les moteurs diesel ordinaires. En outre, aucun système de post-traitement des gaz d'échappement n'est nécessaire pour répondre aux exigences actuelles de la phase V de l'UE. Toutefois, les moteurs GNL nécessitent des activités de maintenance spécifiques liées au système de carburant GNL, telles que l'inspection régulière, la maintenance et les réparations éventuelles du réservoir de GNL, de la tuyauterie et des systèmes de contrôle. Ces activités peuvent ne pas pouvoir être réalisées par l'équipe interne et doivent donc être confiées à une partie externe.

CONDITIONS LIMITES

Règlement

Dans l'ES-TRIN, l'annexe 8 décrit les dispositions supplémentaires pour les navires alimentés par un combustible dont le point d'éclair est inférieur ou égal à 55 °C, ce qui inclut le GNL et donc également le LBM et l'e-LNG. Une formation spécialisée est nécessaire pour l'équipage. Les mesures de sécurité suivantes doivent être prises en compte lors de l'avitaillement : masque facial, gants cryogéniques, manches et pantalons longs et chaussures fermées.

Infrastructure

L'infrastructure de soutage n'est pas aussi étendue que celle des stations de ravitaillement en diesel. Aux Pays-Bas et dans le nord de la Belgique, une vaste infrastructure est déjà en place à proximité des ports et des voies navigables. La directive européenne sur les infrastructures pour carburants alternatifs (AFID) impose aux États membres de veiller à ce qu'un nombre approprié de points de ravitaillement en GNL soit disponible dans les ports intérieurs d'ici le 31 décembre 2030 au plus tard, afin de permettre aux navires de mer ou de navigation intérieure fonctionnant au GNL de naviguer sur le réseau central du RTE-T.

Les options de bunker sont les suivantes :

- Avitaillement de navire à navire.
- Le soutage de terre à terre.
- Le soutage de camion à navire.

Disponibilité du GNL et du GNL électronique

Un nombre croissant d'entreprises produisent et proposent du LBM (Bio-LNG), mais l'offre est actuellement faible. L'e-LNG est encore moins développé, en partie à cause de la grande quantité d'énergie nécessaire à sa production et des coûts qui y sont associés.

On peut choisir de naviguer d'abord avec du GNL ordinaire, puis de passer au LBM ou à l'e-GNL. En outre, on peut facilement choisir de naviguer avec un mélange (combinaison de GNL et de Bio-GNL), par exemple, pour respecter les lignes directrices provisoires en matière d'émissions (par exemple, 2030 fit for 55).

DESCRIPTION

Outre l'application de l'hydrogène pur en tant que vecteur d'énergie, des liaisons d'hydrogène avec un liquide, comme le LOHC, sont également envisagées. En liant chimiquement l'hydrogène à un liquide, on crée un nouveau vecteur énergétique qui peut être transporté et stocké avec une facilité et des exigences de sécurité comparables à celles du diesel. L'extraction de l'hydrogène à bord étant effectuée en fonction des besoins énergétiques du navire, seule une petite quantité d'hydrogène gazeux est présente.

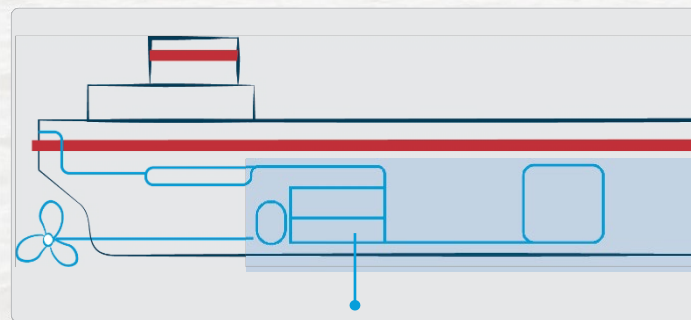
Cette technologie étant encore en cours de développement, les aspects commerciaux ne sont pas abordés pour l'instant.

CARACTÉRISTIQUES

Technologie Readiness Level	Laag	Midden	Hoog
Investering (CAPEX)		▲	
Operationele kosten (OPEX)			
Beschikbare infrastructuur	▲		
Noodzakelijke veiligheidsisen			▲
Benodigde opleiding		▲	

Waterstofdragers

IMPACT



Salle des machines, système d'alimentation en carburant et stockage

TECHNIQUE

Forme liquide - LOHC

Le LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carriers) est un vecteur d'hydrogène organique liquide. Dans cette technique, il s'agit d'un liquide (LOHC) auquel on ajoute de l'hydrogène à terre. À bord, l'hydrogène stocké peut être extrait du liquide enrichi. Le liquide utilisé à cette fin est de préférence non toxique et non classé comme dangereux. Comme le liquide se comporte comme du diesel à température et pression ambiantes, l'infrastructure de carburant conventionnelle existante peut être utilisée. La densité énergétique du LOHC est d'environ 7MJ/l.

LOHC

LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carriers) est un vecteur d'hydrogène organique liquide. Dans cette technique, il s'agit d'un liquide (LOHC) auquel l'hydrogène est ajouté à terre. À bord, à partir du liquide enrichi, l'hydrogène stocké peut être extrait. Le liquide que l'on utilise pour cela est de préférence non toxique et non classé comme "substance dangereuse". Comme le liquide se comporte comme le diesel à la température et à la pression ambiantes, l'infrastructure de carburant conventionnelle existante peut être utilisée. La densité énergétique du LOHC est d'environ 7MJ/l.

Processus

- L'hydrogène est ajouté au vecteur énergétique à terre (hydrogénation).
- Le vecteur contenant de l'hydrogène peut être stocké et transporté dans des conditions ambiantes normales, tant à terre qu'à bord.
- À bord, l'hydrogène est extrait du vecteur énergétique en fonction des besoins énergétiques actuels (déshydrogénation).
- L'hydrogène peut être utilisé sous forme gazeuse dans un moteur à combustion interne ou une pile à combustible (en fonction notamment de sa pureté).
- En tant que produit résiduel, le transporteur se retrouve sans hydrogène (combustible usé), qui doit être stocké et peut être réutilisé à terre pour ajouter de l'hydrogène (créant ainsi un processus circulaire).

Avantages

- Il est possible de naviguer sans émissions en utilisant de l'hydrogène vert comme source et de l'énergie verte pour lier l'hydrogène au vecteur.
- Le stockage, le transport et l'avitaillement peuvent se faire dans des conditions ambiantes.
- Aucun réservoir complexe (haute pression ou cryogénique) n'est nécessaire à bord du navire, ce qui réduit les dépenses d'investissement et l'impact sur la sécurité.
- Le stockage peut se faire pendant de longues périodes sans perte par évaporation (comme pour l'hydrogène sous forme gazeuse).
- L'hydrogène vecteur peut être réutilisé, créant ainsi un processus entièrement circulaire.

Inconvénients

- Les techniques ne sont qu'en cours de développement (niveau de TRL encore faible).
- Un moteur à combustion d'hydrogène ou une pile à combustible spécifique est nécessaire.
- Pour extraire l'hydrogène du vecteur, un réacteur d'hydrogénation est nécessaire à bord.
- Il reste un produit résiduel qui doit être réutilisé, ce qui nécessite un stockage supplémentaire.
- Outre l'énergie nécessaire à la production d'hydrogène, il faut également de l'énergie pour lier l'hydrogène au support.

CONDITIONS LIMITES

Règlement

Aucune réglementation spécifique n'est encore disponible, car la technologie est encore en phase de développement.

Impact

La conception du navire doit tenir compte d'un réservoir pour le stockage du "combustible usé".

Dans le cas de plusieurs réservoirs de stockage

Sécurité

- Le point d'éclair du LOHC est beaucoup plus élevé que celui du diesel (55 °C) ou de l'hydrogène. Par conséquent, le stockage du vecteur énergétique à bord présente des risques minimes d'incendie ou d'explosion.
- La quantité d'hydrogène à extraire du vecteur peut être adaptée aux besoins énergétiques. Par conséquent, une grande quantité d'hydrogène gazeux ne sera pas présente sur le navire.
- En outre, des systèmes de détection et de ventilation garantiront la sécurité en cas de défaillance du système et d'urgence.

Avitaillement et transport

Le LOHC peut être transporté en toute sécurité et en utilisant les infrastructures existantes telles que les navires en vrac ou les porte-conteneurs, le transport maritime intérieur, le transport ferroviaire ou routier.

PRÉSENTATION GÉNÉRALE

In de trajecten in aanmerking genomen technologieën	Beschrijving	TRL (1-9) toepassing in schepen	TRL (1-9) brandstof/energie-productie en levering	Potentiële emissiereductie (in een ideale upstream-keten)		
				GES/CO ₂	NO _x	Stofdeeltjes
CCR 2 of lager, diesel	Fossiele diesel in een interne verbrandingsmotor die voldoet aan de emissiegrenswaarden van CCR 2 of oudere motor.	9	9	0%	0%	0%
CCR 2 + SCR, diesel	Fossiele diesel in een interne verbrandingsmotor die voldoet aan de emissiegrenswaarden van CCR 2 en aangevuld met een nabehandelingssysteem.	9	9	0%	82%	54%
Stage V, diesel	Fossiele diesel in een interne verbrandingsmotor die voldoet aan de emissiegrenswaarden van de EU, stage V.	9	9	0%	82%	92%
LNG	Vloeibaar gemaakt aardgas in een interne verbrandingsmotor die voldoet aan de emissie-grenswaarden van de EU, stage V.	9	9	10%	81%	97%
Stage V, HVO	HVO in een interne verbrandingsmotor die voldoet aan de emissiegrenswaarden van de EU, stage V. HVO is zuiver "hydrotreated vegetable oil" (dus zonder bijmenging van fossiele brandstoffen) en alle vergelijkbare drop-in-bio-brandstoffen (met inbegrip van e-brandstoffen), alsook synthetische diesel die gemaakt wordt met ingevangen CO ₂ en duurzame elektrische stroom.	9	9	100%	82%	92%
LBM	Vloeibaar gemaakt bio-methaan (of bio-LNG) in een interne verbrandingsmotor die voldoet aan de emissiegrenswaarden van de EU, stage V.	9	8	100%	81%	97%
Batterij	Elektrisch voortstuwingssysteem met ingebouwde batterijen of uitswisselbare batterijsystemen.	8	7	100%	100%	100%
H ₂ FC	Vloeibaar of gasvormig waterstof dat gebruikt wordt in brandstofcellen.	7	7	100%	100%	100%
H ₂ ICE	Vloeibaar of gasvormig waterstof dat gebruikt wordt in interne verbrandingsmotoren.	5	7	100%	82%	92%
MeOH, FC	Methanol dat gebruikt wordt in brandstofcellen.	7	6	100%	100%	100%
MeOH, ICE	Methanol dat gebruikt wordt in interne verbrandingsmotoren.	5	6	100%	82%	92%

Schone verbrandingsmotoren	Motoren	NRMM Stage V IWP, IWA	
		NRMM Stage V NRE	EURO VI
Hybride combinaties	Brandstoffen	SCR & DPF retrofit	
		BioDiesel (FAME, HVO)	E-diesel
		BioMethaan (Bio-LNG)	E-methaan
		BioMethanol	E-methanol
		Blauwe waterstof (H ₂), gas of vloeibaar	E-H ₂ (groene waterstof), gas of vloeibaar
		Blauwe ammoniak (NH ₃)	E-ammoniak
Elektrificatie	Batterij varen	Lithium Ion NMC techniek	
		Lithium LiFePO ₄ techniek	
		Flow batteries	
		PEM FC (automotive)	
Elektrificatie	Brandstofcel (fuel cell)	PEM FC (automotive)	
		Blauwe ammoniak (NH ₃)	
		Blauwe waterstof (H ₂), gas of vloeibaar	
		BioMethanol	
Elektrificatie	Energiedragers voor brandstofcel	Blauwe ammoniak (NH ₃)	
		Blauwe waterstof (H ₂), gas of vloeibaar	
		E-waterstof (groene waterstof), gas of vloeibaar	
		BioMethanol	

SOURCE

- KiM- Knowledge Institute for Mobility Policy, Energy chains for CO₂-neutral mobility ; Efficiency, costs and space use in view, septembre 2022.
- CCNR, Assessment of technologies in view of zero-emission IWT, Part of the overarching study "Financing the energy transition to-wards a zero-emission European IWT sector" Deliverable_RQ_C_Edition1, October 2020
- CCNR, Assessment of technologies in view of zero-emission IWT, Part of the overarching study "Financing the energy transition to-wards a zero-emission European IWT sector" Deliverable_RQ_C_Edition2, May 2021
- Feuille de route de la CCNR pour la réduction des émissions de la navigation intérieure, mars 2022
- Rapport sur l'avenir de la navigation intérieure durable EICB & TNO, AVRIL 2021
- Norme européenne établissant les prescriptions techniques des bateaux de navigation intérieure, ES-TRIN, édition 2021/1
- Interreg, Programme transnational du Danube GRENDEL, Fiche d'information sur le post-traitement, avril 2020
- Interreg, Danube Transnational Programme GRENDEL, Fact Sheet Diesel-electric-propulsion, avril 2020
- Interreg, Programme transnational Danube GRENDEL, Fiche d'information sur les carburants en libre-service, avril 2020
- Interreg, Danube Transnational Programme GRENDEL, Fact Sheet Fuel-Cell propulsion, avril 2020
- Interreg, Danube Transnational Programme GRENDEL, Fact Sheet Battery electric propulsion, avril 2020
- Interreg, Programme transnational du Danube GRENDEL, Fiche d'information Euro VI pour les camions et les moteurs NRE
- IVR, Paper evaluation of propulsion systems in inland navigation, décembre 2022
- IVR, Bulletin technique, Batteries lithium-ion en navigation intérieure, février 2021
- Ministère de l'industrie et de l'artisanat, Vision des transporteurs d'énergie durable dans la mobilité, juin 2020
- STEERER, Structurer le transport maritime à zéro émission, WP2, septembre 2022
- RVO, Aspects de sécurité des nouveaux transporteurs d'énergie pour la navigation intérieure, avril 2021

- ABN-Amro, Stratégies de décarbonisation pour les secteurs, octobre 2022
- Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, The Carbon & Food Opportunity Costs of Biofuels in EU+UK, mars 2023.
- NesteMy, Renewable diesel a4 fact sheet, décembre 2022
- NEN Energy, étude de suivi sur les risques de sécurité liés à l'utilisation des biocarburants dans la navigation intérieure, décembre 2021
- EUROMOT, Secteur du transport par voies navigables Stage-V FAQ, mars 2019
- TNO, Le méthanol maritime vert, un appel à l'action, décembre 2022
- TNO, Green maritime methanol, towards a zero emission shipping industry, février 2021
- DKTI, étude de faisabilité publique sommaire H2 moteur à combustion interne
- CE Delft, Exploring BioLNG for transport, Fact finding, market exploration & business cases, mars 2018
- DNV GL, LNG in shipping : reducing emissions and increasing efficiency (Le GNL dans le transport maritime : réduction des émissions et augmentation de l'efficacité), mai 2018
- TNO, E-Fuels towards a more sustainable future for truck transport shipping and aviation, juillet 2020
- TUDelft, Article ; Hydrogen as the key to a sustainable shipping sector, Novembre 2018
- Port d'Amsterdam, HS Neo Orbis, Vers un transport maritime circulaire sans émissions, mars 2022
- ROTH, Fiche de sécurité du méthanol, mars 2022
- EICB, Hydrogen in inland navigation and short sea, an inventory of innovation projects (L'hydrogène dans la navigation intérieure et le transport maritime à courte distance, un inventaire des projets d'innovation), juillet 2020
- Agence d'évaluation environnementale, Hydrogen to Think, novembre 2021
- TU Delft, EICB, TNO, Marin, KBN ; Parlement & Science ; Article : Fiche d'information : rendre la navigation intérieure plus durable, août 2022
- OCR, Feuille de route pour l'hydrogène - Programme national pour l'hydrogène, novembre 2022
- Site d'information de Schuttevaer, divers articles
- Site d'information NT, divers articles
- Entretiens avec des experts techniques et des spécialistes

COLOFON

Fiches d'information

Options de durabilité pour la navigation intérieure

Auteurs

Noud Seegers & Dirk Degroote

Commandé par Top

Sector Logistics Octobre 2023

Clause de non-responsabilité

Ces fiches ont été rédigées avec le plus grand soin. Toutefois, Cognauship BV ne peut garantir l'exactitude ou l'exhaustivité des informations. Cognauship BV n'accepte aucune responsabilité liée au contenu de ce document.

