

Avec la participation de



GOUVERNEMENT

*Liberté
Égalité
Fraternité*



RÉGION
NORMANDIE



Vallée de la Seine



FICHES ÉNERGIES ALTERNATIVES

ALTERFI : AMMONIAC



SOMMAIRE

1. Caractéristiques 4

1.1 Généralités	4
1.2 Bilan environnemental	5
1.3 Stockage	7
1.4 Coûts	8
1.5 Infrastructure de transport	9
1.6 Projet en cours	9
1.7 Utilisation	10
1.7.1 Maritime	10
1.8 Accessibilité	11
1.8.1 Maritime	11

2. Cadre réglementaire 12

2.1 Contexte (positionnement dans les stratégies européennes et françaises)	12
2.1.1 Routier	12
2.1.2 Maritime	13

SOMMAIRE

3. Fiscalité énergie / carburant 14

4. Aides publiques 15

4.1 Routier 15

4.1.1 Suramortissement 15

4.2 Fluvial-Maritime 15

4.2.1 Suramortissement 15

5. Rétrofit 16

6. Synthèse des avantages - Inconvénients 17

1. Caractéristiques

1.1 Généralités



Tout comme l'hydrogène, l'ammoniac peut être classé dans la catégorie des RFNBO non carbonés sous réserve que le bilan CO_2 de sa fabrication soit inférieur de 70 % à celui du carburant remplacé (ici le carburant diesel pris en référence) ; nous prendrons donc pour hypothèse dans ce rapport, une cible d'émission pour la production de l'ammoniac inférieure à $28 \text{ gCO}_2/\text{MJ NH}_3$ (identique à celle de l'hydrogène).

L'ammoniac possède deux atouts qui font de lui un carburant de remplacement potentiel des carburants fossiles ; sa facilité de stockage sous forme liquide avec une énergie volumique suffisante pour envisager des trajets sur de longues distances et l'absence d'émission CO_2 lors de sa combustion. Sur ce dernier point, l'hydrogène rentrant dans la fabrication de l'ammoniac doit donc être d'origine renouvelable pour produire du « e- NH_3 » et non plus, comme traditionnellement pour les 235 Mt produites annuellement via le procédé Haber Bosch, d'origine fossile (issu de vapo-reformage de méthane ou de charbon) ; la problématique économique de l'ammoniac renouvelable rejoint donc en de nombreux points celle de l'hydrogène renouvelable.

Par contre, les médiocres qualités de l'ammoniac en tant que combustible moteur

font encore l'objet de différents travaux pour permettre à terme un développement industriel de cette filière ; des motoristes tels que MAN, Wärtsilä, HIMSEN pensent pouvoir proposer une technologie aboutie dès 2024. L'ammoniac peut également être craqué par reformage et décomposé en azote et hydrogène, hydrogène qui pourra alimenter à son tour un moteur thermique ou une pile à combustible.

Enfin la toxicité de l'ammoniac reste également un point important à maîtriser lors de son stockage, de son utilisation ou lors de fuites accidentelles. Il peut, en effet, par inhalation, causer la mort (concentration $> 300 \text{ ppm}$) ou des œdèmes pulmonaires et autres difficultés respiratoires (pour des concentrations de 70 à 300 ppm). Il est corrosif pour la peau et les yeux pouvant causer des dommages permanents jusqu'à la cécité.



1.2 Bilan environnemental



La combustion de l'ammoniac présente un certain nombre d'avantages en terme d'émissions TtW de gaz polluants, tels que l'absence d'émissions de CO_2 , de composés soufrés (SOx), d'hydrocarbures (HC), et de particules.

Cependant certaines émissions restent encore à quantifier comme les émissions potentielles de N_2O (protoxyde d'azote) dont le potentiel de réchauffement global très élevé (265 sur 100 ans) pourrait contrebalancer le bilan TtW favorable de combustion de l'ammoniac.

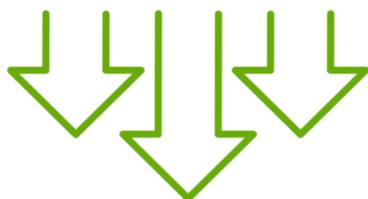
En ce qui concerne les fuites d'ammoniac (de type « imbrulés »), la limite de rejet par les moteurs thermiques équipés de SCR fixée à 10 ppm dans les transports routier pourraient servir de référence à la navigation et nécessiterait (tout comme pour le traitement de N_2O) des systèmes de post traitement adaptés. Tous ces systèmes de post traitement

existent à maturité industrielle mais présentent des surcoûts non négligeables.

De plus la très faible propagation de flamme de l'ammoniac et sa haute température d'auto inflammation (630°C vs 210°C pour le diesel) rendent nécessaire l'utilisation d'un carburant secondaire (« pilot fuel » de type gazole ou hydrogène) qui aidera à réguler la combustion finale.

Cette alimentation parallèle de 5 à 10 % en carburant fossile génère nécessairement des émissions de CO_2 et de NO_x qui augmenteront le bilan final WtW et dont une partie, les NO_x , devra être éliminée par un post-traitement catalytique.

**ZERO
EMISSION**



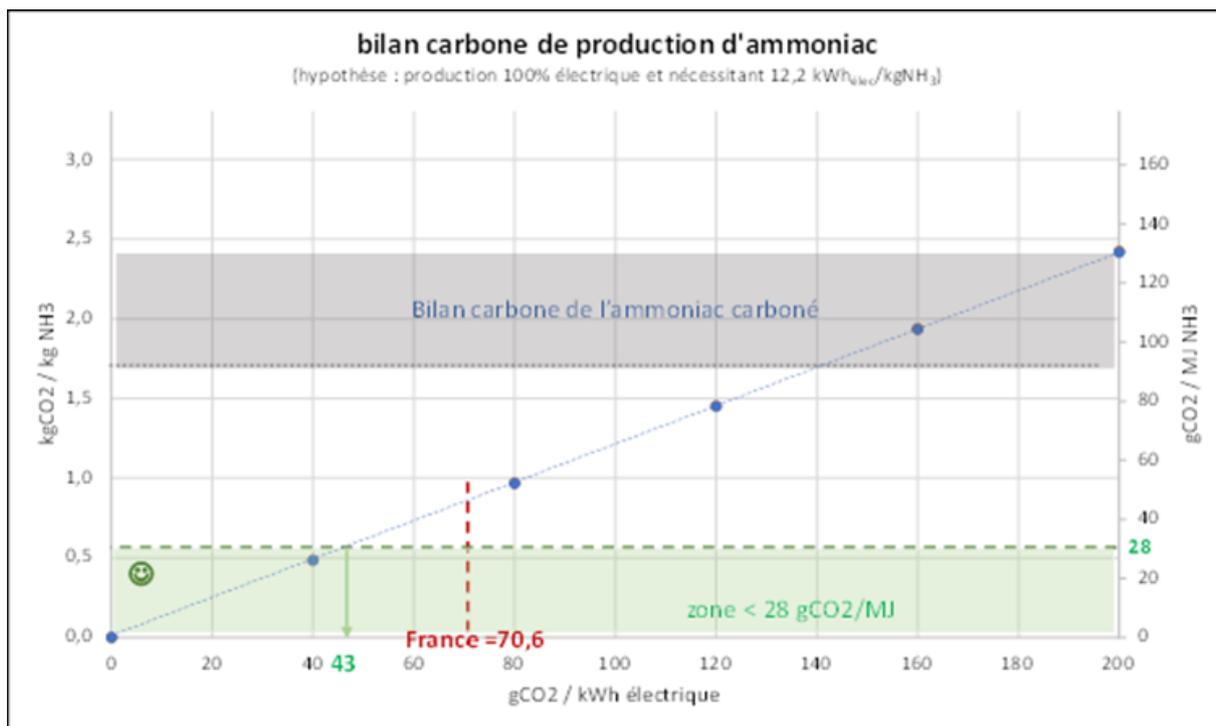
CO_2

Cependant l'ammoniac ne peut présenter un intérêt d'un point de vue de la décarbonation globale WtW que s'il est produit à partir d'hydrogène décarboné; en effet l'hydrogène actuellement utilisé dans la fabrication de l'ammoniac est produit par vapo-reformage de méthane principalement mais aussi de charbon ou de naphtha ; le bilan CO₂ global WtW résultant est de 1,6 à 3,8 tCO₂/tNH₃ selon la source fossile primaire (respectivement méthane ou charbon) soit de 90 à 137 gCO₂/MJ d'NH₃. Le bilan WtW du e-ammoniac est de 12 gCO₂/MJ, soit une réduction de 87 % par rapport au gazole.

De la même manière que pour l'hydrogène, on peut calculer le bilan carbone de

fabrication de l'ammoniac, lié à la consommation d'électricité et à son contenu CO₂. La production d'ammoniac nécessite au minimum 12,12 kWh par kg d'ammoniac. Sous réserve de l'hypothèse que l'ensemble de ces besoins énergétiques sont assurés par l'énergie électrique, le graphe ci-dessous représente l'évolution du bilan carbone de fabrication de l'ammoniac en fonction de l'intensité carbone du kWh électrique.

On constate donc que, pour produire un ammoniac suffisamment décarboné répondant à la norme de 28 gCO₂/MJ, le seuil maximal du mix électrique est de 43 gCO₂/kWh.



Bilan carbone de production d'ammoniac

1.3 Stockage



L'ammoniac est stocké sous forme liquide à température ambiante sous forme comprimée (16-18 bars) ou à basse température (-33 °C) et pression ambiante.

Dans ces conditions, il est le carburant décarboné présentant l'énergie volumique la plus élevée avec 11,4 MJ par litre de réservoir (12,9 MJ/l de liquide) loin devant l'hydrogène liquide (5 MJ/l de réservoir).

Par contre l'ammoniac est énergétiquement environ 4 fois moins dense que le gazole ou le VLSFO (very low sulphur fuel oil); cet écart devra être compensé d'un facteur correspondant, soit par une augmentation de la taille des réservoirs soit par une fréquence d'avitaillement supérieure,

entraînant dans les 2 cas respectivement une diminution de la capacité d'embarquement ou une diminution de vitesse de transport.

En général, et pour des raisons de quantité d'acier utilisée, le stockage de l'ammoniac sous pression sera préféré pour les petites quantités d'ammoniac alors que les containers réfrigérés seront employés pour les grosses quantités, avec pour 1 tonne de réservoir en acier une capacité de stockage d'ammoniac respectivement de 2,8 tonnes à température ambiante et 45 tonnes à -33 °C.



1.4 Coûts



Le coût de l'ammoniac vert est estimé à partir de l'hypothèse d'un prix final composé à 80 % d'OPEX c'est-à-dire de l'électricité nécessaire à la production d'hydrogène. À partir de la consommation énergétique nécessaire à la fabrication de l'ammoniac et d'une hypothèse de prix du MWh on estime ainsi un prix final du e-ammoniac. Ainsi on peut conclure qu'un prix de 20 à 30 USD/MWh d'électricité (environ 0,018 à 0,027 €/kWh) permettra de concurrencer les prix des carburants fossiles actuels.

Les investissements nécessaires pour la mise en œuvre d'unités de production de taille comparable à celles actuelles i.e. 3000 tNH₃/j (et permettant les économies d'échelle indispensables) nécessitent l'installation d'électrolyseur de l'ordre du GW et donc des investissements de l'ordre du milliard d'euros ; le taux de charge de telles infrastructures devra être maximisé (de l'ordre de 8 000 h/an) pour assurer une certaine rentabilité. Les énergies intermittentes renouvelables ne pourront assurer ce taux de charge maximum et le coût final du carburant ammoniac s'en trouvera notablement augmenté.

L'intermittence du fonctionnement (avec les montées et chutes de puissance corrélatives) pose d'autre part des problèmes de fiabilité (vieillesse prématuré des catalyseurs et des infrastructures) qui font aujourd'hui l'objet de nombreux travaux de recherche. Au prix d'une chute de rendement importante, des réservoirs d'hydrogène tampon pourraient fournir la puissance manquante, ajoutant ainsi 35 à 150 USD/tNH₃ (10 à 40 %) au prix final.

Le tableau ci-dessous donne les principaux investissements CAPEX à réaliser dans la filière NH₃.

Filière ammoniac	Système	Prix		Capacité installée
Électrolyseur	Électrolyseur	900	USD/kW	1 GW
Stockage sur bateau	Stockage sur bateau	651	USD/ tNH ₃	3 000 t de carburant
Moteur NH ₃	Moteur NH ₃	680-930	USD/kW	10 MW
Post traitement	Post traitement catalytique	50-100	USD/kW	10 MW

1.5 Infrastructure de transport



L'ammoniac est stocké dans des réservoirs isothermes (jusqu'à 45 kt) ou dans des réservoirs sous pression (1 à 2 kt). 38 ports à travers le monde exportent de l'ammoniac alors que 88 en importent dont 8 qui simultanément en exportent et en importent.

Le port de Rotterdam a signé un MoU avec Transhydrogen Alliance pour importer 0,5 Mt H₂/an (ou 3,8 Mt/an d'ammoniac) à partir de 2024. Sur terre, il existe déjà une infrastructure de pipelines dédiée à la distribution de l'ammoniac totalisant 3 060 km aux USA et 2 460 entre la Russie et l'Ukraine.

1.6 Projet en cours



La fabrication d'ammoniac vert (e-ammoniac) à partir d'hydrogène vert reste encore au stade confidentiel même si des projets ambitieux à travers le monde laissent présager dès 2030 un véritable essor de cette filière.

Les projets en cours totalisent à la fin de la décennie une capacité de production de 34 Mt / an d'ammoniac vert (principalement en Amérique du Sud et Australie); pour mémoire un électrolyseur de 1 GW fonctionnant 8 000 heures par an (c'est-à-dire à capacité maximale) produira environ 0,74 Mt NH₃/an. La globalité des projets (incluant ceux n'ayant pas encore de date de démarrage) totalise quelques

100 Mt/an de e-ammoniac ; par exemple en Australie, le Western Green Energy Hub projette en 2030 l'installation d'un parc éolien et PV d'une capacité de 50 GW pour assurer la production de 3,5 Mt/an H₂ ou 20 Mt/an d'ammoniac. (Pour rappel 1 GW renouvelable de capacité installée en photovoltaïque et en éolien produit respectivement environ 15 % et 30 % du temps).

Il convient de rester prudent sur la réalisation de ces projets pharaoniques qui alimentent un optimisme de rigueur et une communication qui se veut rassurante sur le dynamisme de cette filière.



1.7 Utilisation

1.7.1 Maritime



Combustion interne : IRENA positionne l'ammoniac renouvelable en 2050 comme le carburant majoritaire du mix énergétique pour le maritime avec 43 % du mix (soit 187 Mt), quand bien même cette solution technologique ne serait toujours pas validée à grande échelle.

MAN ES développe un démonstrateur bicylindre pour 2024 qui équipera le navire RoRO « Ship Color fantasy ».

Un certain nombre de projets visant à motoriser des navires à l'ammoniac sont en cours principalement dans les pays scandinaves : ZEEDS (Zero Emission Energy Distribution at Sea) ; NoGAPS (Nordic Green Ammonia Powered Ships).

En septembre 2022, la compagnie NYK Line (Japon) a reçu un agrément de principe pour la mise en opération d'un navire transporteur d'ammoniac et utilisant l'ammoniac comme combustible principal (Ammonia-Fueled Ammonia Gas Carrier); une démarche HAZID a été conduite sur les risques de fuites et les émissions de N_2O et constitue une des étapes nécessaires pour poursuivre le projet qui prévoit une phase de démonstration en 2026.

Craquage de l'ammoniac et pile à combustible :

Le craquage d'ammoniac à haute température permet de produire de l'hydrogène par une réaction inverse de la réaction de Haber Bosch. L'hydrogène ainsi produit peut alimenter une pile à combustible (après purification des gaz) ou servir de fuel pilote dans un moteur thermique.

Néanmoins le craquage catalytique est endothermique et nécessite une forte demande d'énergie entraînant une perte de rendement conséquente. Ce concept reste d'une relative complexité technique (notamment dans la gestion des phases transitoires) et d'un surcoût non négligeable.



Les projets suivants développent ce concept :

Ship FC Viking Energy :

- Ship FC Viking Energy envisage en 2024 une pile à combustible haute température (SOFC) à ammoniac de 2 MW pour son réseau de bord ; la pile sera livrée et installée par Wärtsilä fin 2023.

Amogy :

- La société Amogy présente un projet de craquage catalytique de l'ammoniac en hydrogène susceptible d'alimenter une pile à combustible ou de servir de fuel pilote.

1.8 Accessibilité

1.8.1 Maritime



Règlement européen AFIR : Sans toutefois prévoir ni d'objectifs ni de mesures contraignantes, le règlement (UE) 2023-1804, dit AFIR (Alternative Fuels Infrastructures Regulation) du 13 septembre 2023, envisage des spécifications techniques (sans toutefois les préciser) sur les points de ravitaillement et le soutage d'ammoniac pour les navires fonctionnant à l'ammoniac.

Le règlement constate (mais seulement dans ses considérants et pas dans son contenu lui-même) que l'ammoniac peut être distribué, entreposé et utilisé dans le cadre des infrastructures existantes ou, le cas échéant, avec des infrastructures du même type.

L'arrêté français du 26 juin 2024 (JO 30 juin) modifiant l'arrêté du 19 janvier 2016 relatif à la liste des carburants autorisés au regard des dispositions de l'article 265 ter du code des douanes ne mentionne pas l'ammoniac.



2. Cadre réglementaire

2.1 Contexte (positionnement dans les stratégies européennes et françaises)

2.1.1 Routier



Union Européenne : Les politiques européennes établissant les normes de performance dans le cadre du paquet « Fit for 55 » prévoient une baisse progressive des émissions de CO₂ des véhicules neufs et la fin programmée des ventes de véhicules utilitaires thermiques.

Véhicules utilitaires légers neufs :

Règlement (UE) 2023/851 du 19 avril 2023 modifiant le règlement (UE) 2019/631 :

- Objectif 2025 : baisse de 15 % des émissions de CO₂,
- Objectif 2030 : baisse de 50 % des émissions,
- Objectif 2035 : baisse de 100 % des émissions (= fin de la vente des véhicules diesel, essence et hybrides).

Véhicules utilitaires lourds neufs :

Règlement (UE) 2024/1610 du 14 mai 2024 modifiant le règlement (UE) 2019/1242 :

- Objectif 2030 : baisse de 45 % des émissions de CO₂,
- Objectif 2035 : baisse de 65 % des émissions,
- Objectif 2040 : baisse de 90 % des émissions (il existe néanmoins des exceptions pour les véhicules utilisés dans les secteurs miniers, agricole, sylvicole, etc.).

A photograph of a bright blue sky with scattered white clouds. The chemical formula 'CO2' is formed by a cluster of white, fluffy clouds in the center-left of the frame.

2.1.2 Maritime



Règlement européen FuelEU Maritime : Le règlement (UE) 2023-1805 du 13 septembre 2023 relatif à l'utilisation de carburants renouvelables et bas carbone dans le transport maritime impose une diminution de l'intensité annuelle moyenne des émissions de gaz à effet de serre de l'énergie utilisée à bord des navires de plus de 5 000 t faisant escales dans les ports européens, selon l'échéancier suivant :

- 2 % à partir du 1^{er} janvier 2025
- 6 % à partir du 1^{er} janvier 2030
- 14,5 % à partir du 1^{er} janvier 2035
- 31 % à partir du 1^{er} janvier 2040
- 62 % à partir du 1^{er} janvier 2045
- 80 % à partir du 1^{er} janvier 2050

Ces objectifs vont conduire les armateurs à utiliser davantage de carburants renouvelables et à faible émission de carbone, notamment les carburants renouvelables d'origine non biologiques (RFNBO). Ce type de carburant alternatif (et notamment le e-ammoniac) est sûrement incontournable pour atteindre les objectifs européens de réduction des émissions du secteur maritime. Pour le calcul de l'intensité GES de l'énergie consommée à bord par un navire, à partir du 1^{er} janvier 2025 et jusqu'au 31 décembre 2033, un multiplicateur « 2 » pourra être utilisé pour récompenser le navire utilisant des RFNBO (carburants renouvelables d'origine non biologique,

qui incluent les carburants de synthèse ou « e-fuels » produits à partir d'hydrogène).

Si la part des RFNBO dans l'énergie annuelle consommée à bord des navires relevant du champ d'application du règlement s'avérait être inférieure à 1 % en 2031, un sous-objectif de 2 % s'appliquera pour ces carburants à partir du 1^{er} janvier 2034 (sauf si d'ici le 1^{er} janvier 2033 leur part dépasse les 2 %). L'article 5§5 prévoit cependant que ce sous-objectif de 2 % n'entrera pas en vigueur si la disponibilité des RFNBO est insuffisante, si leur distribution géographique est inégale ou tout simplement si leur prix est trop élevé.

3. Fiscalité énergie / carburant

Il n'existe pas de fiscalité spécifique à l'ammoniac en tant que carburant alternatif. Ce type de carburant n'est pas expressément visé dans le code des impositions sur les biens et services (CIBS) qui concerne les accises sur les produits énergétiques en tant que carburant. Aucun taux d'accise réduit, ou spécifique, pour ce type de carburant.



4. Aides publiques

4.1 Routier

4.1.1 Suramortissement



Néant. Aucune disposition dans le Code Général des Impôts même si le véhicule est acheté neuf. Même chose pour les autres aides d'Etat (prime à la conversion, bonus écologique...). Ces aides ne concernent pas les poids lourds.

4.2 Fluvial-Maritime

4.2.1 Suramortissement



Le mécanisme de suramortissement permet au contribuable (société soumise à l'IS) de déduire de son résultat imposable un pourcentage des coûts liés à l'installation des équipements acquis à l'état neuf.

Texte : art 39 decies C-I-2e du CGI :

Les entreprises soumises à l'impôt sur les sociétés (ou à l'impôt sur le revenu selon un régime réel d'imposition) peuvent déduire de leur résultat imposable une somme égale à 105 % des coûts supplémentaires immobilisés (dans une limite de 15 000 000 € par bateau), hors frais financiers, directement liés à l'installation d'équipements permettant l'utilisation de l'ammoniac comme énergie propulsive principale.

Le bateau doit battre pavillon d'un des Etats membres de l'UE ou de l'EEE et être affecté à l'activité de transport de l'entreprise.

La loi de finances pour 2024 a généralisé le dispositif de suramortissement à toutes les énergies décarbonées (dont l'ammoniac) lorsque l'acquisition des équipements, la construction du bateau ou du navire est conclue entre le 1^{er} janvier et le 31 décembre 2024.

Les taux de suramortissement ont été modifiés. Si la propulsion est assurée à titre exclusif par ces énergies, le taux est de 115 % alors que si l'énergie propulsive est utilisée à titre principal, le taux est de 75 % (au lieu de 105 %).

5. Rétrofit

Sans objet à l'heure actuelle.

À noter toutefois en fluvial :

Une plateforme dédiée aux opérateurs fluviaux souhaitant verdir leur flotte a été développée par E2F. Cette plateforme « GATE » accompagne les opérateurs fluviaux dans le verdissement de leur flotte en les mettant en relation avec un Assistant à Maîtrise d'Ouvrage (AMO) pour les aiguiller à chacune des étapes de leurs projets de remotorisation de bateaux existants.

L'AMO est le prestataire technique capable de gérer l'ensemble des dimensions du projet (batteries, moteurs électriques, management de l'énergie, suivi du chantier, prescriptions techniques détaillées...). GATE s'inscrit dans le cadre du programme REMOVE « Report modal et verdissement des flottes de transport massifié » dans son volet d'accompagnement LOG-te.



6. Synthèse des avantages - Inconvénients

- Bilan CO₂ très positif si l'H₂ est produit à partir d'électricité renouvelable ou bas carbone (< 43 gCO₂/kWh élec); très faibles émissions de soufre et de particules limitées à la combustion du « pilot fuel ».
- Facilité de stockage liquide à -33 °C à pression atmosphérique (ou 18 bars T° amb) allié à une énergie volumique supérieure à l'hydrogène liquide.
- Combustible multi-usage (moteur à combustion, pile à combustible, etc.).
- Possibilité d'unités de production industrielle à grande échelle par le process Haber Bosch.
- Possibilité d'utiliser des réservoirs similaires à ceux utilisés pour le LPG (rétrofit).
- Transporteur d'hydrogène et récupération d'hydrogène par craquage d'ammoniac.

- Production d'H₂ renouvelable et augmentation programmée du parc d'électricité renouvelable et de la filière nucléaire en France.
- Moteur à combustion d'NH₃ pour filière maritime développement = développement en 2024 (MANES et Wärtsila)
- Possibilité de cracker une partie de NH₃ en H₂ pour servir de « green pilot fuel ».

- Seule l'électricité d'origine renouvelable ou nucléaire permettra la production de NH₃ bas carbone.
- Bilan GHG : émissions de polluants (N₂O, Nox et NH₃ imbrulés) encore mal quantifiées (cycle diesel est privilégié vs cycle Otto); le N₂O a un pouvoir GHG et une durée de vie particulièrement élevés (GWP100 = 265). La catalyse nécessaire présentera un surcoût.
- Bilan GHG : émissions polluantes résultant de la combustion du « pilot fuel ».
- Toxicité et pollution avec de graves conséquences sur l'environnement en cas de fuites de NH₃ dans l'atmosphère ou dans l'eau.
- Développement nécessaire d'une nouvelle filière de moteur à combustion interne à ammoniac; pas de retrofit moteur possible.
- Nécessite d'initier la combustion par un « pilot fuel » (Gazole).
- Énergie volumique 3 fois plus faible que le gazole.
- Énergie de production très élevée (due à la production de H₂)
- Aucun projet de fabrication et d'utilisation de e-NH₃ en France.
- Il n'y a pas encore de standards en place pour permettre l'usage de l'ammoniac comme carburant. Chaque bateau doit faire l'objet d'une demande d'autorisation spécifique.
- Le verdissement de l'industrie de l'ammoniac déjà en place pour les besoins de la chimie lourde pourrait concurrencer la mise en place de cette nouvelle filière énergétique.

- Règlementation spécifique pour les NOx et NH₃.
- Électricité renouvelable et nucléaire utilisée prioritairement pour des transports électrifiés, et en concurrence avec d'autres usages émetteurs de CO₂ moins énergivores.
- Les projets de la fabrication de e-NH₃ (et donc d'hydrogène par électrolyse) seront localisés principalement dans les pays où la production d'électricité renouvelable excédera la demande nationale (souveraineté énergétique des pays européens menacée).

Avantages :

- Facilité de transport et de stockage sous forme liquide.
- Adapté à de la longue distance et notamment pour les navires.

Inconvénients :

- Peu performant en tant que combustible moteur .
- Toxicité en cas de fuite (à haut risque).
- Coût de production (peu de visibilité à l'heure actuelle).
- Peu de visibilité en ce qui concerne l'entretien de la motorisation.

Opportunités :

- Envisageable et adapté à un usage plutôt maritime pour des navires.
- Carburant de remplacement du gazole.

Avec la
participation
de



GOUVERNEMENT

*Liberté
Égalité
Fraternité*



RÉGION
NORMANDIE



Vallée de la Seine



Cette fiche a été réalisée par l'IDIT avec l'apport
scientifique du CERTAM.